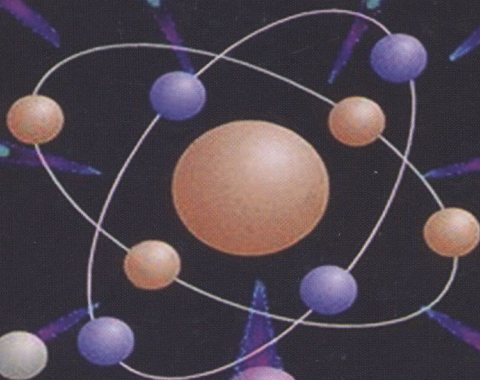


Вища освіта в Україні

ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ: ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ЗАДАЧІ

НАВЧАЛЬНИЙ ПОСІБНИК



Б. М. Завойко, Н. П. Лещій

ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ: ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА ЗАДАЧІ

Навчальний посібник для студентів
інженерно-технічних спеціальностей

За науковою редакцією кандидата технічних наук,
доцента В. М. Жука

Рекомендовано Міністерством освіти і науки України

**Видавництво “Новий Світ - 2000”
Львів – 2004**

УДК 532
ББК 30.123
3 3-13

Гриф надано Міністерством освіти і науки України
(лист № 1/11-24448 від 3.2003 р.)

Науковий редактор:

В.М. Жук – канд. техн. наук, доц., завідувач кафедри гідравліки і сантехніки
Національного університету “Львівська політехніка”

Рецензенти:

В.І. Мандрус – канд. техн. наук, доц. кафедри пожежної профілактики
Львівського інституту пожежної безпеки

С.С. Жуковський – канд. техн. наук, доц. кафедри теплогазопостачання
Національного університету “Львівська політехніка”

Б.М. Завойко, Н.П. Лещій.

3 3-13

Технічна механіка рідин і газів: основні теоретичні положення та задачі.
Навчальний посібник для студентів інженерно-технічних спеціальностей.
- Львів: “Новий Світ-2000”, 2004. - 160 іл. - 119 с.

ISBN 966-7827-44-5 “Новий Світ-2000”

У навчальному посібнику викладено в стислій формі теоретичний матеріал, який з достатньою повнотою охоплює основні розділи з курсу “Технічна механіка рідин і газів”. До кожного розділу наводяться задачі, розв’язання яких доповнює студентам знання з даного курсу.

Задачі підібрані з різних літературних джерел, а також розроблені авторами.

Навчальний посібник призначений для студентів інженерно-технічних спеціальностей.

УДК 532
ББК 30.123

ISBN 966-7827-44-5 “Новий Світ-2000”

© Б.М. Завойко, Н.П. Лещій, 2004
© “Новий Світ-2000”, 2004

Зміст

<i>Передмова</i>	5
Тема 1. Фізичні властивості рідин і газів	6
1.1. Основні теоретичні положення	6
1.2. Приклади розв'язання задач	8
1.3. Задачі для самостійного розв'язання	9
Тема 2. Стан рівноваги рідин і газів	12
2.1. Основні теоретичні положення	12
2.2. Приклади розв'язання задач	15
2.3. Задачі для самостійного розв'язання	17
Тема 3. Сила тиску рідини на плоскі та криволінійні поверхні	24
3.1. Основні теоретичні положення	24
3.2. Приклади розв'язання задач	28
3.3. Задачі для самостійного розв'язання	30
Тема 4. Закон Архімеда та елементи теорії плавучості й остійності	37
4.1. Основні теоретичні положення	37
4.2. Приклади розв'язання задач	38
4.3. Задачі для самостійного розв'язання	39
Тема 5. Режим руху рідин і газів. Гідравлічні опори	42
5.1. Основні теоретичні положення	42
5.2. Приклади розв'язання задач	46
5.3. Задачі для самостійного розв'язання	49
Тема 6. Рівняння Бернуллі. Гідравлічний розрахунок коротких трубопроводів	55
6.1. Основні теоретичні положення	55
6.2. Приклади розв'язання задач	59
6.3. Задачі для самостійного розв'язання	62
Тема 7. Гідравлічний розрахунок довгих трубопроводів	
Гідравлічний удар	74
7.1. Основні теоретичні положення	74
7.2. Приклади розв'язання задач	80
7.3. Задачі для самостійного розв'язання	82

Тема 8. Витікання рідини і газів через отвори й насадки.....	86
8.1. Основні теоретичні положення	86
8.2. Приклади розв'язання задач	89
8.3. Задачі для самостійного розв'язання	90
Тема 9. Взаємодія потоку з твердими тілами	95
9.1. Основні теоретичні положення	95
9.2. Приклади розв'язання задач	97
9.3. Задачі для самостійного розв'язання	98
Тема 10. Подібність і моделювання	
гідромеханічних процесів	103
10.1. Основні теоретичні положення	103
10.2. Приклади розв'язання задач	105
10.3. Задачі для самостійного розв'язання	106
Додатки	109
Використана література	119

Передмова

Запропонований навчальний посібник розрахований на студентів інженерно-технічних спеціальностей вищих навчальних закладів.

Основне його призначення – дати студентам усіх форм навчання, що вивчають курс “Технічна механіка рідин і газів” або споріднені з ним курси, матеріал, який дозволив би відпрацювати навички застосування теоретичних положень до розв’язування задач технічного характеру і, тим самим, опанувати практику гідромеханічних розрахунків.

Посібник містить 230 різноманітних за тематикою і ступенем складності задач, які достатньо повно охоплюють основні розділи вказаного курсу. До кожного розділу збірника подано короткі відомості з теорії, що стосуються цієї теми. Задачі ілюструються малюнками.

Потрібний довідковий матеріал наведений у 15 додатках навчального посібника.

Запропоновані авторами задачі запозичені з різних джерел, але багато з них є оригінальними.

Посібник може бути використаний також викладачами для підготовки практичних занять стаціонарної форми навчання та при komponуванні контрольних завдань для студентів заочної форми навчання.

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИН І ГАЗІВ

1.1. Основні теоретичні положення

Основними фізичними властивостями рідин і газів є: питома маса (густина), стисливість і пружність, температурне розширення й в'язкість.

Маса плин у одиниці об'єму називається питомою масою:

$$\rho = \frac{M}{W}, \quad (1.1.)$$

де ρ - питома маса; M - маса рідини або газу; W - об'єм виділеної маси.

Одиниця розмірності питомої маси - $\text{кг}/\text{м}^3$. Значення питомої маси води звичайно приймається $1000 \text{ кг}/\text{м}^3$. У додатку 1 наведені значення питомої маси води для різних температур.

Питома маса досконалих газів визначається рівнянням Клапейрона-Менделєєва

$$\rho = \frac{p}{RT}, \quad (1.2.)$$

де p - абсолютний тиск, Па ; R - питома газова стала, $\text{Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$;

T - абсолютна температура, К .

Питома маса повітря при стандартних умовах, тобто при 20°C і тискові 101325 Па (760 мм.рт.ст.) та при значенні $R=287 \text{ Дж}/(\text{кг} \cdot \text{К})$ $\rho_0 = 1,2 \text{ кг}/\text{м}^3$. За інших умов

$$\rho = \rho_0 \frac{p T_0}{p_0 T}, \quad (1.3.)$$

де p_0, T_0 – характеристики повітря при стандартних умовах.

Стисливість рідини характеризується коефіцієнтом об'ємного стиску

$$\beta_p = \frac{\Delta W}{\Delta p W} = \frac{\Delta \rho}{\rho \Delta p}, \quad (1.4.)$$

де $\frac{\Delta W}{W}$ – відносна зміна об'єму; $\frac{\Delta \rho}{\rho}$ – відносна зміна питомої маси; Δp – зміна тиску.

Коефіцієнт об'ємного стиску вимірюється в Па^{-1} , ГПа^{-1} , кПа^{-1} , або МПа^{-1} .

Для якісної характеристики пружних властивостей використовується поняття *модуля об'ємної пружності*

$$K = \beta_p^{-1}, \quad (1.5.)$$

розмірність якого збігається з розмірністю тиску.

Температурне розширення рідин і газів характеризує коефіцієнт температурного розширення

$$\beta_t = \frac{\Delta W}{W \Delta t}, \quad (1.6.)$$

де Δt – зміна температури.

В'язкість – властивість рідин і газів чинити опір деформації зсуву. Вона проявляється при русі і характеризується так званою

динамічною в'язкістю

$$\mu = \frac{\tau}{du/dn}, \quad (1.7.)$$

де τ – напруження зсуву (дотичні напруження); du/dn – градієнт швидкості, тобто зміна швидкості на одиницю довжини у перпендикулярному до потоку напрямі.

Поряд з динамічною в'язкістю вводиться поняття кінематичної в'язкості

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (1.8.)$$

Одиницею динамічної в'язкості є $\text{Па}\cdot\text{с}$, а кінематичної - $\text{м}^2/\text{с}$.

При дуже малих її значеннях можна використовувати розмірності $\text{см}^2/\text{с}$ (стокс) або $\text{мм}^2/\text{с}$.

У додатку 1 наведені значення динамічної в'язкості води при різних температурах.

1.2. Приклади розв'язання задач

Приклад 1.1. 5 л нафти важать 41,7 Н. Треба визначити питому масу і питому вагу.

Розв'язання.

Переводимо об'єм в літрах у кубічні метри:

$$W = 5\text{ л} = 5 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3.$$

Питома вага дорівнюватиме

$$\gamma = \frac{41,7}{5 \cdot 10^{-3}} = 8340 \text{ Н/м}^3.$$

Питому масу знайдемо за формулою (1.1.) :

$$\rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{8340}{9,81} = 850,8 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 1.2. До 5 л антифризу ($\rho = 800 \text{ кг/м}^3$) додано 5,5 л води для одержання 10,5 л суміші. Необхідно визначити питому масу і питому вагу суміші.

Розв'язання. Питому масу суміші визначаємо так:

$$\rho_c = \frac{M_1 + M_2}{W_1 + W_2} = \frac{\rho_1 W_1 + \rho_2 W_2}{W_1 + W_2},$$

де W_1, W_2 – відповідно об'єм антифризу і води; ρ_1, ρ_2 - їх питомі маси.

Оскільки питома маса $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$, то

$$\rho_c = \frac{800 \cdot 0,005 + 1000 \cdot 0,0055}{0,005 + 0,0055} = 904,8 \text{ кг/м}^3.$$

Відповідно питома вага суміші

$$\gamma_c = \rho_c g = 904,8 \cdot 9,81 = 8876 \text{ Н/м}^3.$$

Приклад 1.3. Визначте зміну тиску, при якій початковий об'єм води зменшиться на 1,5 %.

Розв'язання. З рівняння (1.4.)

$$\Delta p = \frac{\Delta W}{W} \frac{1}{\beta_p},$$

де $\Delta W/W$ за умовою задачі дорівнює 0,015.

Прийнявши значення коефіцієнта стисливості $\beta_p = 5 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ отримаємо

$$\Delta p = \frac{0,015}{5 \cdot 10^{-10}} = 30 \cdot 10^6 \text{ Па} = 30 \text{ МПа}.$$

1.3. Задачі для самостійного розв'язання

1.1. Обчисліть питому масу суміші, одержаної змішуванням 16 л рідини питомої маси $\rho_1 = 910 \text{ кг/м}^3$ і 25 л рідини з $\rho_2 = 850 \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: 873,4 кг/м³.

1.2. Оливу питомої маси 880 кг/м³ змішали з гасом (питома маса 0,8 г/см³). У суміші маса оливи становить 90%. Якою буде питома маса суміші?

Відповідь: 872 кг/м³.

1.3. У системі гідроповідні використовується суміш двох типів оливи: $\rho_1 = 923 \text{ кг/м}^3$ і $\rho_2 = 880 \text{ кг/м}^3$. Питома маса суміші $\rho_c = 910 \text{ кг/м}^3$. Обчисліть у відсотках вміст оливи з питомою масою ρ_1 .

Відповідь: 67%.

1.4. Сталевий трубопровід довжиною 200 м і діаметром 500 мм випробовують на міцність гідравлічним способом. Який об'єм води треба додатково подати у трубопровід для збільшення тиску від 0,1 до 4,5 МПа? Розширенням стінок трубопроводу знехтувати.

Відповідь: при $\beta_p = 5,6 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$; $\Delta W = 8,6 \text{ л}$.

1.6. Олива міститься під атмосферним тиском у масивному товстостінному циліндрі з внутрішнім діаметром 20 мм і довжиною 5 м. Визначте зміну об'єму оливи підвищенням тиску в циліндрі до 20 МПа. Модуль пружності оливи $1,33 \cdot 10^6$ кПа. Деформацією стінок знехтувати.

Відповідь: 0,24 см³.

1.7. Обчисліть об'ємний модуль пружності рідини, якщо під дією вантажу масою $M = 250$ кг толок опустився на $\Delta h = 5$ мм (рис.1).

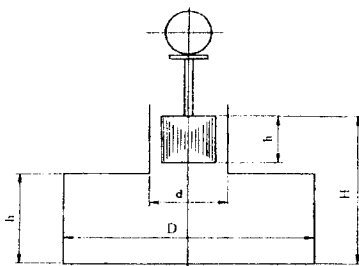


рис. 1

Початкова висота положення толока (без навантаження) $H = 1,5$ м; $h = 1,3$ м; діаметр толока $d = 80$ мм, а резервуара $D = 0,3$ м. Вагу толока і пружність стінок резервуара до уваги не брати.

Відповідь: $1,8 \cdot 10^9$ Па.

1.8. Яку масу мазуту ($\rho = 930$ кг/м³) можна залити в резервуар висотою $H = 8$ м і діаметром $D = 2,5$ м при температурі 15°C? Можливе збільшення температури до 35°C. Коефіцієнт температурного розширення $\beta_t = 0,65 \cdot 10^{-3}$ град⁻¹. Розширення стінок резервуара до уваги не брати.

Відповідь: 36028,2 кг.

1.9. Обчисліть підвищення тиску в закритому об'ємі гідроповідні при зміні температури робочої рідини від 20 до 50°C та значеннях коефіцієнта температурного розширення $\beta_t = 7,3 \cdot 10^{-4}$ град⁻¹ і коефіцієнта об'ємного стиснення $\beta_p = 7,2 \cdot 10^{-10}$ Па⁻¹. Витіками робочої рідини і деформацією елементів гідроповідні знехтувати.

Відповідь: 25,35 МПа.

1.10. Сталевий трубопровід діаметром 400 мм і довжиною 1 км перебуває під тиском 2 МПа при температурі 10°C. Визначте тиск води у трубопроводі з підвищенням температури до 25°C у результаті її зовнішнього підігрівання (температурний коефіцієнт об'ємного розширення $15,5 \cdot 10^{-5}$ град⁻¹; коефіцієнт стиску $5 \cdot 10^{-4}$ Па⁻¹).

Відповідь: 2,65 МПа.

1.11. Цапфа діаметром 40 мм і довжиною 80 мм обертається у вальниці з кутовою швидкістю 62,8 с⁻¹. У проміжку між цапфою і вальницею товщиною 0,2 мм є шар рідини з питомою масою 900 кг/м³. Приймаючи зміну швидкості в проміжку лінійною, визначте динамічну і кінематичну в'язкості оливи, якщо сила тертя у вальниці 6 Н.

Відповідь: 95,08 $\cdot 10^{-3}$ Па $\cdot$ с; 1,056 $\cdot 10^{-4}$ м²/с.

1.12. Для визначення в'язкості рідин використовують ротаційний віскозиметр, внутрішній циліндр якого $D_1=160$ мм, а зовнішній $D_2=180$ мм (рис.2). При частоті обертання внутрішнього циліндра 90 хв⁻¹ виникає момент тертя в защілнику вальниці $M=0,0735$ Н·м. Обчисліть в'язкість залитої в кільцевий простір рідини, вважаючи, що швидкість в проміжку між циліндрами змінюється за лінійним законом і довжина циліндра $L=40$ см

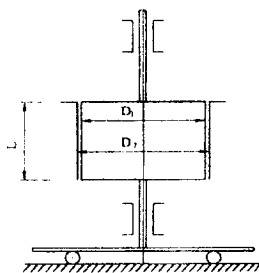


рис. 2

Відповідь: $0,0049$ Па·с.

1.13. Обчисліть питому масу повітря при надлишковому тиску 97 кПа (715 мм. рт.ст.) і температурі 100°C .

Відповідь: $0,906$ кг/м³.

1.14. Балон з киснем об'ємом 70 дм³ при тиску $9,8$ МПа переносять з вулиці, де температура 266 К, у приміщення з температурою 300 К. Якими будуть тиск газу, його маса, якщо газова стала дорівнює 260 Дж/(кг·К), процес ізохорний, тобто $p/T=\text{const}$?

Відповідь: $0,1417$ кг; $11,05$ МПа.

1.15. Обчисліть кінематичну і динамічну в'язкість повітря при температурі 150°C і тискові $5 \cdot 10^6$ Па, якщо динамічна в'язкість змінюється залежно від температури за законом: $\mu = (1,711 + 5,03 \cdot 10^{-3} t) 10^{-5}$ Па·с

Відповідь: $6 \cdot 10^{-7}$ м²/с; $5 \cdot 10^{-7}$ Па·с

СТАН РІВНОВАГИ РІДИН І ГАЗІВ

2.1. Основні теоретичні положення

Гідростатичний тиск p – це напруга стиску в точці, розміщеній всередині рідини, що знаходиться в стані спокою:

$$p = \lim_{\Delta\omega \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta\omega}, \quad (2.1.)$$

де ΔP - сила тиску, що діє на елементарну площинку $\Delta\omega$, яка включає в собі дану точку.

Гідростатичний тиск завжди спрямований по нормалі до площинки, на яку він діє, і його величина не залежить від орієнтації площинки в просторі. Він є лише функцією координат.

У міжнародній системі одиниць фізичних величин (СІ) одиницею вимірювання тиску є 1 Н/м^2 - паскаль (Па). Вигіднішими для практичного використання є кратні одиниці - гектопаскаль (гПа), кілопаскаль (кПа) і мегапаскаль (МПа): $1 \text{ гПа} = 100 \text{ Па}$; $1 \text{ кПа} = 1000 \text{ Па}$; $1 \text{ МПа} = 10^6 \text{ Па}$.

Рівновага рідини описується диференціальним рівнянням

$$dp = \rho(F_x dx + F_y dy + F_z dz), \quad (2.2.)$$

де dp - повний диференціал тиску; F_x, F_y, F_z – проекції пришвидження масових сил на координатні осі; ρ — питома маса рідини.

При дії тільки сили ваги (так званий абсолютний спокій) гідростатичний тиск у будь-якій точці рідини на глибині h виражається залежністю

$$p = p_0 + \rho \cdot g \cdot h, \quad (2.3.)$$

де p_0 - тиск на вільній поверхні рідини.

Рівняння (2.3.), яке називається основним рівнянням гідростатики, можна записати ще й так:

$$p = p_0 + \rho \cdot g (z_0 - z), \quad (2.4.)$$

де z_0, z - відповідно відстані від довільної площини порівняння до вільної поверхні рідини і до точки в рідині, де тиск дорівнює p .

У ряді випадків рівняння (2.4.) вигідно представляти у вигляді

$$\frac{p}{\rho \cdot g} + z = \frac{p_0}{\rho \cdot g} + z_0. \quad (2.5.)$$

Якщо на поверхні рідини тиск атмосферний, тобто $p_0 = p_{атм}$, то рівняння (2.3.) запишеться так

$$p_{абс} = p_{атм} + \rho g h, \quad (2.6.)$$

де $p_{абс}$ - абсолютний тиск.

Різниця між $p_{абс}$ і $p_{атм}$ називається надлишковим тиском, тобто

$$p_{над} = p_{абс} - p_{атм} = \rho g h, \quad (2.7.)$$

звідки

$$h = \frac{p_{абс} - p_{атм}}{\rho g} = \frac{p_{над}}{\rho g}. \quad (2.8.)$$

Величина h , що визначається формулою (2.8.), називається п'єзометричною висотою. Якщо тиск менший за атмосферний, то різниця між атмосферним тиском і абсолютним тиском називається вакуумом:

$$p_{вак} = p_{атм} - p_{абс} = \rho g h_{вак}, \quad (2.9.)$$

а величина

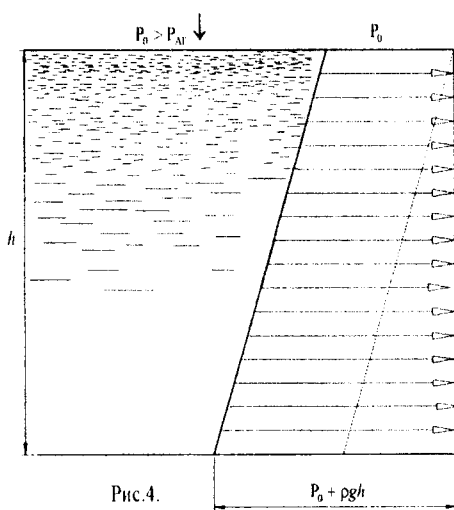
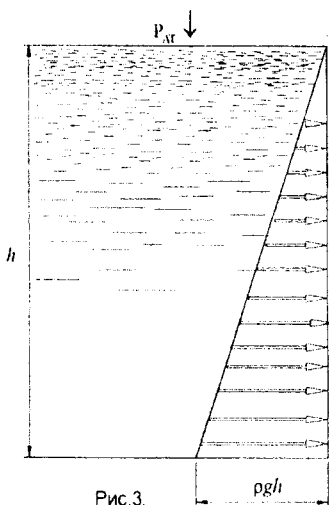
$$h_{вак} = \frac{p_{атм} - p_{абс}}{\rho g} = \frac{p_{вак}}{\rho g} \quad (2.10.)$$

відповідно вакуумметричною висотою.

Залежність (2.7.) графічно зображує епюру надлишкового тиску

(рис.3.) у вигляді прямокутного трикутника з основою ρgh . При наявності тиску p_0 епіюра матиме вигляд, зображений на (рис.4.). Епіюри тиску можуть бути використані для визначення сил тиску рідини на плоскі стінки (так званий графо-аналітичний метод).

Сукупність п'єзометричних висот утворює п'єзометричну поверхню.



При дії на вільній поверхні атмосферного тиску п'єзометрична висота для будь-якої точки дорівнює глибині h занурення цієї точки під рівень вільної поверхні.

При ізотермічному стані газу тиск у ньому змінюється за експоненціальним законом, зменшуючись зі збільшенням висоти:

$$p = p_0 e^{-gh/RT}, \quad (2.11.)$$

де p_0 - певне фіксоване значення тиску на площині порівняння (наприклад на поверхні землі); R - газова стала; T - абсолютна температура.

Для адіабатного (ізоентропійного) стану справедливий закон

$$\frac{k}{k-1} \cdot \frac{p}{\rho} = \frac{k}{k-1} \cdot \frac{p_0}{\rho_0}, \quad (2.12.)$$

де k показник адіабати.

При цьому, згідно а законом Клапейрона-Менделєєва (1.2.),

$$\frac{p}{\rho} = RT.$$

2.2. Приклади розв'язку задач

Приклад 2.1. Визначити питому масу морської води на глибині 300 м, де надлишковий тиск дорівнює 3,08 МПа.

Розв'язання. Оскільки на поверхні моря тиск атмосферний, то значення надлишкового тиску відповідно до (2.8) становить $p = \rho gh$, звідки

$$\rho = \frac{p}{gh} = \frac{3,08 \cdot 10^6}{9,81 \cdot 300} = 1047 \text{ кг/м}^3.$$

Приклад 2.2. Знайти значення тиску p_0 , прикладеного до поверхні рідини в закритому резервуарі, якщо вода в п'єзометрі піднялася на висоту $h_1 = 1,2$ м, а точка N підключення п'єзометра перебуває на глибині $h_2 = 0,6$ м.

Розв'язання. Відповідно до основного закону гідростатики можна записати, що $p_0 + \gamma h_2 = \gamma h_1$, звідки

$$p_0 = \rho g(h_1 - h_2) = 1000 \cdot 9,81(1,2 - 0,6) = 5886 \text{ Па}.$$

Приклад 2.3. Обчисліть різницю тисків у резервуарах A і B , заповнених водою (рис.5). Різниця рівнів ртуті в диференційному манометрі $h = 50$ мм.

Розв'язання. Запишемо рівняння рівноваги щодо нижнього рівня ртуті. У лівому коліні

$$p = p_1 + \rho_1 g h_1,$$

у правому

$$p = p_2 + \rho_1 g h_2 + \rho_2 g h,$$

де ρ_1 – питома маса води; ρ_2 – питома маса ртуті.

Прирівнявши праві частини рівнянь, отримаємо

$$p_1 + \rho_1 g h_1 = p_2 + \rho_1 g h_2 + \rho_2 g h,$$

$$p_1 - p_2 = \Delta p = \rho_2 g h - \rho_1 g (h - h_2) = \rho_2 g h - \rho_1 g h = g h (\rho_2 - \rho_1).$$

Винесемо ρ_1 за дужки. Тоді, позначивши

$$\rho_2 / \rho_1 = \delta, \text{ маємо } \Delta p = \rho_1 g (\delta - 1).$$

$$\text{Оскільки } \delta = 13,6, \text{ то } \Delta p = 12,6 \rho_1 g h = \\ = 12,6 \cdot 1000 \cdot 9,81 \cdot 0,05 = 6180,3 \text{ Па.}$$

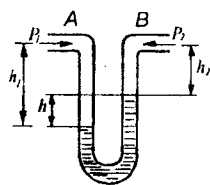


рис.5

Приклад 2.4. Обчисліть частоту обертання циліндричної посудини висотою $H_0 = 1,2 \text{ м}$ і діаметром $D = 0,8 \text{ м}$, заповненої рідиною до висоти $H_0/2$, при якій рідина піднімається до країв посудини (рис.6). Якою буде частота обертання посудини, якщо в ній залишиться лише половина початкового об'єму рідини?

Розв'язання. Рівняння поверхні рівня таке :

$$z = \frac{\omega^2 r^2}{2g};$$

z – координата будь-якої точки поверхні рівня на відстані r від осі.

При $r = R$, де R – радіус посудини, $z = H_0 = \omega^2 R^2 / 2g$.

Об'єм параболоїда обертання:

$$V_n = \frac{1}{2} \pi R^2 H = \frac{1}{2} \pi R^2 \frac{\omega^2 R^2}{2g} = \frac{1}{2} \frac{\pi D^2}{4} \frac{\omega^2 D^2}{8g},$$

а початковий об'єм рідини в посудині

$$V = \frac{\pi D^2}{4} \frac{H_0}{2} = \frac{\pi D^2 H_0}{8}.$$

Об'єм посудини

$$V_0 = \frac{\pi D^2}{4} H_0.$$

Очевидно, що

$$V_0 - V_n = V$$

або

$$\frac{\pi D^2 H_0}{4} - \frac{1}{2} \frac{\pi D^2 \omega^2 D^2}{4 \cdot 8g} = \frac{\pi D^2 H_0}{8},$$

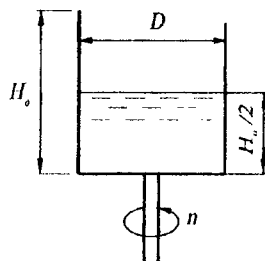


рис.6

звідки

$$\omega = \frac{\sqrt{16gH_0}}{D} = \frac{1}{0,8} \sqrt{16 \cdot 9,81 \cdot 1,2} = 17,16 \text{ c}^{-1},$$

$$n = \frac{17,16}{6,28} = 2,73 \text{ c}^{-1} = 163,9 \text{ хв}^{-1}.$$

Приклад 2.5 Літак повертає в горизонтальній площині, що спричинює нахил крил до неї під кутом 45° . Радіус повороту літака 400 м . Визначте швидкість польоту на віражі, при якій рівень пального в баці був би паралельним до площини крил.

Розв'язання. Тангенс кута нахилу дорівнює відношенню відцентрової сили до сили тяжіння :

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{V^2/R}{g} = \frac{V^2}{Rg} = \operatorname{tg} 45^\circ = 1$$

Звідси

$$V = \sqrt{gR} = \sqrt{9,81 \cdot 400} = 62,64 \text{ м/с} \approx 226 \text{ км/год}.$$

2.3. Задачі для самостійного розв'язку

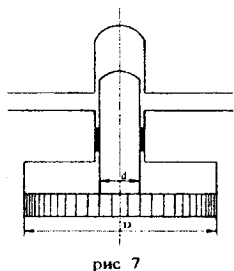


рис 7

2.1. У трубі AB (рис.7) має підтримуватися тиск $p = 1,2 \text{ МПа}$ за допомогою толока діаметром d . Цей толок становить єдине ціле з толоком більшого діаметра D , на який діє тиск стовпа води висотою $h = 30 \text{ м}$. Яким повинно бути відношення D/d ?

Відповідь: $D/d = 2$.

2.2. Диференційний гідравлічний акумулятор підтримує тиск $p = 2 \text{ МПа}$ у трубі AB (рис.8) за допомогою толока діаметром

$\delta = 5 \text{ см}$, з'єднаного жорстко з двома іншими толоками, діаметри яких $D = 25 \text{ см}$, $d = 12 \text{ см}$. Між цими толоками подається пара під тиском p . Яким має бути цей тиск, якщо $p_0 = p_{\text{ат}} = 101,3 \text{ кПа}$?

Відповідь: $p_1 = 205,25 \text{ кПа}$.

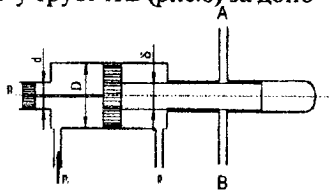


рис 8

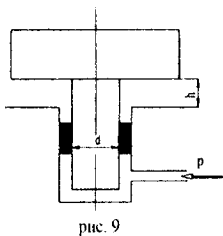


рис. 9

2.3. Під толоком гідроакумулятора діаметром $d=20$ см тиск води становить $3,43$ МПа. Якщо толок підніметься на висоту $h = 2,4$ м (рис.9), яка діятиме на нього сила тиску? Втрати тиску на тертя в ущільненні становлять 3%.

Відповідь: $103,8$ кН.

2.4. У вертикально розміщеному під'ятнику

ущільнення вала діаметром $d = 80$ мм (рис.10) здійснено манжетою, розрахункова довжина якої $b = 25$ мм. На вал діє осьова сила $P=40$ кН. Визначте тиск на нижню частину вала p , а також силу тертя, якщо коефіцієнт тертя $f=0,1$.

Відповідь: $p = 7,08$ МПа; $T = 4,44$ кН.

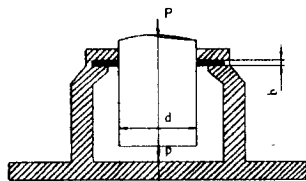


рис. 10

2.5. Визначте висоту h , на яку можна підняти воду прямодією паровою толоковою помпою (рис.11), якщо манометричний тиск у паровому циліндрі $p_1 = 250$ кПа, діаметр його $d_1 = 12$ см, а діаметр водяного циліндра $d_2 = 20$ см.

Відповідь: $h = 9$ м.

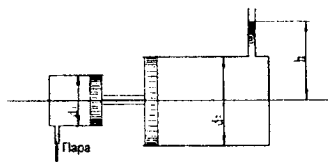


рис. 11

2.6. Обчисліть абсолютний тиск пари на поверхні води закритої посудини за показами батарейного ртутного манометра (рис.12). Дано: $z_1 = 2,3$ м; $z_2 = 1,2$ м; $z_3 = 2,5$ м; $z_4 = 1,4$ м; $z_5 = 3$ м; питома маса ртуті $\rho_{рт} = 13600$ кг/м³.

Відповідь: $p_0 = 363,2$ кПа.

2.7. Обчисліть різницю тисків газу у посудинах, показаних на (рис. 13), за такими даними: $h_1 = 0,8$ м; $h_2 = 0,4$ м; $h_3 = 0,6$ м; $h_4 = 0,9$ м. У посудинах знаходиться вода, а в диференційному манометрі

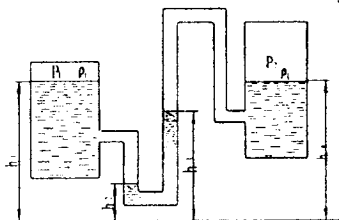


рис. 13

- ртуть

$\rho_{рт} = 13600$ кг/м³.

Відповідь: $\Delta p = 25,7$ кПа.

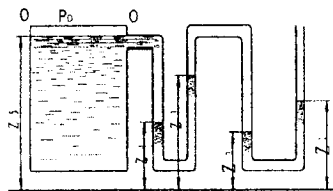


рис. 12

2.8. Обчисліть наповнення h ємності В під дією прикладеного до толока діаметром 200 мм зусилля $F=150$ Н, який діє на рідину питомої маси $\rho_1 = 900$ кг/м³, що заповнює бак А.

Останній сполучається з ємністю В трубкою, заповненою ртуттю ($\rho_2 = 13600$ кг/м³)..

Ємність В заповнюється газом ($\rho_g = 750 \text{ кг/м}^3$). У підключеній до ємності манометричній трубці (рис.14) є вода, а у лівій її гілці над водою – газ. Відомі розміри, що характеризують положення рівнів рідини: $a = 0,2 \text{ м}$; $b = 0,1 \text{ м}$; $c = 0,12 \text{ м}$; $d = 0,15 \text{ м}$; $e = 0,35 \text{ м}$.

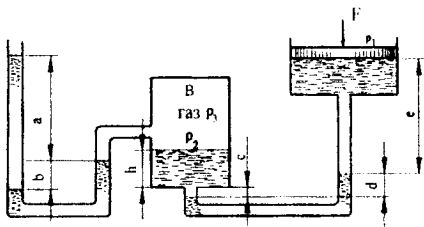


рис. 14

Відповідь: $h = 3,5 \text{ м}$.

2.9. До закритого резервуара з рідиною підключено манометричну трубку, конфігурація якої наведена на (рис. 15.) Верхня частина трубки заповнена газом ($\rho = 728 \text{ кг/м}^3$) і різниця границь розділу рідин у ній $h_1 = 20 \text{ см}$. Різниця рівнів рідини у резервуарі і трубці $h_2 = 18 \text{ см}$. Обчисліть питому масу рідини, якщо тиск на поверхні рідини $p_0 = 102,3 \text{ кПа}$, а тиск атмосферний $p_{\text{атм}} = 0,1 \text{ МПа}$.

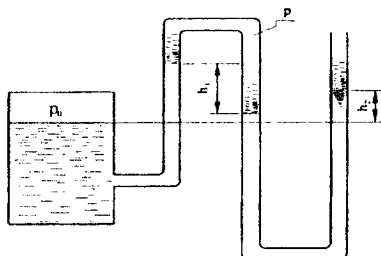


рис. 15

Відповідь: 1000 кг/м^3 .

2.10. Закритий резервуар заповнений водою і оливою питомої маси $\rho_1 = 800 \text{ кг/м}^3$. Товщина шару води $h_2 = 50 \text{ см}$, оливи – $h_1 = 20 \text{ см}$. Обчисліть величину надлишкового тиску, що діє на поверхню оливи, якщо

рівень ртуті в манометричній трубці знаходиться на $h = 40 \text{ см}$ нижче рівня оливи (рис. 16).

Відповідь: $p_0 = 46,1 \text{ кПа}$.

2.11. Три різні рідини питомої маси $\rho_1 = 1000 \text{ кг/м}^3$, $\rho_2 = 13600 \text{ кг/м}^3$ і $\rho_3 = 700 \text{ кг/м}^3$ заповнюють U-подібну трубу, як це показано на (рис. 17). Обчисліть положення рівнів рідини z_0, z_1, z_2, z_3 , якщо $z_0 - z_1 = 0,2 \text{ м}$; $z_3 - z_2 = 0,1 \text{ м}$; $z_1 + z_2 = 1 \text{ м}$.

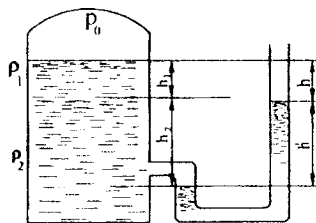


рис. 16

Відповідь: $z_0 = 695 \text{ мм}$, $z_1 = 495 \text{ мм}$, $z_2 = 505 \text{ мм}$, $z_3 = 605 \text{ мм}$.

2.12. На (рис.18) зображено схему гідравлічного преса. До толока діаметром $d_1 = 20 \text{ мм}$ прикладена сила $P_1 = 500 \text{ Н}$. Обчисліть, з якою силою діє робоча рідина на толок більшого циліндра діаметром $d_2 = 150 \text{ мм}$ і на яку висоту підніметься він, якщо

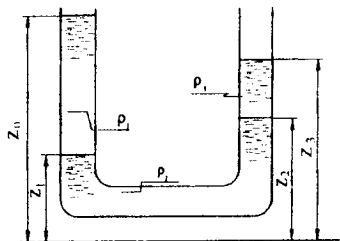


рис. 17

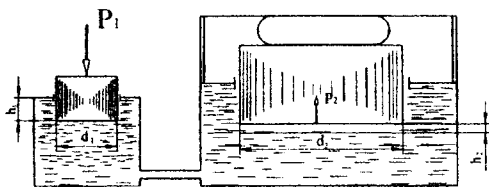


рис. 18

меншого циліндра $d=5$ см. Якого діаметра повинен бути толоч другого циліндра, щоби забезпечити на виході силу пресування $P_2=5$ кН? Розміри a і b відповідно дорівнюють: $a=15$ см, $b=75$ см; коефіцієнт корисної дії преса, що враховує наявність тертя, $\eta=0,9$.

Відповідь: $D=12,4$ см.

2.14. Обчисліть висоти h_1 і h_2 при поданому на (рис.20) стані рівноваги толочів.

Діючі на толочки сили відповідно дорівнюють: $P_1=150$ Н; $P_2=200$ Н; $P_3=300$ Н. Діаметр толочів прийняти однаковим і рівним 20 см.

Відповідь: $h_1=19$ см; $h_2=38$ см.

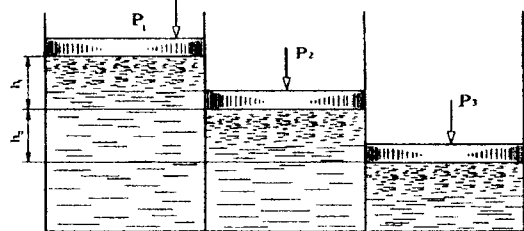


рис. 20

резервуарі $p_m=0,1$ МПа.

Відповідь: 1,02 МПа.

2.16. Визначте тиск p на висоті $h=500$ м над рівнем моря, якщо тиск на рівні моря $p_0=10,1 \cdot 10^4$ Па і температура $t_0=27^\circ\text{C}$. Розподіл тиску прийняти, як при ізотермічному процесі.

Відповідь: 95405 Па.

переміщення малого толоча $h_1=80$ мм.

Відповідь: $P_2=28,13$ кН;

$h_2=1,42$ мм.

2.13. Зусилля, прикладене до ручки гідравлічного преса $N=150$ Н (рис.19). Діаметр толоча

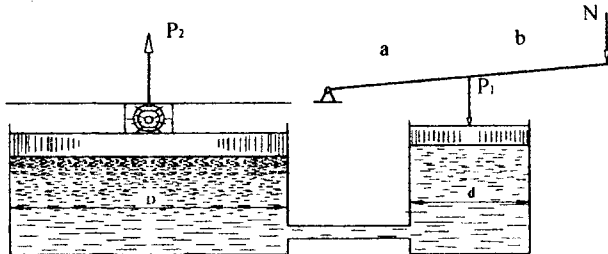


рис. 19

2.15. Закритий резервуар, заповнений до висоти $h=1,5$ м оливою ($\rho=900$ кг/м³), з'єднується при відкритому вентилі (рис.21) з мультиплікатором тиску, що складається з великого ($D=15$ см) і малого ($d=5$ см) циліндрів. Обчисліть величину тиску p_2 на виході при манометричному тиску в

2.17. На основі даних попередньої задачі обчисліть тиск, прийнявши процес адіабатним при показнику адіабати $k = 1,4$.

Відповідь: 95363 Па.

2.18. Температура повітря на рівні моря $T_0 = 273$ К. Визначте, на якій висоті температура повітря дорівнюватиме -1°C , приймаючи адіабатну зміну стану газу.

Відповідь: $H = 102$ м.

2.19. U – подібна трубка з водою обертається довкруги вертикальної осі z (рис.22). Який буде у точці А тиск при

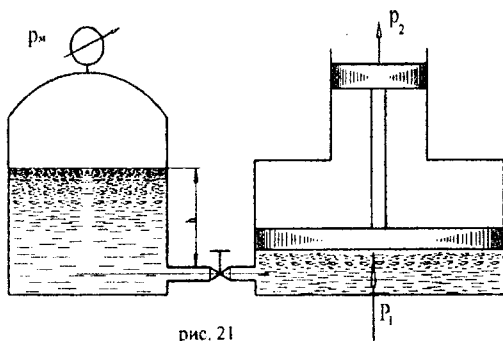


рис. 21

обертанні трубки з частотою $n = 100$ хв⁻¹, якщо атмосферний тиск $p_{атм} = 101,3$ кПа? Нехтуючи тиском пароутворення і зміною об'єму, знайдіть висоту рівня води у вертикальних гілках трубки при обертанні з $n = 950$ хв⁻¹.

Відповідь: $p = 103,39$ кПа; $z = 20,7$ см.

2.20. Циліндрична посудина діаметром 100 мм (рис.23) використовується як лічильник обертів.

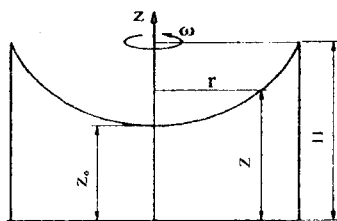


рис. 23

Посудина, заповнена водою, до висоти 15 см, обертається довкруги власної осі з постійним числом обертів. Яка буде частота обертання, якщо рівень рідини опуститься на 20 см? Якою повинна бути мінімальна висота посудини, щоби при обертанні з частотою 800 хв⁻¹ не оголилося її дно?

Відповідь: $n = 535$ хв⁻¹; $H_{min} = 89,2$ см.

2.21. Циліндрична посудина висотою $H = 0,5$ м і діаметром $D = 20$ см наповнена рідиною до висоти $h = 20$ см. З якою кутовою швидкістю повинна вона обертатися, щоби параболоїд обертання, утворений поверхнею рідини, дотикався своєю вершиною дна посудини (рис. 24)

Відповідь: $\omega = 28$ с⁻¹.

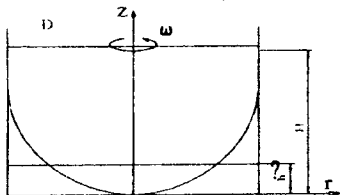


рис. 24

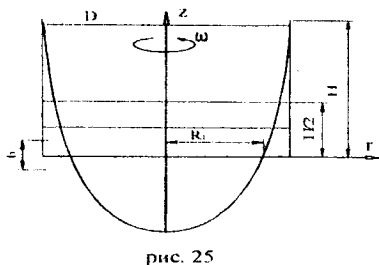


рис. 25

2.22. Виходячи з умов попередньої задачі, обчисліть кутову швидкість обертання посудини, при якій гілки параболоїда обертання досягнуть країв посудини.

Примітка. Оскільки $h < H/2$, то утвориться зрізаний параболоїд обертання, і розрахункова схема набуває вигляду, як це показано на (рис.25)

Відповідь: $\omega = 35 \text{ c}^{-1}$.

2.23. Використовуючи дані задачі 2.22, обчисліть кутову швидкість обертання, при якій гілки параболоїда обертання досягнуть країв посудини, якщо до обертання посудина була заповнена до висоти $h = 30 \text{ см}$.

Примітка. Оскільки $h > H/2$, то при певній кутовій швидкості обертання параболоїд обертання не дотикатиметься до посудини при досягненні його гілками її країв (рис. 26).

Відповідь: 28 c^{-1} .

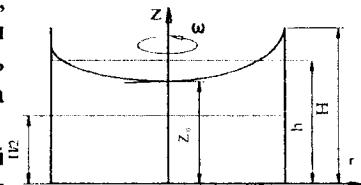


рис. 26

2.24. Закритий циліндричний бак діаметром $D = 50 \text{ см}$ висотою $H = 1 \text{ м}$, заповнений оливою ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$) до висоти $h = 0,6 \text{ м}$, обертається довкруги вертикальної осі з постійною кутовою швидкістю. При цьому вершина параболоїда обертання дотикається дна. Обчисліть швидкість обертання.

Примітка. Оскільки $h > H/2$, то при досягненні вершиною параболоїда дна, його гілки перетинатимуть кришку посудини (рис.

27).

Відповідь: $\omega = 19,8 \text{ c}^{-1}$.

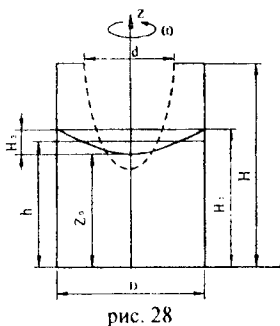
2.25. Використовуючи дані попередньої задачі, визначте тиск у точці А бака, якщо частота обертання циліндра $\omega = 19,8 \text{ c}^{-1}$, а тиск газу над вільною поверхнею води $p_0 = 30 \text{ кПа}$ (рис.27).

Відповідь: $42,25 \text{ кПа}$.

2.26. Циліндрична посудина, показана на (рис.28), обертається довкруги вертикальної осі з постійною кутовою швидкістю $\omega = 18 \text{ c}^{-1}$. Під час руху рідина піднялася на стінках до висоти $H_1 = 0,8 \text{ м}$. Обчисліть, до якої висоти h

був заповнений циліндр перед обертанням, якщо $H = 1\text{ м}$, $D = 0,5\text{ м}$, $\rho = 890\text{ кг/м}^3$.

Відповідь: $h = 0,28\text{ м}$.



2.27. Для випадку, наведеного в задачі 2.26., обчисліть максимально можливий діаметр отвору в кришці посудини, при якому почнеться виливання рідини назовні. Обертання посудини відбувається при $\omega = 18\text{ с}^{-1}$; початкова висота наповнення $h = 0,28\text{ м}$.

Відповідь. 39 см.

2.28. Посудина довжиною $L = 1,5\text{ м}$ і висотою $H = 0,6\text{ м}$ (рис.29) переміщується рівноприскладшено (прискладшення $a = 0,5\text{ м/с}^2$).

До якої висоти h можна заповнити цю посудину, щоб уникнути виливання рідини під час руху?

Відповідь: $h = 0,54\text{ м}$.

2.29. Посудина, наповнена водою, переміщується рівноприскладшено (прискладшення $a = 0,7\text{ м/с}^2$) у напрямку стрілки (рис.30) по поверхні, нахилений під кутом $\alpha = 25^\circ$.

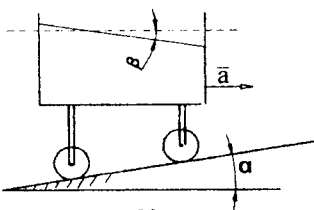


рис. 30

Визначте, який похил матиме вільна поверхня води в посудині.

Відповідь: $\beta = 3^\circ 35'$.

2.30. Посудина, наповнена початково водою до половини своєї висоти H , рухається рівноприскладшено по горизонтальній поверхні. Довжина посудини

$L = 1,5\text{ м}$; прискладшення $a = 0,6\text{ м/с}^2$; $h = 0,6\text{ м}$. Обчисліть тиск у точці C (рис. 31), прийнявши величину атмосферного тиску $p_{\text{атм}} = 1,01 \cdot 10^5\text{ Па}$.

Відповідь: 103,34 кПа.

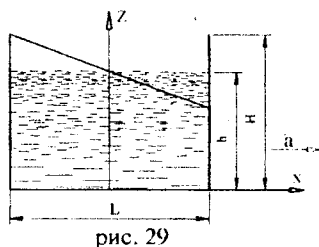


рис. 29

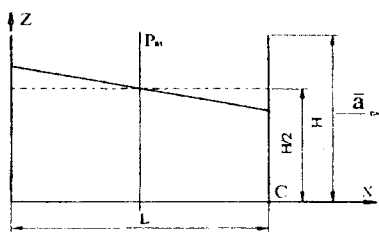


рис. 31

СИЛА ТИСКУ РІДИНИ НА ПЛОСКІ ТА КРИВОЛІНІЙНІ ПОВЕРХНІ

3.1. Основні теоретичні положення

Сила сумарного тиску рідини P на плоску стінку дорівнює добуткові змоченої площі стінки ω і гідростатичного тиску в центрі ваги цієї площі p_c , тобто

$$P = p_c \omega \quad (3.1.)$$

або

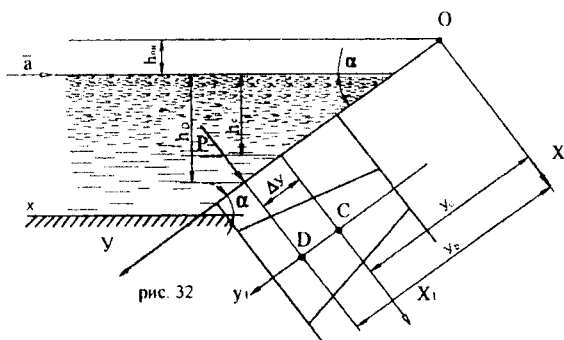
$$P = \rho g h_c \omega, \quad (3.2.)$$

де h_c – відстань по вертикалі від центра ваги площі ω до п'єзометричної площини; при надлишковому тиску на вільній поверхні ця площина проходить над вільною поверхнею рідини на відстані $H_{он} = p_{он} / (\rho g)$, при вакуумі – під вільною поверхнею на відстані. Якщо $p_{он} = 0$, то п'єзометрична площина співпадає з вільною поверхнею, і навантаження на стінку створюється тільки ваговим тиском.

Центр тиску (точка прикладення рівнодійної сил тиску) для негоризонтальних стінок при $p > p_{ат}$ і $p = p_{ат}$ завжди лежить нижче центра ваги. Положення центра тиску в площині стінки визначається формулами:

$$y_b = y_c + \frac{J_c}{y_c \omega}; \quad (3.3.)$$

$$\Delta y = y_b - y_c = \frac{J_c}{y_c \omega}; \quad (3.4.)$$



де y_D, y_C - відстані від центра тиску D і центра ваги C площі стінки до лінії перетину цієї площі з п'єзометричною площиною (рис.32); Δy - зміщення центра тиску вздовж осі y ; J_c - момент

інерції площі стінки відносно осі x_I , що проходить через центр ваги площі стінки.

Якщо вісь x_I або перпендикулярна до неї вісь y_I є осями симетрії стінки, центр тиску лежить на осі y_I . Якщо ж осі x_I і y_I не є осями симетрії, то крім зміщення Δy потрібно визначити і зміщення Δx

$$\Delta x = \frac{J_{y_I}}{y_C \omega}, \quad (3.5.)$$

де J_{y_I} - відцентровий момент інерції площі стінки відносно осей x_I і y_I .

При вираженні формули (3.3.) через вертикальні відстані вона приймає вигляд

$$h_D = h_C + \frac{J_c}{h_C \omega} \sin^2 \alpha, \quad (3.6.)$$

де α - кут нахилу стінки. При $\alpha = 90^\circ$

$$h_D = h_C + \frac{J_c}{h_C \omega} \quad (3.7.)$$

Для горизонтальної стінки $h_D = h_C$.

У додатку 2 наведені моменти інерції площ деяких плоских симетричних фігур.

Отримані залежності справедливі для будь-якої величини надлишкового тиску p , в тому числі і при від'ємному його значенні, тобто вакуумі.

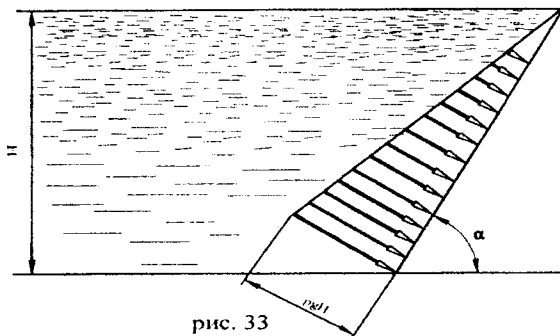


рис. 33

При двосторонній дії рідини на плоску стінку треба спочатку визначити сили тиску на кожну сторону стінки, а відтак знайти їх вислідну за правилами сумування паралельних сил.

Силу P можна знаходити геометрично, визначаючи її як об'єм епюри тиску. Наприклад, для випадку, показаного на (рис. 33), при ширині стінки b цей об'єм (тобто сила P) дорівнюватиме об'єму нахиленої під кутом α трикутної призми з основою $\rho g H$ і висотою H :

$$P = \frac{\rho g H^3 b}{2 \sin \alpha} \quad (3.8.)$$

Для вертикальної стінки

$$P = \frac{\rho g H^3 b}{2} \quad (3.9.)$$

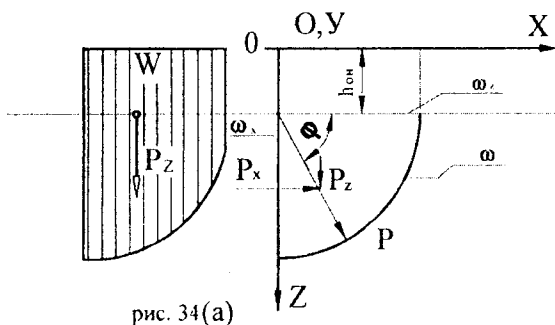


рис. 34(a)

При наявності криволінійних стінок, симетричних відносно вертикальної площини (що найчастіше зустрічається), величина і напрям рівнодійної сили P визначається за двома складовими — горизонтальною P_x

і вертикальною P_z (рис. 34 a).

При цьому
$$P_x = \rho g h_c \omega_x, \quad (3.10.)$$

де h_{α} – відстань по вертикалі від центра ваги вертикальної проекції стінки ω_{α} (перпендикулярної до осі x) до п'єзометричної площини 0–0 (рис. 34а).

Лінія дії сили P_i , проходячи через центр тиску вертикальної проекції стінки, лежить у площині симетрії і зміщена відносно центра ваги на відстань, що визначається формулою (3.3.), де J_c – момент інерції площі вертикальної проекції відносно горизонтальної осі, що проходить через центр ваги проекції $\omega = \omega_{\alpha}$.

Вертикальна складова сили тиску, дорівнює вазі рідини в об'ємі W , обмеженому стінкою, п'єзометричною площиною і горизонтальною проекцією стінки ω_i (перпендикулярної до осі z):

$$P_i = \rho g W \quad (3.11.)$$

Сила ця проходить через центр ваги об'єму W (так званого тіла тиску) і спрямована вниз, якщо об'єм будується зі змоченої сторони стінки; якщо об'єм будується з незмоченої сторони, то сила P_i спрямована вгору (рис. 34б).

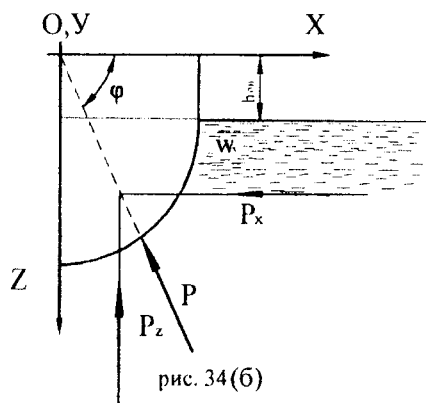
Повна сила тиску

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_i^2} \quad (3.12.)$$

Лінія дії сили P проходить через точку перетину ліній дії сил P_x і P_i .

Кут нахилу рівнодійної до горизонту знаходиться з формули

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{P_i}{P_x} \quad (3.13.)$$



Для стінок з осью симетрії повна сила тиску проходить через центр або вісь кривини стінки.

При двосторонній дії рідин на стінку спочатку визначаються горизонтальні і вертикальні складові з кожної сторони стінки в припущенні односторонньої дії рідини, а відтак – сумарні

горизонтальна і вертикальна складові від дії обох рідин.

3.2 Приклади розв'язання задач

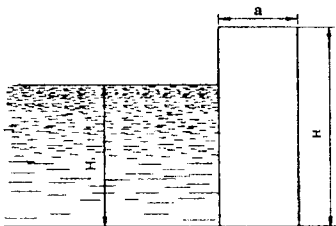


рис. 35

Приклад 3.1. Визначити потрібну ширину a бетонної стінки (рис.35) на яку діє напір води $H_l = 5$ м, виходячи з умови її стійкості на перекидання. Коефіцієнт стійкості

$$k = \frac{M_y}{M_n} = 1,5,$$

де M_y – утримувальний момент;

M_n – перекидальний момент. Довжина

стінки $l = 1$ м; питома маса бетону $\rho_b = 2200 \text{ кг/м}^3$; висота стінки $H = H_l$; ковзанням стінки знехтувати.

Розв'язання. Перекидальний момент

$$M_n = P(H - h_p),$$

а утримувальний момент

$$M_y = G \frac{a}{2},$$

де $P = \rho g \frac{H}{2} Hl$ – сила тиску; $h_p = \frac{2}{3} H$ – глибина занурення центра тиску; ρ – питома маса води; $G = \rho_b g a l H$ – вага стінки.

Отже,

$$M_n = \rho g \frac{H^2}{2} l (H - \frac{2}{3} h) = \frac{1}{6} \rho g H^3 l,$$

$$а \quad M_y = \rho_b g \frac{a^2 l H}{2}.$$

$$\text{Тоді} \quad k = \frac{M_y}{M_n} = \frac{3\rho_b a^2}{\rho H^2} = 1,5,$$

$$a = \sqrt{\frac{l}{2} \frac{\rho}{\rho_6} H} = \sqrt{0,5 \frac{1000}{2200} 5} = 2,38 \text{ м.}$$

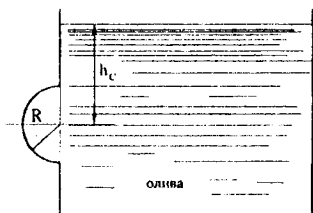


рис. 36

Приклад 3.2. Круглий отвір у вертикальній стінці відкритого резервуару з водою перекрито сферичною кришкою (рис. 36) діаметром $d = 1$ м. Глибина занурення центра ваги кришки $h_c = 2$ м. Визначити силу тиску на кришку і напрямок її дії відносно горизонту.

Розв'язання. Горизонтальну компоненту P_x знаходимо за формулою (3.10.):

$$P_x = \rho g h_c \pi d^2 / 4 = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 1^2 / 4 = 15401,7 \text{ Н} \approx 15,4 \text{ кН.}$$

Вертикальна компонента

$$P_z = \rho g W = \rho g \pi d^3 / 12 = 1000 \cdot 9,81 \cdot 3,14 \cdot 1^3 / 12 = 2567 \text{ Н} \approx 2,57 \text{ кН.}$$

Повна силу тиску

$$P = \sqrt{P_x^2 + P_z^2} = \sqrt{15,4^2 + 2,57^2} = 15,6 \text{ кН.}$$

Кут нахилу сили до горизонту

$$\beta = \arctg \frac{P_x}{P_z} = \arctg \frac{2,57}{15,4} \approx 9^\circ 28'.$$

3.3 Задачі для самостійного розв'язання

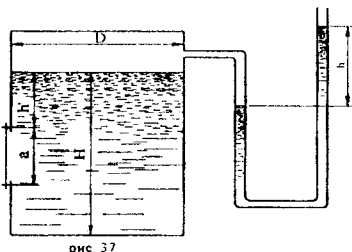


рис. 37

3.1. Резервуар діаметром $D = 2,8$ м заповнений водою на висоту $H = 3$ м. Підключений до резервуара рідинний ртутний манометр показує тиск над дзеркалом води, який відповідає висоті стовпика ртуті $h = 1,1$ м (рис. 37). Обчисліть силу тиску води на дно та пластину, що перекриває квадратний отвір розміром

$0,4 \times 0,4$ м, верхня частина якого занурена на глибину $h' = 0,7$ м під рівень води.

Відповідь: $P_1 = 1,084$ МН; $P_2 = 24,89$ кН.

3.2. Обчисліть силу тиску води на кришку, що перекриває круглий отвір діаметром $d = 0,9$ м у стінці резервуара (рис. 38). Кришка розміщена на глибині $h = 1,6$ м під рівнем води. Робоча рідина в манометрі – олива питомої маси $\rho = 880$ кг/м³, висота підняття її в трубі манометра $h' = 1,2$ м. Знайдіть також положення центра тиску.

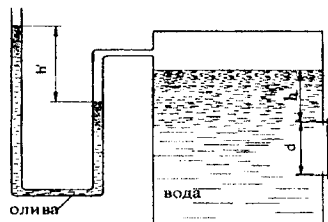


рис. 38

Відповідь: $P = 17,81$ кН, $h_D = 1,82$ м.

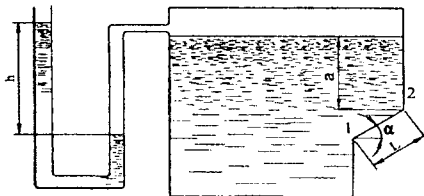


рис. 39

3.3. Обчисліть силу тиску води на частину 1-2 плоскої стінки (рис. 39) шириною $L = 1,2$ м і довжиною $l = 1,6$ м. Стінка нахилена під кутом $\alpha = 30^\circ$, а її верхнє ребро знаходиться на глибині $a = 0,9$ м під рівнем води. Рідинний манометр, заповнений водою, показує висоту стовпчика

$h = 250$ мм. Побудуйте також епюру тиску на елементі 1-2.

Відповідь: $P = 29,19$ кН.

3.4. Визначте зусилля T , необхідне для піднімання круглої кришки діаметром $d = 0,5$ м з метою випуску води через отвір у нахиленій стінці під кутом $\alpha = 60^\circ$ (рис. 40). Кришка вагою $G = 200$ Н може повертатися на верхньому шарнірі O . Відстань від

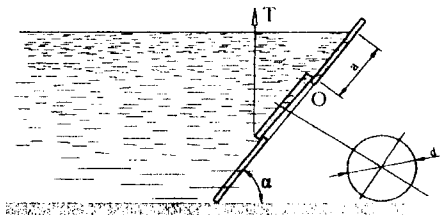


рис. 40

поверхні води до шарніра вздовж стінки $a = 1$ м.

Відповідь. $T = 2,29$ кН.

3.5. Перевірте стійкість бетонної стінки довжиною $L = 8$ м і товщиною $a = 3$ м на перекидання та ковзання, прийнявши коефіцієнт тертя бетону об ґрунт $f_r = 0,3$. Висота стінки $H = 10,5$ м, а глибина води перед нею $H_1 = 10$ м (рис. 41). Питома масу бетону прийняти $\rho_b = 2350$ кг/м³.

Вказівка. Стійкість на перекидання характеризується відношенням моменту утримувального M_y до перекидального моменту M_n .

Відповідь: $M_y / M_n = 1,2$; $G/P = 1,48$.

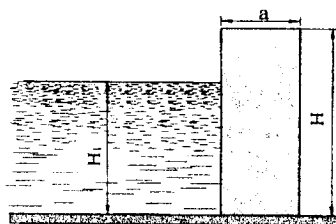


рис. 41

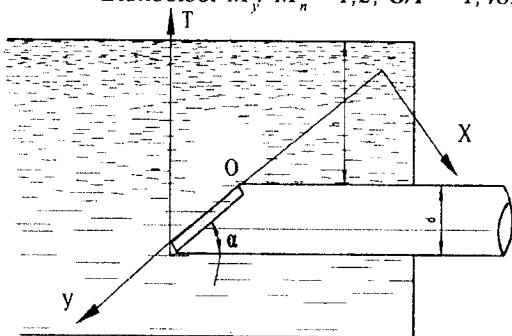


рис. 42

3.6. У вертикальній стінці резервуара з водою на глибині $h = 0,4$ м приварена кругла труба діаметром $d = 0,6$ м (рис. 42). Кінець труби, що входить в резервуар, зрізаний під кутом $\alpha = 45^\circ$ і закривається кришкою, яка може повертатися на верхньому шарнірі O. Обчисліть зусилля T , потрібне для відкриття кришки, нехтуючи

її вагою і тертям у шарнірі.

Відповідь: $T = 21,44$ кН.

3.7. Обчисліть рівнодійну сил тиску на водороздільну стінку, нахилenu під кутом $\alpha = 45^\circ$, шириною $b = 1$ м, а також визначте точку прикладення рівнодійної, якщо глибина $H_1 = 4,5$ м, $H_2 = 2,5$ м (рис. 43).

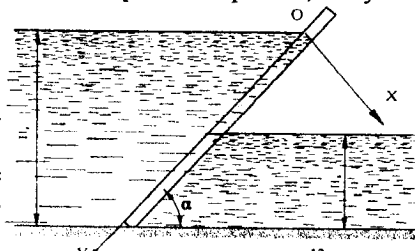


рис. 43

Відповідь: $P = 97,11$ кН; $y_D = 3,82$ м.

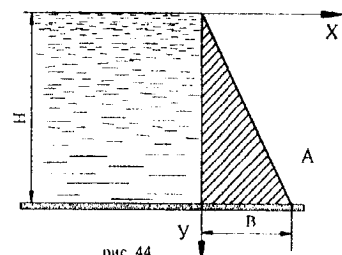
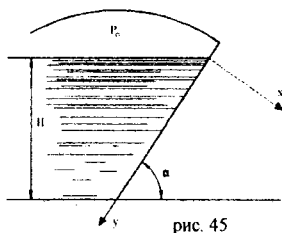


рис. 44

3.8. Якою має бути довжина B основи бетонної стінки греблі трикутного профілю (рис. 44) з умови її стійкості на перекидання. Висота греблі $H = 5$ м, а ширина $b = 1$ м, питома маса бетону $\rho_b = 2200$ кг/м³. Коефіцієнт стійкості на перекидання $k = M_y / M_n = 1,5$, де M_y – момент утримувальний; M_n – момент перекидальний.

Протитиск знизу не враховуйте.



Відповідь: $B = 2,92 \text{ м}$.

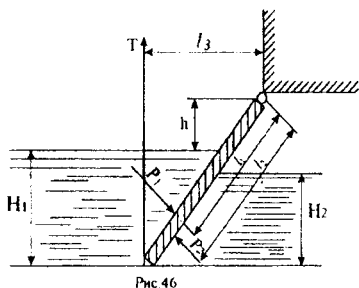
3.9. На нахилену під кутом $\alpha = 60^\circ$ стінку шириною $b = 2 \text{ м}$ (рис. 45) діє сила тиску води, глибина якої $H = 1,8 \text{ м}$. Над поверхнею рідини тиск $p_0 = 49,05 \text{ кПа}$. Чому дорівнюватиме сила тиску і де вона прикладена? Як зміниться результат, якщо над поверхнею рідини діятиме вакуумметричний тиск такої ж величини?

Відповідь: $P_1 = 240,61 \text{ кН}$; $P_2 = -167,2 \text{ кН}$; $y_{D1} = 1,09 \text{ м}$; $y_{D2} = 0,96 \text{ м}$.

3.10. Використовуючи умови задачі 3.9., обчисліть силу тиску води і визначте положення центра тиску, якщо на поверхні рідини діє атмосферний тиск.

Відповідь: $P = 36,7 \text{ кН}$; $y_D = 1,39 \text{ м}$
($h_D = 1,2 \text{ м}$).

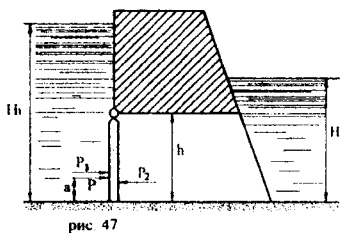
3.11. Щит, що перекриває канал, нахилений під кутом $\alpha = 45^\circ$ і закріплений шарнірно над високим рівнем води $h = 1 \text{ м}$ (рис. 46). Обчисліть зусилля T , потрібне для відкривання щита, якщо його ширина $b = 2 \text{ м}$, глибина води перед щитом $H_1 = 2,5 \text{ м}$, а після щита $H_2 = 1,5 \text{ м}$. Тертя у шарнірі і вагою щита знехтуйте.



Відповідь: $T = 55,58 \text{ кН}$.

3.12. Обчисліть силу тиску води на засув водовипуску висотою $h = 1,5 \text{ м}$, шириною $b = 5 \text{ м}$, а також знайдіть положення центра тиску. Глибина води перед греблею $H_1 = 4 \text{ м}$, а після неї $H_2 = 2 \text{ м}$ (рис.47).

Відповідь: $P = 147,15 \text{ кН}$; $a = 0,75 \text{ м}$.

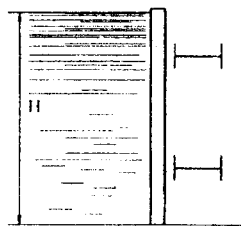


3.13. Вертикальний засув, що підтримується

двома горизонтальними ригелями (двотавровими балками), перегороджує прямокутний канал (рис. 48). Знайдіть положення ригелів при умові, щоби на кожний з них діяла однакова сила. Глибина води $H = 2,8 \text{ м}$. Розрахунок виконати на одиницю ширини засуву.

Відповідь: $P = 1,32$ і $2,41 \text{ м}$ від поверхні води.

3.14. Прямокутний щит, закріплений шарнірно в точці 0, перекриває водовипуск висотою $h = 1 \text{ м}$ і шириною $b = 1,5 \text{ м}$ (рис.49). Обчисліть зусилля T для



відкривання щита під кутом $\alpha = 45^\circ$. Напір $H = 3$ м.

Відповідь: $T = 27,75$ кН.

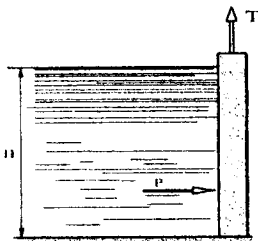


рис. 50

3.16. Обчисліть величину сили тиску води на секторний засуві кутом β , що визначає напрям її дії, при таких даних: $H = 3$ м; $\alpha = 45^\circ$. Ширина засуву $b = 1,5$ м (рис. 51).

Відповідь: $P = 68,4$ кН; $\beta = 14,5^\circ$.

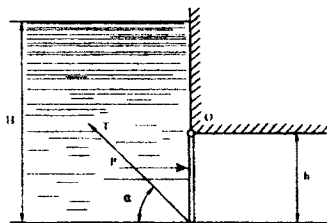


рис. 49

3.17. Чому дорівнюватиме сила тиску на

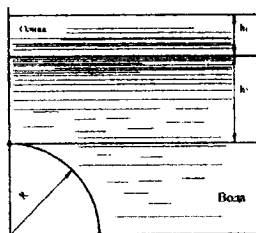


рис. 52

частину стінки АВ у формі чверті циліндра радіусом $R = 0,8$ м і довжиною $L = 2$ м. Товщина шару оливи, питомої маси $\rho = 920$ кг/м³ дорівнює $h_1 = 1,2$ м (рис. 52); $h_2 = 0,5$ м.

Відповідь: $P = 42,03$ кН.

3.18. Обчисліть силу тиску оливи на кришку у формі півциліндра радіусом $R = 1$ м і довжиною $L = 1,6$ м (рис. 53). Глибина занурення центра ваги кришки $h_c = 3$ м. Питома маса оливи $\rho = 900$ кг/м³.

Відповідь: $87,61$ кН.

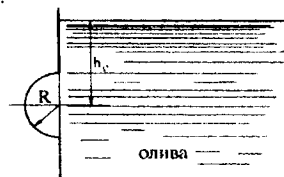


рис. 53

3.19. Визначте силу тиску води на криволінійну поверхню у формі півциліндра радіусом $R = 0,4$ м і довжиною $L = 2$ м (рис. 54). Глибина занурення центра ваги цієї поверхні зліва $h_1 = 3$ м, справа $h_2 = 2$ м.

Відповідь: $P = 15,7$ кН.

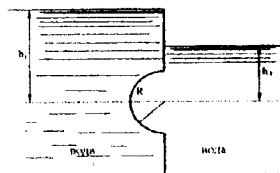


рис. 54

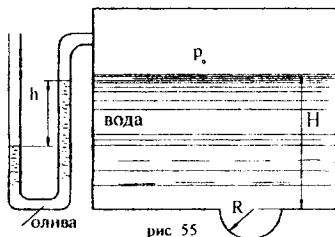


рис. 55

3.20. Яка сила тиску води діятиме на елемент у формі півциліндра радіусом $R = 0,65$ м, якщо глибина води у резервуарі $H = 1,8$ м. Рідинний вукуумметр, заповнений оливою ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$), показує висоту підняття стовпця оливи $h = 800$ мм (рис.55).

Відповідь: $P = P_z = 0,28 \text{ кН}$.

3.21. Обчисліть силу тиску води на елемент АВ у формі

чверті циліндра радіусом $0,7$ м і довжиною $L = 1,4$ м (рис.56). Глибини занурення під рівень води точки А дорівнюють: зліва $h_1 = 2,1$ м, справа $h_2 = 1$ м. До закритого резервуара підключено рідинний манометр, заповнений оливою питомої маси $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, висота підняття якого в трубці $h = 900$ мм.

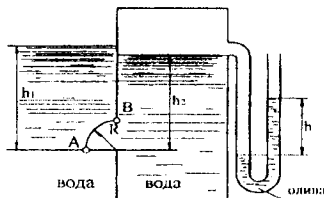


рис. 56

Відповідь: $P = 3,93 \text{ кН}$ і діє з боку відкритого резервуара.

3.22. Упоперек водоймища укладено горизонтально сталеву трубу радіуса 450 мм і довжиною 10 м. Обчисліть складові сили тиску - горизонтальну P_x і вертикальну P_z , що діють на поверхні циліндра (рис.57).

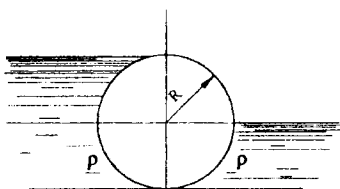


рис. 57

Відповідь: $P_x = 9,8 \text{ кН}$; $P_z = 46,8 \text{ кН}$.

3.23. Для криволінійної поверхні, на яку діє справа тиск води

(рис. 58), обчисліть силу тиску і знайдіть положення центра тиску, якщо крива АВ дорівнює чверті периметра кола радіусом $R = 1,5$ м. Довжина поверхні у напрямі перпендикулярному до рисунку $L = 3$ м.

Відповідь: $P = 61,63 \text{ кН}$; лінія дії проходить під кутом $\alpha = 32^\circ 30'$ до горизонту.

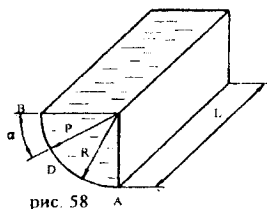


рис. 58

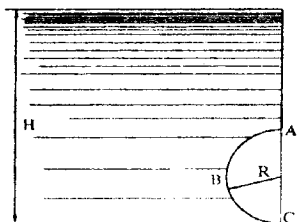


рис. 59

3.24. На стінку підводного транспортного тунелю радіусом $R = 5$ м і глибиною занурення $H = 20$ м діє тиск води. Обчисліть надлишковий тиск у характерних точках А, В і С (рис. 59), обмежившись лівою половиною тунелю, оскільки розподіл тиску по

правій частині аналогічний. Яка буде сумарна сила тиску на тунель?

Відповідь: $p_A = 98,1 \text{ кПа}$; $p_B = 147,15 \text{ кПа}$; $p_C = 196,2 \text{ кПа}$; $P = 770,09 \text{ кН}$.

3.25. Обчисліть силу тиску на стінку ABCDE (рис.60). Відомо, що $a = 1 \text{ м}$; $b = 1,5 \text{ м}$; $R = 0,8 \text{ м}$. Питома маса рідини $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$. Довжина стінки у напрямі перпендикулярному до рисунку $L = 2 \text{ м}$.

Відповідь: $P = 87,37 \text{ кН}$.

3.26. Секторний засув, поперечний переріз якого показаний

на (рис. 61), розділює два водоймища, різниця рівнів води у яких $H = 2 \text{ м}$. Обчисліть силу тиску на засув та визначте положення вектора сили тиску при таких даних: $R = 1,5 \text{ м}$; $\alpha = 45^\circ$; довжина сектора $L = 10 \text{ м}$.

Відповідь: $P = 225,23 \text{ кН}$; $\beta = 22,5^\circ$.

3.27. Секторний засув масою 3 Ті радіусом $R = 5 \text{ м}$ підтримує напір води $H = 3,5 \text{ м}$. Для пропуску води засув піднімається ланцюгом,

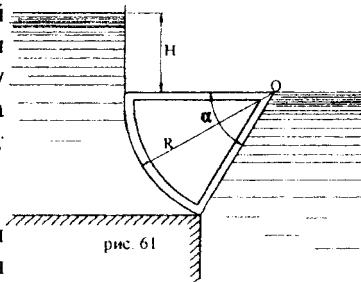


рис. 61

повертаючись довкруги горизонтальної осі на цапгах (рис. 62). Центр ваги затвору розміщений на бісектрисі кута сегмента ($R = 0,75 \text{ м}$). При закритому, засуві вісь його обертання і верхній обріз сектора лежать в одній горизонтальній площині на віддалі від вільної поверхні $h = 1 \text{ м}$. Обчисліть силу, що навантажує вальницю засуву і силу, яка його притискає.

Відповідь: $P = 363,4 \text{ кН}$; $N = 42,9 \text{ кН}$.

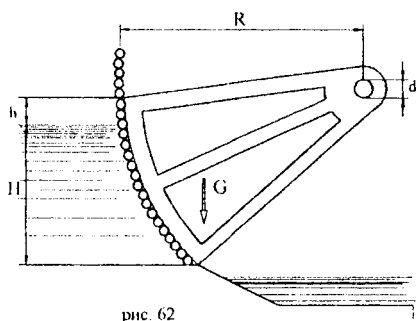


рис. 62

3.28. Чавунна півкуля вагою 200 Н і діаметром 200 мм прилягає щільно до дна резервуара, заповненого рідиною на висоту $H = 2 \text{ м}$ (рис.63). Яка сила потрібна для підняття цієї півкулі, якщо питома маса рідини $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$?

Відповідь: $P = 1115 \text{ Н}$.

3.29. Обчисліть горизонтальну і вертикальну складові сили тиску, діючих на стінку перерізу ABCD (рис.64). Довжина стінки в напрямі перпендикулярному до рисунку $L = 3 \text{ м}$. На рідину

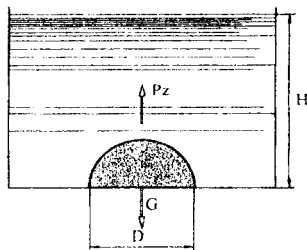


рис. 63

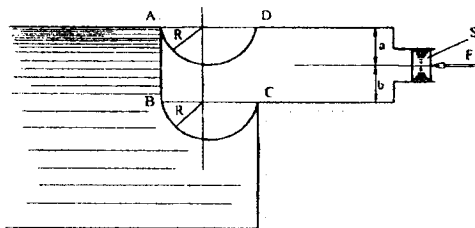


рис. 64

п'єзометрі, підключеному до півкулі піднявся на висоту $h = 1,6$ м (рис.65). Яка буде величина вертикальної сили, що діє на внутрішню поверхню півкулі?

Відповідь: 16,2 кН.

через толлок площею $S = 0,0075 \text{ м}^2$ діє сила $F = 150 \text{ Н}$. Розміри $a = 0,6 \text{ м}$; $b = 0,4 \text{ м}$. Рідина – олива ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$) $R = 0,5 \text{ м}$.

Відповідь: $P_x = 33,5 \text{ кН}$;

$P_z = 10,4 \text{ кН}$.

3.30. Півкуля діаметром 1,5 м й заповнена рідиною, питома маса якої $\rho = 850 \text{ кг/м}^3$. Рівень рідини у

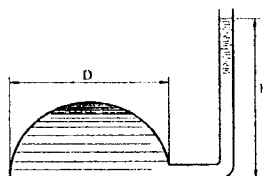


рис. 65

ЗАКОН АРХІМЕДА ТА ЕЛЕМЕНТИ ТЕОРІЇ ПЛАВУЧОСТІ ТА ОСТІЙНОСТІ

4.1. Основні теоретичні положення

За законом *Архімеда* на тіло, занурене в рідину, діє виштовхувальна (архімедова) сила, спрямована вгору

$$P_i = \rho g W, \quad (4.1.)$$

де W – об'єм зануреної частини тіла,

Сила P_i проходить через центр ваги витісненого об'єму рідини (центр водотоннажності). При нахилі (крені) плаваючого тіла центр водотоннажності змінює своє положення. При рівновазі плаваючого тіла його центр ваги і центр водотоннажності знаходяться на спільній вертикалі – осі плавання.

Для стійкої рівноваги тіла, що плаває в зануреному стані (підводне плавання), необхідно, щоби центр ваги тіла був нижче центра водотоннажності.

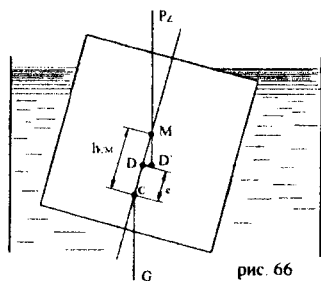


рис. 66

При надводному плаванні ця умова необов'язкова. Стійка рівновага (так звана *остійність*) вимагає, щоби при крені тіла точка M перетину лінії дії архімедової сили з віссю плавання

(метацентр) лежала вище центра ваги тіла C (рис. 66), тобто, щоби метацентрична висота h_{cm} була додатна. Це можна записати умовою

$$h_{cm} = \frac{J}{W} - e, \quad (4.2.)$$

де J – найменший момент інерції площини плавання відносно

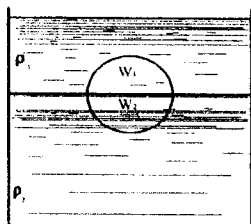


рис. 67

горизонтальної осі коливання; e - відстань між центрами ваги й водотоннажності.

Якщо тіло занурене у двох рідинах різної питомої маси (рис.67), які не змішуються, і частина об'єму W_1 знаходиться в рідині з питомою масою ρ_1 , а частина W_2 - у рідині з питомою масою ρ_2 то

$$P_i = g(\rho_1 W_1 + \rho_2 W_2). \quad (4.3.)$$

При наявності трьох різних рідин відповідно матимемо

$$P_i = g(\rho_1 W_1 + \rho_2 W_2 + \rho_3 W_3). \quad (4.4.)$$

і т.д.

4.2. Приклади розв'язку задач

Приклад 4.1. Корона масою 14,7 кг має під водою вагу, що відповідає масі 13,4 кг. Визначте, чи корона золота.

Розв'язання. Вага тіла, зануреного у воду

$$G_p = G - P_i,$$

де $G = \rho_r g W$ - вага тіла; P_i - архімедова сила. Отже,

$$G_p = g(\rho_r W - \rho_p W).$$

де ρ_p - питома маса води.

Тоді

$$\frac{G}{G - G_p} = \frac{\rho_r W}{\rho_p W} = \frac{\rho_r}{\rho_p} = \frac{14,7}{14,7 - 13,4} = 11,3.$$

Питома маса матеріалу корони

$$\rho_r = 11,3 \rho_p = 11,3 \cdot 1000 = 11300 \text{ кг/м}^3.$$

Така питома маса відповідає свинцю, а не золоту (питома маса золота $\rho_r = 19300 \text{ кг/м}^3$).

Приклад 4.2. Нафтоналивне судно прямокутного перерізу з плоским дном шириною 20 м і довжиною 100 м повністю завантажене дає осадку 2,5 м. Без вантажу осадка судна 0,4 м. Визначте вагу нафти, яку перевозить судно.

Розв'язання. Приймаючи, що питома маса морської води $\rho = 1020 \text{ кг/м}^3$, обчислимо вагу витісненої води $\rho g V = 1020 \cdot 9,81 \cdot 100 \cdot 20 \cdot 2,5 = 50,031 \cdot 10^6 = 50,031 \text{ МН}$
 Вага порожнього судна $G = 1020 \cdot 100 \cdot 20 \cdot 0,4 \cdot 9,81 = 8,005 \text{ МН}$
 Отже, вага нафти $G = 50,031 - 8,005 = 42,025 \text{ МН}$

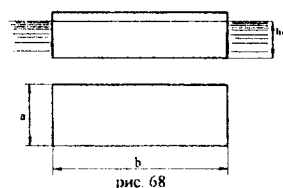
4.3. Задачі для самостійного розв'язку.

4.1. Соснова балка форми паралелепіпеда шириною $b = 0,4 \text{ м}$, висотою $h = 0,2$ і довжиною $L = 2 \text{ м}$ плаває у воді. Визначте глибину занурення балки, якщо питома маса соснового дерева $\rho = 750 \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: 15 см.

4.2. Якою повинна бути товщина бетонної плити фундаменту при середньому напорі ґрунтових вод $h_z = 0,74 \text{ м}$? Питома маса бетону $\rho_b = 2250 \text{ кг/м}^3$. Обчислення виконати по відношенню до 1 м^2 поверхні плити.

Відповідь: 592 мм.

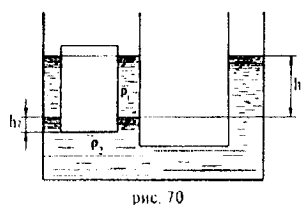
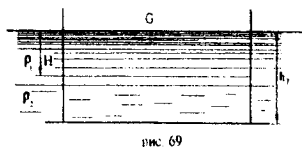


4.3. Порожня баржа (рис.68) плаває з зануренням на глибину $h_1 = 0,5 \text{ м}$, Який максимальний вантаж G вона може перевезти, при глибині занурення $h_2 = 0,8 \text{ м}$?

Розміри баржі: $a = 5 \text{ м}$; $b = 8 \text{ м}$; $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: $G = 117,7 \text{ кН}$.

4.4. Порожня баржа плаває в рідині питомої маси $\rho_1 = 900 \text{ кг/м}^3$ з зануренням $h_1 = 0,5 \text{ м}$. На глибині $H = 0,7 \text{ м}$ від поверхні знаходиться друга рідина (вода) питомої маси $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$ (рис.69). При навантаженні баржа занурюється в другу рідину. При якому значенні вантажа глибина занурення не перевищуватиме $h_2 = 1 \text{ м}$ від поверхні?



Розміри a, b взяти з попередньої задачі.

Відповідь: 188,4 кН.

4.5. У двокамерному відкритому резервуарі (рис.70), заповненому рідинами з $\rho_1 = 750 \text{ кг/м}^3$ і $\rho_2 = 1000 \text{ кг/м}^3$, знаходиться в зануреному стані циліндр діаметром 20 см. Висота зануреної частини циліндра в першій рідині $h_1 = 15 \text{ см}$, у

другий – $h_2 = 10$ см. Обчисліть величину архімедової сили, що діє на циліндр.

Відповідь: $P_z = 65,5$ кН.

4.6. У резервуарі, заповненому трьома рідинами ($\rho_1 = 750$ кг/м³; $\rho_2 = 850$ кг/м³; $\rho_3 = 1000$ кг/м³) плаває тіло у формі паралелепіпеда (рис.71), розміри якого $b \times H \times L = 40 \times 80 \times 120$ м.

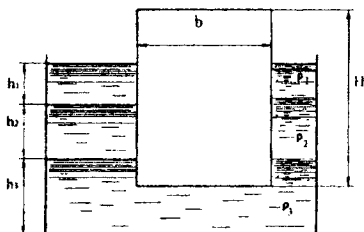


рис. 71

Яка виштовхувальна сила діятиме на тіло, якщо товщина верхнього шару рідини $h_1 = 15$ см, наступного шару – $h_2 = 10$ см і глибина занурення в нижній шар $h_3 = 15$ см?

Відповідь: $P_z = 166,8$ кН.

4.7. Тіло у формі паралелепіпеда розміром, як у попередній задачі, перекриває отвір у перегородці між камерами резервуара (рис. 72). По обидві сторони перегородки рідина однакова ($\rho = 1000$ кг/м³). Визначте виштовхувальну силу P_z при таких даних: $H = 1,5$; $h = 1$ м.

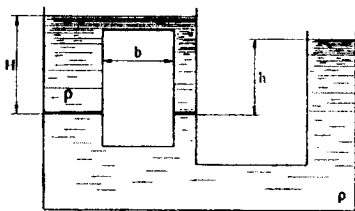


рис. 72

Відповідь: $P_z = 1,41$ кН.

4.8. Дерев'яний брус квадратного перерізу розміром $1,9 \times 1,9$ м, висотою H (рис.73), плаває у воді. Визначте найбільше значення висоти бруса $H_{\max}$, при якому плавання буде ще стійким. Питомі маса матеріалу бруса $\rho_b = 750$ кг/м³.

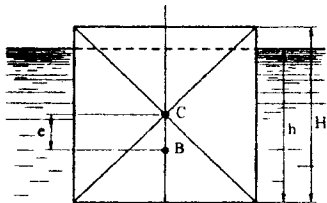


рис. 73

Відповідь: $H_{\max} = 1,79$ м.

4.9. Для перевезення через ріку вантажа $G = 16$ кН збудовано пліт з круглих дерев'яних колод діаметром $d = 0,3$ м кожна. Довжина колод $L = 5,5$ м, питома маса дерева $\rho_d = 730$ кг/м³. Яка мінімально необхідна кількість колод?

Відповідь: ≈ 16 колод.

4.10. У посудині плаває кусник льоду питомої маси $\rho_l = 900$ кг/м³, у якому знаходиться сталеві кулька питомої маси 7800 кг/м³. Об'єм льоду $W_l = 12$ дм³, об'єм кульки $W_2 = 50$ см³. Яка частина об'єму льоду буде над водою?

Відповідь: $W = 0,86$ дм³.

4.11. У посудині, заповненій водою і оливою ($\rho_1 = 900$ кг/м³), занурений кусень воску ($\rho_2 = 960$ кг/м³). Яка частина об'єму воску занурена у воду?

Відповідь: 60 % об'єму.

4.12. Об'єм частини айсберга, що знаходиться над поверхнею моря,

дорівнює $W_1 = 12,5 \text{ м}^3$. Обчисліть загальний об'єм айсберга і глибину його занурення, прийнявши в плані його форму прямокутною і рівною $3 \times 2 \text{ м}$. Питома маса морської води $\rho_1 = 1030 \text{ кг/м}^3$, льоду $\rho_2 = 920 \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: $W = 117 \text{ м}^3$; $h = 17,4 \text{ м}$.

4.13. Ареометр (прилад для визначення питомої маси рідин) у вигляді скляної трубки діаметром $d = 8 \text{ мм}$ має в нижній частині металічну кульку діаметром $d_k = 5 \text{ мм}$ і вагою $G = 6 \cdot 10^{-3} \text{ Н}$. Визначте питому масу рідини, якщо ареометр плаває у ній при зануренні на глибину $h = 1,5 \text{ см}$.

Відповідь: $746,8 \text{ кг/м}^3$.

4.14. Визначте потрібний об'єм заповнення світильним газом повітряної кулі, яка повинна підняти на рівні землі вантаж вагою $G = 10^4 \text{ Н}$ (питомі маси – повітря $1,23 \text{ кг/м}^3$, газу – $0,515 \text{ кг/м}^3$).

Відповідь: $W = 1426 \text{ м}^3$.

4.15. Береговий колодязь, суміщений з помповою станцією, має форму вертикального циліндра діаметром $d = 16 \text{ м}$ і висотою $H = 14,5 \text{ м}$. Колодязь заглиблений на 11 м . Найвищий рівень ґрунтових вод на 1 м нижче рівня землі. Вага колодязя з обладнанням $G = 35,5 \text{ МН}$, а сила тертя колодязя по ґрунту $T = 1,4 \text{ МН}$. Виявіть стійкість колодязя проти випливання.

Вказівка. Колодязь вважається стійким при умові, що утримуючі його сили перевищують підймальну силу в $1,25$ раз, тобто коефіцієнт випливання $k_g \geq 1,25$.

Відповідь: $k_g = 1,88$.

РЕЖИМИ РУХУ РІДИН І ГАЗІВ. ГІДРАВЛІЧНІ ОПОРИ

5.1. Основні теоретичні положення

Є два різних режими руху рідин і газів - ламінарний і турбулентний. При *ламінарному режимі* рідина рухається струминками або шарами без взаємного перемішування. При *турбулентному режимі*, навпаки, відбувається інтенсивне перемішування рідких частинок, які поряд з головним поздовжнім рухом здійснюють вельми складні і різноманітні рухи в поперечному напрямі.

Критерієм для визначення режиму руху є безрозмірне число *Рейнольдса*

$$Re = \frac{4RV}{\nu}, \quad (5.1.)$$

де R – гідравлічний радіус: $R = \omega/\chi$; ω – площа живого перерізу;
 χ – змочений периметр; V – середня швидкість руху;
 ν – кінематична в'язкість.

Для труб круглого перерізу діаметром d

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{V\phi}{\mu} = \frac{4Q}{\pi d\nu}, \quad (5.2.)$$

де Q - витрата рідини.

Для визначення режиму руху треба фактичне число *Рейнольдса* порівняти з критичним $Re_{кр}$, яке для круглих труб дорівнює 2300. Отже при $Re < 2300$ режим ламінарний, а при $Re > 2300$ – турбулентний.

Рух в'язкої рідини супроводжується втратами напору,

зумовленими гідравлічними опорами. Розрізняють втрати напору на тертя по довжині трубопроводу h_f , які в загальному залежать від довжини, розмірів поперечного перерізу трубопроводу, його шорсткості, в'язкості рідини, швидкості руху, і втрати напору місцеві h_m на окремих ділянках трубопроводів, де відбувається зміна швидкості як за величиною, так і за напрямом.

Втрати напору по довжині визначають за формулою *Дарсі-Вайсбаха*

$$h_f = \lambda \frac{l}{d} \cdot \frac{V^2}{2g}, \quad (5.3.)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі);
 l – довжина трубопроводу.

При ламінарному режимі

$$h_f = \frac{32\nu l V}{gd^2}. \quad (5.4.)$$

При турбулентному режимі λ залежить від числа Re і відносної шорсткості Δ_r/d (Δ_r – еквівалентна шорсткість) і визначається за напівемпіричними й емпіричними формулами.

У турбулентному режимі розрізняють три зони гідравлічних опорів: зону гідравлічно гладких труб (гладкостінного опору), перехідну (доквадратичну) і квадратичну (зону турбулентної автомобільності або зону гідравлічно шорстких труб).

Для зони гідравлічно гладких труб (при $2320 < Re < 10(d/\Delta_r)$) можна скористатися формулою *Конакова* або *Блязіюса*

$$\lambda = (1,8 \lg Re - 1,5)^{-2}, \quad (5.5.)$$

$$\lambda = \frac{0,3164}{Re^{0,25}}. \quad (5.6.)$$

Формула (5.6.) справедлива для чисел $Re < 10^5$.

У перехідній зоні $10 \frac{d}{\Delta_r} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_r}$ величина λ , обчислюється за

формулою Колбрука-Вайта

$$\frac{1}{\lambda} = -2 \lg \left(\frac{\Delta_c}{3,7d} + \frac{2,51}{Re\sqrt{\lambda}} \right), \quad (5.7.)$$

або за формулою Альтшуля

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_c}{d} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25}, \quad (5.8.)$$

яка для квадратичної зони опору перетворюється у формулу Шифрінсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_c}{d} \right)^{0,25}. \quad (5.9.)$$

Для цієї зони ($Re > 500 \frac{d}{\Delta_c}$) рекомендована також формула Прандтля-Нікурадзе

$$\lambda = \left(2 \lg \frac{d}{\Delta_c} + 1,14 \right)^{-2}. \quad (5.10.)$$

Середні значення еквівалентної шорсткості, яка фігурує у наведених формулах, показані в додатку 3.

Для труб некруглого перерізу всі ці формули залишаються справедливими при підстановці в них замість діаметра чотирьох гідравлічних радіусів, тобто $4R$. Так, наприклад, для перехідної зони

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_c}{4R} + \frac{68}{Re} \right)^{0,25},$$

де Re визначається за формулою (5.1.).

При ламінарному режимі руху втрати напору можна обчислювати також за формулою Гагена – Пуазейля

$$h_i = \frac{32 \nu l V}{g d^2} = \frac{128 \mu l Q}{\rho \pi g d^4}, \quad (5.11.)$$

а втрати тиску

$$\Delta p = \rho g h_i = \frac{32 \mu l V}{d^3} = \frac{128 \mu l Q}{\pi d^4}. \quad (5.12.)$$

Втрати напору в місцевих опорах визначаються за формулою *Вайсбаха*

$$h_m = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (5.13.)$$

де ζ – коефіцієнт місцевого опору.

У більшості випадків коефіцієнт визначають за довідковими даними (див. додаток 4), отриманими на основі дослідів. Цими даними можна користуватися за умов турбулентної автомодельності, тому що в даному разі коефіцієнт опору не залежить від Re . Оцінку величини ζ в перехідній зоні опору можна отримати за формулою *Альтшуля*

$$\zeta = \zeta_{\kappa\kappa} + \frac{A}{Re}, \quad (5.14.)$$

де $\zeta_{\kappa\kappa}$ – значення коефіцієнта місцевого опору в зоні турбулентної автомодельності (табличне); величина A визначається формою місцевого опору. Деякі значення A наведені в додатку 5.

При визначенні місцевих втрат напору при раптовому розширенні трубопроводу можна скористатися формулою *Борда*

$$h_{pp} = \frac{(V_1 - V_2)^2}{2g}, \quad (5.15.)$$

яка зводиться до формули (5.13.) при $\zeta = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)^2$;

V_1 і V_2 – середні швидкості у вузькому (вхідному) і широкому (вихідному) перерізах потоку; ω_1 і ω_2 – площі цих перерізів.

При раптовому звуженні

$$\zeta = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (5.16.)$$

$$\zeta = \left(\frac{1}{\varepsilon} - 1 \right)^2, \quad (5.16.)$$

де $\varepsilon = \omega_c / \omega_2$ – коефіцієнт стиснення струменя; ω_c – площа поперечного перерізу стисненого струменя; ω_2 – площа вузького (вихідного) перерізу потоку.

Коефіцієнт стиснення можна обчислити за формулою *Альтшуля*

$$\varepsilon = 0,57 + \frac{0,043}{1,1-n}. \quad (5.17.)$$

де n – ступінь стиснення: $n = \omega_2 / \omega_1$; ω_1 – площа поперечного (вхідного) перерізу потоку.

В усіх розглянутих випадках швидкісний напір у формулі Вайсбаха обчислюється по швидкості після місцевого опору.

5.2. Приклади розв'язку задач

Приклад 5.1. Обчисліть критичну швидкість, при якій настає перехід від ламінарного режиму до перехідної зони в трубі діаметром 3 см під час руху води і повітря при температурі 25°C та гліцерину при 20°C.

Розв'язання. При $t = 25^\circ\text{C}$ кінематична в'язкість води $\nu = 0,9 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, а повітря $\nu = 16,15 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Тоді з виразу $Re_{кр} = V_{кр} d / \nu$, де $Re_{кр}$ – критичне число Рейнольдса, $V_{кр} = Re_{кр} \nu / d$.

Прийнявши $Re_{кр} = 2300$, отримаємо для води

$$V_{кр} = \frac{0,9 \cdot 10^{-6}}{0,03} 2300 = 0,069 \text{ м/с} = 6,9 \text{ см/с};$$

для повітря $V_{кр} = \frac{16,15 \cdot 10^{-6}}{0,03} 2300 = 1,24 \text{ м/с}$. При 20°C для гліцерину

$$\nu = 4,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}, \text{ тоді } V_{кр} = \frac{4,1 \cdot 10^{-4}}{0,03} 2300 = 31,43 \text{ м/с}$$

Приклад 5.2. Олива, кінематична в'язкість якої 14 см²/с, протікає в трубці діаметром 25 мм. Визначте витрату, середню швидкість і

максимальну швидкість, якщо втрати напору на одиницю довжини трубки дорівнюють $0,5 \text{ м/м}$.

Розв'язання. Вважаючи режим ламінарним, використаємо формулу Гагена-Пуазейля (5.11):

$$Q = \frac{\pi g d^4 h_l}{128 \nu l} = \frac{3,14 \cdot 9,81 \cdot 0,025^4}{128 \cdot 0,0014} \cdot 0,5 = 0,0336 \cdot 10^4 \text{ м}^3/\text{с} = 33,6 \text{ см}^3/\text{с}.$$

Середня швидкість

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 33,6}{3,14 \cdot 2,5^2} = 6,85 \text{ см/с}.$$

Перевіримо, чи режим справді ламінарний, визначивши число Рейнольдса

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{6,85 \cdot 2,5}{14} = 1,22.$$

Отже, режим ламінарний і $u_{\text{max}} = 2V = 2 \cdot 6,85 = 13,7 \text{ см/с}$.

Приклад 5.3. Визначте гідравлічний коефіцієнт тертя під час руху води ($\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$) в новому чавунному трубопроводі діаметром 150 мм зі швидкістю 2 м/с .

Розв'язання. Число Рейнольдса

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{2 \cdot 0,15}{10^{-6}} = 300000.$$

Отже, режим руху турбулентний. Для визначення зони опору з додатка 3 беремо значення еквівалентної шорсткості, яке для нових чавунних труб $\Delta_c = 0,3 \text{ мм}$. Верхня межа другої перехідної зони

$$500 \frac{d}{\Delta_c} = 500 \frac{150}{0,3} = 250000. \text{ Оскільки, } Re > 500 \frac{d}{\Delta_c}, \text{ то використаємо}$$

формулу Шифрінсона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_c}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,3}{150} \right)^{0,25} = 0,0233.$$

За формулою Прандтля – Нікурадзе (5.10.)

$$\lambda = \frac{1}{(2 \lg(d\Delta_c) + 1,14)^2} = \frac{1}{(2 \lg(150/0,3) + 1,14)^2} = 0,0234.$$

Приклад 5.4. По трубопроводу діаметром 10 см і довжиною 500 м пропускають воду в кількості 10,5 л/с при різниці тисків 100 кПа і температурі 20°C. Обчисліть еквівалентну шорсткість трубопроводу.

Розв'язання. Швидкість

$$V = \frac{4Q}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,0105}{3,14 \cdot 0,1^2} = 1,34 \text{ м/с.}$$

Оскільки

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{1,34 \cdot 0,1}{10^{-6}} = 134000, \text{ то режим руху турбулентний.}$$

$$\text{Втрати напору } h_t = \frac{p_1 - p_2}{\rho g} = \frac{\Delta p_1}{\rho g} = \frac{100000}{1000 \cdot 9,81} = 10,2 \text{ м.}$$

Гідравлічний коефіцієнт тертя обчислюємо за формулою Дарсі-Вайсбаха:

$$h_t = \lambda \frac{l}{d} \frac{V^2}{2g},$$

звідки

$$\lambda = \frac{2gh_t d}{l V^2} = \frac{2 \cdot 9,81 \cdot 10,2 \cdot 0,1}{500 \cdot 1,34^2} = 0,0223.$$

Формула Альтшуля (5.8.) підходить для всіх трьох зон турбулентного режиму. З неї

$$\Delta_\epsilon = d \left[\left(\frac{\lambda}{0,11} \right)^{1/4} - \frac{68}{Re} \right] = 100 \left[\left(\frac{0,0223}{0,11} \right)^{1/4} - \frac{68}{134000} \right] \approx 0,12 \text{ мм.}$$

Приклад 5.5. Наприкінці мазутопроводу діаметром 0,15 м є засувка Лудло. Витрата рідини питомою масою 900 кг/м³ і в'язкістю 10^{-4} м²/с становить 40 л/с. Обчисліть коефіцієнт опору засувки при ступені її відкриття 0,75.

Розв'язання. Оскільки рідина в'язка, то спочатку визначимо число Рейнольдса:

$$Re = \frac{4Q}{\pi d \nu} = \frac{4 \cdot 0,04}{3,14 \cdot 0,15 \cdot 10^{-4}} = 3997.$$

При $Re < 10^4$ коефіцієнт опору визначається формулою (5.14.)

$$\zeta = \frac{A}{Re} + \zeta_{\kappa\kappa}$$

При ступені відкриття засувки 0,75 знаходимо з додатка 5 $\zeta_{\kappa\kappa} = 0,2$ і $A = 350$. Тоді

$$\zeta = \frac{350}{3997} + 0,2 = 0,303.$$

5.3. Задачі для самостійного розв'язку

5.1. У поверхневому конденсаторі парової турбіни сумарна витрата охолоджувача $Q = 8$ л/с проходить по 250 паралельних трубках, між якими рухається конденсована пара. Яким повинен бути максимальний діаметр трубок, щоби забезпечити турбулентний рух? Температура води 10°C , $Re_{кр} = 2300$.

Відповідь: $d_{\max} = 13,6$ мм.

5.2. Який буде режим руху нафти, кінематична в'язкість якої $\nu = 2,5$ см²/с, а витрата $Q = 6$ л/с? Рух відбувається під напором $H = 40$ м у трубопроводі довжиною 1 км. При якому мінімальному значенні кінематичної в'язкості рух залишиться ламінарним? Прийняти $Re = 2300$.

Вказівка. Використати формулу Гагена-Пуазейля і для числа Рейнольдса, що дозволить визначити критичний напір $H_{кр}$. При $H < H_{кр}$ – режим ламінарний.

Відповідь: $H_{кр} = 200$ м; режим ламінарний; $\nu_{\min} = 2,5$ см²/с.

5.3. Олива, температура якої 20°C ($\nu = 1,5 \cdot 10^{-4}$ см²/с), надходить від помпи в гідроциліндр по трубопроводу діаметром 22 мм в кількості 1,75 л/с. Яким буде режим руху? Яка температура відповідатиме зміні режимів? Залежність в'язкості оливи від температури показана на (рис. 74.)

Відповідь: режим ламінарний; $t = 43^\circ\text{C}$.

5.4. Горизонтальний відстійник для прояснення стічних вод, прямокутний у плані резервуар, має глибину $H = 2,5$ і ширину $b = 6$ м.

Визначте середню швидкість і режим руху стічної води при $t = 20^\circ\text{C}$, якщо витрата $Q = 80$ л/с. При якій швидкості у відстійнику буде ламінарний режим

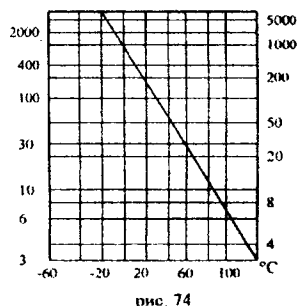


рис 74

руху?

Відповідь: $V = 5,3 \text{ мм/с}$; режим турбулентний; $V_{кр} = 0,43 \text{ мм/с}$.

5.5. У трубці діаметром 5 мм протікає вода з витратою $39,3 \text{ см}^3/\text{с}$ при температурі 20°C . Відносна шорсткість трубки $(\Delta_r/d) = 0,006$. Обчисліть втрати напору на одиницю довжини для трьох випадків: а) ламінарний режим; б) режим турбулентний в зоні гладкостінного опору; в) режим турбулентний в зоні гідравлічно шорстких труб.

Відповідь: а) 0,26 м; б) 1,29 м; в) 1,31 м.

5.6. Обчисліть витрату, середню і максимальну швидкість оливи, кінематична в'язкість якої $\nu = 14 \text{ см}^2/\text{с}$ і яка протікає в трубі діаметром 25 мм. Відомо, що втрати напору, віднесені до одиниці довжини, дорівнюють 0,5 м.

Відповідь: $Q = 33,6 \text{ см}^3/\text{с}$; $V = 6,65 \text{ см/с}$; $u_{max} = 13,7 \text{ см/с}$.

5.7. По горизонтальній трубці діаметром 5 мм і довжиною 3 м подається під тиском змащувальна рідина, динамічна в'язкість якої $\mu = 0,026 \text{ Па} \cdot \text{с}$. Обчисліть витрату, середню швидкість і швидкість по осі трубки, якщо перепад тиску $\Delta p = 3 \cdot 10^5 \text{ Па}$.

Відповідь: $Q = 59 \text{ см}^3/\text{с}$; $V = 3 \text{ см/с}$; $u_{max} = 6 \text{ см/с}$.

5.8. У трубопроводі діаметром 5 мм протікає олива, кінематична в'язкість якої $\nu = 1,6 \text{ см}^2/\text{с}$, а питома маса $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$. Витрата оливи $Q = 30 \text{ л/с}$. Перевірте, чи режим руху ламінарний. Обчисліть максимальну швидкість і перепад тиску на одиницю довжини трубопроводу.

Відповідь: $Re = 1592$, режим ламінарний; $u_{max} = 3,4 \text{ см/с}$; $\Delta p/l = 348 \text{ Па/м}$.

5.9. Олива, кінематична в'язкість якої $\nu = 0,4 \text{ см}^2/\text{с}$, а питома маса $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, протікає у похилій трубці діаметром 12 мм (рис.75). Визначте кут нахилу трубки відносно горизонтальної площини при умові, що тиск вздовж трубки не змінюється, а витрата $Q = 20 \text{ л/с}$.

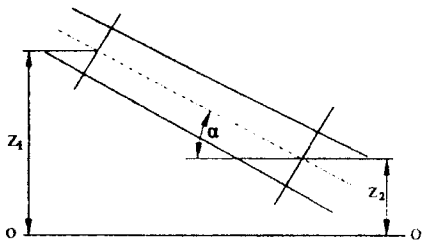


рис. 75

Відповідь: $\alpha = 2^\circ 33'$.

5.10. Обчисліть витрату, середню і максимальну швидкості мастила, кінематична в'язкість якого $\nu = 14 \text{ см}^2/\text{с}$, між двома паралельними пластинами. Втрати напору, віднесені до одиниці довжини, дорівнюють 0,5 м, а відстань між пластинами $2b = 2 \text{ мм}$ (рис.76).

Відповідь: $Q = 23,4 \cdot 10^{-3} \text{ см}^3/\text{с}$; $V = 0,117 \text{ см/с}$; $u_{max} = 0,175 \text{ см/с}$.

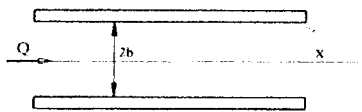


рис. 76

5.11. У стінці резервуара утворилася горизонтальна тріщина висотою $0,25 \text{ мм}$ і довжиною $l = 250 \text{ мм}$ по усій ширині стінки b , яка дорівнює 25 см (рис. 77). У резервуарі при температурі 20°C знаходиться вода, вільна поверхня якої розміщена над тріщиною на 25 см . Яка буде максимальна швидкість витікання води через тріщину та яка величина витіків?

Відповідь: $u_{\text{max}} = 7,66 \text{ см/с}$; $Q = 3,19 \text{ см}^3/\text{с}$.

5.12. Визначте коефіцієнт гідравлічного тертя при русі води в новому чавунному трубопроводі діаметром 200 мм при середній швидкості руху $V = 2 \text{ м/с}$; температура води 20°C .

Відповідь: $\lambda = 0,0216$.

5.13. Через трубопровід довжиною $l = 500 \text{ м}$ і діаметром $d = 100 \text{ мм}$ пропускають воду в кількості $10,5 \text{ л/с}$ під дією перепаду тиску $\Delta p = 75 \text{ кН/м}^2$. Визначте еквівалентну шорсткість трубопроводу. Який матеріал відповідає цій шорсткості?

Відповідь. $\Delta_\epsilon = 0,05 \text{ мм}$; труби сталеві зварні, нові.

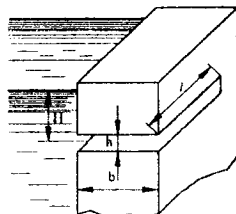


рис. 77

5.14. При подачі бензину ($\rho = 720 \text{ кг/м}^3$) по трубі довжиною $l = 6 \text{ м}$ і діаметром $d = 15 \text{ мм}$ перепад тиску дорівнює $\Delta p = 115 \text{ кН/м}^2$. Яка буде еквівалентна шорсткість труби, якщо витрата $Q = 1 \text{ л/с}$? Закон опору вважати квадратичним.

Відповідь: $\Delta_\epsilon = 0,037 \text{ мм}$.

5.15. Повітря при температурі 20°C і атмосферному тискові протікає зі швидкістю 10 м/с у сталевому трубопроводі діаметром 500 мм . Обчисліть втрати напору на довжині 100 м , виразивши результат у мм водяного стовпа. Еквівалентна шорсткість труби $\Delta_\epsilon = 0,2 \text{ мм}$.

Вказівка. В'язкість повітря визначається за формулою Сатерленда, де $\mu = K\sqrt{T/(1+c/T)}$, $K = 14,9 \cdot 10^{-7}$; $c = 120$; T – абсолютна температура; $p_{\text{ат}} = 101325 \text{ Па}$; газова стала $R = 287 \text{ Дж/кг} \cdot \text{К}$.

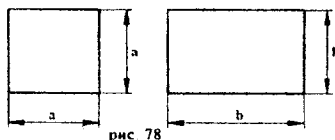
Відповідь: $h_f = 21 \text{ мм}$.

5.16. У трубопроводі діаметром 125 мм і довжиною 1 км протікає вода з витратою $Q = 12 \text{ л/с}$ при температурі 20°C . Обчисліть втрати напору при значеннях еквівалентної шорсткості $\Delta_\epsilon = 0,1$; $0,2$ і $1,2 \text{ мм}$, яка зростає в часі в результаті карбонатних відкладень та корозії труб.

Відповідь: $h_f = 8,26$; $9,28$ і $13,47 \text{ м}$.

5.17. Обчисліть втрати тиску в кільцевому просторі довжиною $l = 50 \text{ м}$. Зовнішній діаметр внутрішньої труби $d = 151 \text{ мм}$, внутрішній діаметр зовнішньої труби $D = 155 \text{ мм}$. Труби технічно гладкі. Масова витрата азотної кислоти ($\rho = 1510 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,0025 \text{ м}^2/\text{с}$) $m = 10 \text{ кг/с}$.

Відповідь: $\Delta p = 7,8 \text{ МПа}$.



5.18. У скільки разів зростуть втрати напору по довжині трубопроводу при заданій витраті, якщо квадратний переріз труби замінити прямокутним такої самої площі при відношенні сторін $h/b = 0,1$ (рис. 78)? Розв'язати задачу для режиму ламінарного і турбу-

лентного в зоні гідравлічно шорстких труб.
Вказівка. При ламінарному режимі для квадратного перерізу $\lambda_k = 75/Re$; для прямокутного $\lambda_n = 84,5/Re$.

Відповідь: $h_n/h_k = 4,5$; $h_{ln}/h_{lk} = 2$.

5.19. Порівняйте витрату води ($v_1 = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$), турбінної оливи ($v_2 = 10^4 \text{ м}^3/\text{с}$) і рафінованої олії ($v_3 = 10^3 \text{ м}^3$) у сталевому трубопроводі довжиною $l = 200 \text{ м}$ і діаметром $d = 100 \text{ мм}$ (еквівалентна шорсткість $\Delta_\epsilon = 0,1 \text{ мм}$). Втрати напору прийняти однаковими і рівними 10 м .

Вказівка. Спочатку треба знайти критичний напір $H_{кр} = 32\nu^2 l Re_{кр} / g d^3$ і порівняти з втратами напору. При $h_l > H_{кр}$ – режим турбулентний; при $h_l < H_{кр}$ – ламінарний.

Відповідь: 1. $Q = 17 \text{ л/с}$; 2. $Q = 12 \text{ л/с}$; 3. $Q = 1,2 \text{ л/с}$.

5.20. Порівняйте втрати напору в круглоциліндричній трубі h_z з квадратним перерізом h_{lk} при умові рівновеликої площі поперечного перерізу, прийнявши: а) режим ламінарний; б) режим турбулентний в зоні квадратичного опору. Врахуйте вказівку до задачі 5.18.

Відповідь: а) $h_{lk}/h_l = 1,13$; б) $h_{lk}/h_l = 1,16$.

5.21. Обчисліть втрати напору по довжині трубопроводу, складеного зі сталевих безшовних труб після декількох років експлуатації, поперечний переріз якого має форму: а) рівностороннього трикутника зі стороною $a = 4 \text{ см}$; б) квадрата зі стороною $b = 4 \text{ см}$. Обчислення провести для довжини $l = 100 \text{ м}$ при швидкості руху води ($v = 10^6 \text{ м}^3/\text{с}$) $V = 0,5 \text{ м/с}$.

Відповідь: а) $h_l = 2,11 \text{ м}$; б) $h_l = 1,06 \text{ м}$.

5.22. Визначте втрати тиску на тертя в трубопроводі діаметром $d = 250 \text{ мм}$ і довжиною $l = 1,5 \text{ км}$, по якому транспортується бензин ($\rho = 700 \text{ кг/м}^3$, $\nu = 0,0075 \text{ см}^2/\text{с}$) з масовою витратою $18,2 \text{ кг/с}$. Як зміняться ці втрати при зменшенні діаметра труб на 20%? Шорсткість стінок трубопроводу прийняти $\Delta_\epsilon = 0,2 \text{ мм}$.

Відповідь: $\Delta p_l = 12034 \text{ Па}$; $\Delta p_z = 37795 \text{ Па}$; збільшення втрат тиску у 3,14 рази.

5.23. Різниця рівнів ртуті в диференційному манометрі, підключеному до і після засувки (рис. 79), становить 50 мм . Діаметр трубопроводу $d = 100 \text{ мм}$, а

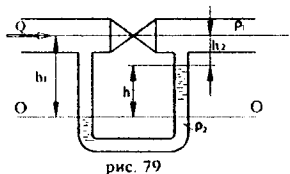


рис. 79

витрати води $Q = 15,7 \text{ л/с}$. Обчисліть значення коефіцієнта опору засувки.

Відповідь: $\zeta = 3,09$.

5.24. Перед кінцем трубопроводу діаметром $d = 150 \text{ мм}$, по якому транспортується в'язка рідина ($\nu = 0,0075 \text{ см}^2/\text{с}$; $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$), встановлена засувка. Обчисліть втрати тиску у

засувці при витраті $Q = 40 \text{ л/с}$, якщо вона відкрита на 75%.

Вказівка. Для визначення коефіцієнта місцевого опору використати залежність $\zeta = (A/Re) + \zeta_{\text{ст}}$, де $\zeta_{\text{ст}}$ – коефіцієнт місцевого опору для квадратичної зони турбулентного режиму.

Відповідь: $\Delta p = 696 \text{ кПа}$.

5.25. Обчисліть втрати тиску при протіканні $0,2 \text{ л/с}$ оливи в радіаторі, діаметр колектора якого $d_k = 30 \text{ мм}$, а діаметр трубок $d = 10 \text{ мм}$ (рис. 80). Питомі маса оливи $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$, кінематична в'язкість $\nu = 0,65 \text{ см}^2/\text{с}$. Коефіцієнт ζ визначити, як у попередній задачі при $A = 30$.

Відповідь: $\Delta p = 12,06 \text{ кПа}$.

5.26. Через водопідігрівач, який являє собою шестипетлевий трубчастий сталевий змійовик (рис. 81), проходить 10 л/с води. Петлі з діаметром трубок 75 мм мають прямі ділянки довжиною $l = 3 \text{ м}$ і з'єднані між собою колінами радіуса $R = 10 \text{ см}$. Температура води 90° ($\rho = 965 \text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,0033 \text{ см}^2/\text{с}$). Обчисліть втрати тиску у водяному тракті водонагрівача, якщо еквівалентна шорсткість труб $\Delta_r = 0,03 \text{ мм}$.

Вказівка. Місцеві втрати при плавному повороті прийняти за формулою.

$$\zeta = 1,33(0,2 + 0,001 \cdot (100 A^2 \sqrt{d/R}))$$

Відповідь. 18 кПа .

5.27. Вода при температурі 20°C протікає по горизонтальній трубі, яка раптово звужується від діаметра $d_1 = 200 \text{ мм}$ до $d_2 = 100 \text{ мм}$. Обчисліть місцеві втрати напору при витраті

$Q = 20 \text{ л/с}$.

Відповідь: $h_{\text{п}} = 14 \text{ см}$.

5.28. Горизонтальна труба діаметром 100 мм раптово переходить у трубу діаметром 150 мм . Треба обчислити: а) втрати напору при раптовому

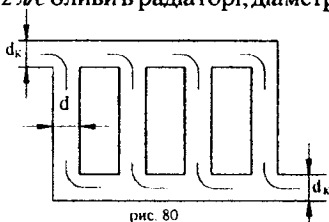


рис. 80

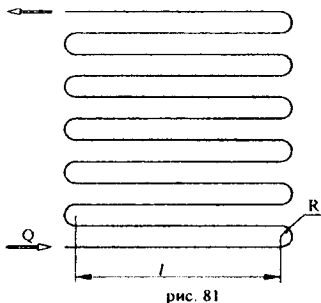


рис. 81

розширенні труби; б) втрати напору для випадку протилежної течії, тобто з широкої труби у вузьку. Витрату води при 20°C прийняти 30 л/с .

Відповідь: а) $h_{pp} = 0,23\text{ м}$; б) $h_{pr} = 0,24\text{ м}$.

5.29.3 метою обмеження витрати води у водогоні встановлено діафрагму з діаметром отвору 35 мм . Обчисліть втрати напору в цьому місцевому опорі, якщо витрата води при 20°C $Q = 5,9\text{ л/с}$, а діаметр трубопроводу $d = 76\text{ мм}$.

Відповідь: $h_d = 3,67\text{ м}$.

5.30. Вода а витратою $0,45\text{ л/с}$ витікає з труби діаметром $d = 15\text{ мм}$ через пробковий кран в атмосферу під тиском $p = 1,75 \cdot 10^5\text{ Па}$ (рис. 82). Чому дорівнює коефіцієнт опору крана і якому куту повороту крана він відповідає? Використати дані додатку 6.

Відповідь: $\zeta = 0,054$; $\alpha = 5^{\circ}$.

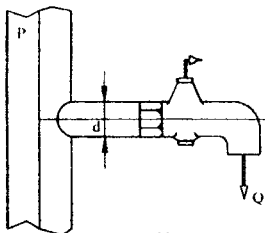


рис. 82

РІВНЯННЯ БЕРНУЛЛІ. ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК КОРОТКИХ ТРУБОПРОВОДІВ

6.1. Основні теоретичні положення

Рівняння *Бернуллі* пов'язує між собою тиск, середню швидкість і геометричну висоту в різних перерізах потоку і є основним рівнянням практичної гідродинаміки.

Для двох перерізів потоку в'язкої рідини при плавномітному стаціонарному русі рівняння Бернуллі має вигляд:

$$gz_1 + \frac{p_1}{\rho} + \frac{aV_1^2}{2} = gz_2 + \frac{p_2}{\rho} + \frac{aV_2^2}{2} + g\sum h_w, \quad (6.1.)$$

де z_1, z_2 – відстані від довільної горизонтальної площини до центрів відповідних перерізів; p_1, p_2 – тиски в цих перерізах; V_1, V_2 – середні швидкості відповідно у першому і другому перерізах.

Зенергетичної точки зору сума $gz + \frac{p}{\rho}$ являє собою питому (віднесену до одиниці маси) потенціальну енергію рідини; $\frac{aV^2}{2}$ – питому кінетичну енергію, а $g\sum h_w$ – втрату питомої енергії між цими перерізами.

Найчастіше рівняння Бернуллі записують так:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{aV_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{aV_2^2}{2g} + \sum h_w. \quad (6.2.)$$

Цій формі запису з геометричної точки зору можна надати таке тлумачення членам рівняння: z – геометрична висота або висота

положення (висота, на якій знаходиться центр живого перерізу над площиною порівняння 0-0 (рис. 83);

$\frac{p}{\rho g}$ – п'єзометрична

висота; $\frac{aV^2}{2g}$ – висота швидкісного напору або просто швидкісний напір; $\sum h_w$ – втрачена висота, що характеризує втрату напору на подолання гідравлічних опорів.

Суму трьох доданків

$$H = z + \frac{p}{\rho g} + \frac{aV^2}{2g}$$

називають повним або гідродинамічним напором. Отже рівняння (6.2.) можна ще записати так:

$$H_1 = H_2 + \sum h_w. \quad (6.3.)$$

Коефіцієнт a у рівняннях (6.1.) і (6.2.) характеризує нерівномірність розподілу швидкостей по перерізу потоку і називається коефіцієнтом кінетичної енергії (коефіцієнтом Коріоліса). При ламінарному режимі $a=2$, а при турбулентно-му його можна приймати рівним одиниці.

Рівняння Бернуллі дозволяє розв'язувати різноманітні задачі. Для цього вибирають два перерізи потоку так, щоби в одному з них величини z , p і V були відомі, а в другому невідома лише одна величина. Горизонтальну площину порівняння доцільно вибирати так, щоби вона проходила через центр одного з вибраних перерізів. Тоді одна з величин z перетворюється в нуль.

Рівняння Бернуллі лежить в основі розрахунку коротких

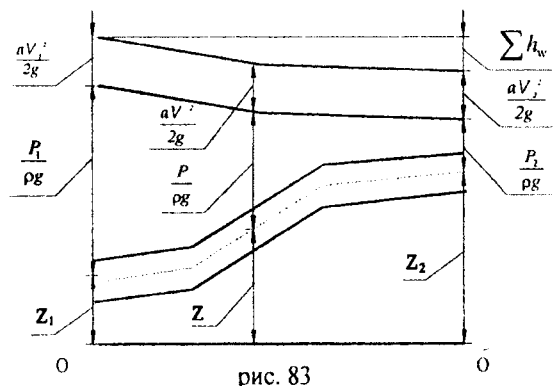


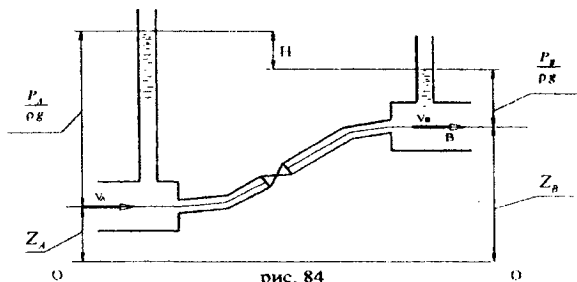
рис. 83

трубопроводів. Як правило, поряд з цим рівнянням використовується рівняння нерозривності

$$V_1\omega_1=V_2\omega_2=\dots=V_k\omega_k, \quad (6.4.)$$

де V_1, V_2, V_k – середні швидкості у відповідних живих перерізах потоку $\omega_1, \omega_2, \omega_k$.

Короткими трубопроводами називаються трубопроводи, в яких місцеві втрати напору і втрати по довжині практично однакові. Вони можуть мати один постійний діаметр по всій довжині або складатися з ряду послідовно з'єднаних ділянок трубо різного діаметра.



Використовуючи рівняння Бернуллі для схеми, зображеної на (рис. 84), маємо

$$z_A + \frac{p_A}{\rho g} + \frac{aV_A^2}{2g} = z_B + \frac{p_B}{\rho g} + \frac{aV_B^2}{2g} + \sum h_w.$$

Введемо поняття диспонуваного напору

$$H = \left(\frac{p_A}{\rho \cdot g} \right) - \left(\frac{p_B}{\rho \cdot g} \right),$$

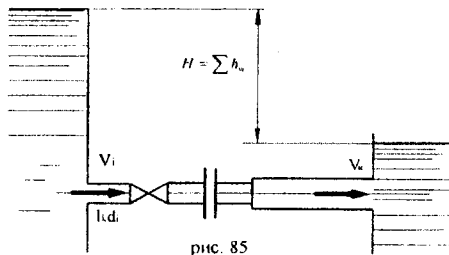
який являє собою різницю гідростатичних напорів у живильному А і приймальному В резервуарах. Тоді рівняння Бернуллі набуває вигляду

$$H = \frac{aV_B^2}{2g} - \frac{aV_A^2}{2g} + \sum h_w. \quad (6.5.)$$

Якщо площі перерізів резервуарів достатньо великі порівняно з перерізом трубопроводу, то рівняння (6.5.) запишеться так:

$$H = \sum h_w. \quad (6.6.)$$

Рівняння (6.6.), незалежно від розмірів резервуарів, справедливе, коли трубопровід має достатньо велику довжину, при якій швидкісні напори на вході й виході з трубопроводів дуже малі порівняно з втратами напору.



Розшифровуючи втрати напору для схеми, зображеної на рис. 85, отримаємо

$$H = \left[a_k + \sum_i^k \left(\lambda_i \frac{l_i}{d_i} + \zeta_i \right) \left(\frac{\omega_k}{\omega_i} \right)^2 \right] \frac{V_k^2}{2g}, \quad (6.7.)$$

Для трубопроводу постійного діаметра та $a_k = a = l$

$$H = \left(l + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{V^2}{2g}, \quad (6.8.)$$

або

$$H = \left(l + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^5}. \quad (6.9.)$$

У ряді задач для визначення пропускної здатності трубопроводу при турбулентному режимі доцільно (6.8.) представити у вигляді

$$V = \varphi \sqrt{2gH}; \quad \varphi = \left(\sqrt{l + \lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta} \right)^{-1},$$

де φ – коефіцієнт швидкості. При цьому витрата

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

де $\mu = \varphi$ – коефіцієнт витрати.

При витіканні рідини з великого резервуара через трубопровід в атмосферу

$$H = \frac{aV_k^2}{2g} + \sum h_w, \quad (6.10.)$$

де H – диспонуваний напір трубопроводу, який визначається висотою п'єзометричного рівня в резервуарі над центром вихідного перерізу трубопроводу; $\frac{aV_k^2}{2g}$ – швидкісний напір у вихідному перерізі.

При підстановці $\sum h_w$ у рівняння (6.10.), воно переходить у рівняння (6.3.).

6.2. Приклади розв'язку задач

Приклад 6.1. Сталевий трубопровід ($d = 150 \text{ мм}$) з'єднує два відкритих резервуари зі сталими рівнями $H_1 = 12 \text{ м}$ і $H_2 = 2 \text{ м}$. У трубопроводі довжиною 45 м є один поворот на 90° , установлена засувка, відкрита наполовину. Обчисліть витрату води при температурі 20°C .

Розв'язання. З рівняння Бернуллі, записаного для перерізів по вільній поверхні води в резервуарах при

$$p_1 = p_2 = p_{at}; \quad z_1 = H_1; \quad z_2 = H_2; \quad V_1 = V_2 \approx 0;$$

$$h = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{V^2}{2g}$$

отримаємо, що

$$H_1 - H_2 = h = \left(\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta \right) \frac{V^2}{2g},$$

звідки

$$V = \sqrt{\frac{2gh}{\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}}; \quad Q = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}},$$

де

$$\sum \zeta = \zeta_{\text{вх}} + \zeta_{\text{пов}} + \zeta_{\text{зас}} + \zeta_{\text{вих}};$$

$\zeta_{\text{вх}} = 0,5$ – коефіцієнт опору на виході з резервуара; $\zeta_{\text{пов}} = 1,4$ (поворот на 90° або пряме коліно); $\zeta_{\text{зас}} = 2$ – коефіцієнт опору засувки, відкритої наполовину; $\zeta_{\text{вих}} = 1$ – коефіцієнт опору на вході в резервуар (додаток 5).

Отже, $\sum \zeta = 4,9$.

Оскільки число Рейнольдса визначити не можна, то приймаємо зону квадратичного опору. При $\Delta_r = 0,15 \text{ мм}$ (труби сталеві, з незначною корозією)

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_r}{d} \right)^{0,25} = \left(\frac{0,15}{150} \right)^{0,25} \quad 0,11 = 0,0196.$$

Тоді в першому наближенні

$$Q = \frac{3,14 \cdot 0,15^2}{4} \sqrt{\frac{2 \cdot 9,81 \cdot 10}{0,0196 \frac{45}{0,15} + 4,9}} = 0,0754 \text{ м}^3/\text{с} = 75,4 \text{ л/с}.$$

Тепер обчислимо

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

де $\nu = 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ – кінематична в'язкість. Звідси

$$Re = \frac{4 \cdot 0,0754}{3,14 \cdot 0,15 \cdot 10^{-6}} = 640340.$$

$$\text{Оскільки } Re > 500 \frac{d}{\Delta_r} = 500 \frac{150}{0,15} = 500000,$$

то зона опору квадратична і друге наближення непотрібне. Отже, $Q = 75,4 \text{ л/с}$.

Приклад 6.2. Визначте мінімально можливий діаметр всмоктувального трубопроводу при подачі помпи 1 л/с . Висота всмоктування $H_{\text{вс}} = H = 2,5 \text{ м}$ (рис.102), довжина трубопроводу 3 м , шорсткість труби $0,008 \text{ мм}$; коефіцієнт опору вхідного фільтра 6 ,

максимально допустимий вакуум перед входом у помпу 80 кПа ; в'язкість робочої рідини $0,01 \text{ см}^2/\text{с}$; питома маса 1000 кг/м^3 .

Розв'язання. З рівняння Бернуллі для перерізів по поверхні рідини в резервуарі 1-1 і на вході в помпу 2-2 відносно поверхні рідини (рис. 102) маємо

$$\frac{p_{\text{атм}}}{\rho g} = \frac{p_2}{\rho g} + H_{\text{вс}} + \frac{V^2}{2g} \left(\zeta_{\phi} + \lambda \frac{l}{d} \right) + \frac{V^2}{2g},$$

або

$$\frac{p_{\text{атм}} - p_2}{\rho g} = h_{\text{нак}} = H_{\text{вс}} + \frac{V^2}{2g} \left(1 + \zeta_{\phi} + \lambda \frac{l}{d} \right).$$

Звідси

$$p_{\text{вак}} = \rho g H_{\text{вс}} + \frac{\rho V^2}{2} \left(1 + \zeta_{\phi} + \lambda \frac{l}{d} \right),$$

або

$$p_{\text{вак}} = \rho g H_{\text{вс}} + \frac{8 Q^2 \rho}{\pi^2 d^5} \left(1 + \zeta_{\phi} + \lambda \frac{l}{d} \right).$$

Підставивши числові значення, отримаємо

$$80000 = 1000 \cdot 9,81 \cdot 2,5 + \frac{8 \cdot 0,001^2 \cdot 1000}{3,14^2 d^5} \left(1 + 6 + 0,02 \frac{3}{d} \right),$$

де попередньо прийнято, що $\lambda = 0,02$.

$$\text{Після обчислень отримаємо } 68370164 \cdot d^4 = \frac{0,06}{d} + 7.$$

Рівняння розв'язуємо методом підбору. У нашому випадку при $d = 0,0196 \text{ м}$ ліва і права частини рівняння приблизно однакові. Отже, у першому наближенні $d = 19,6 \text{ мм}$.

Перевіримо режим руху:

$$Re = \frac{Vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d \nu} = \frac{4 \cdot 0,001}{3,14 \cdot 0,0196 \cdot 10^{-6}} = 64994 - \text{режим турбулентний}$$

Уточнимо зону опору:

$$10 \frac{d}{\Delta_\epsilon} = 10 \frac{19,6}{0,08} = 2400; \quad 500 \frac{d}{\Delta_\epsilon} = 500 \frac{19,6}{0,08} = 120000;$$

Оскільки

$$10 \frac{d}{\Delta_\epsilon} < Re < 500 \frac{d}{\Delta_\epsilon},$$

то зона опору друга перехідна і

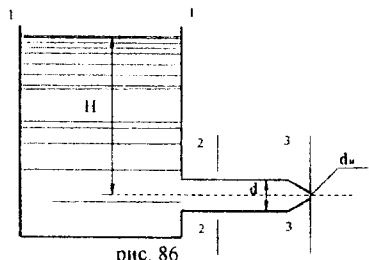
$$\lambda = 0,11 \left(\frac{68}{Re} + \frac{\Delta_\epsilon}{d} \right)^{0,25} = 0,11 \left(\frac{0,68}{64994} + \frac{0,08}{196} \right)^{0,25} = 0,0294.$$

Тоді

$$68370164 d^4 = \frac{0,0882}{d} + 7$$

Рівність виконується при $d = 20,2 \text{ мм}$.

6.3. Задачі для самостійного розв'язку



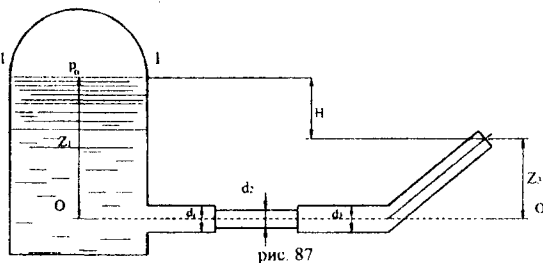
(рис.86), знехтувавши втратами напору. Яка буде витрата води?

Відповідь: $Q = 0,339 \text{ м}^3/\text{с}$.

6.2. Обчисліть витрату невязкої рідини в трубі змінного перерізу (рис.87), під'єднаної до закритого резервуара, в якому підтримується тиск $p_0 = 60 \text{ кПа}$.

Відомо, що $H = \text{const} = 10 \text{ м}$
 $d_1 = 125 \text{ мм}$; $d_2 = 63 \text{ мм}$;
 $d_3 = 75 \text{ мм}$; $z_3 = 8 \text{ м}$. Витікання

6.1. З резервуара через трубопровід діаметром $d = 125 \text{ мм}$, який закінчується конічнозбіжним насадком з діаметром виходу $d_n = 75 \text{ мм}$, витікає вода в атмосферу. Положення рівня води над віссю трубопроводу незмінне і дорівнює $H = 3 \text{ м}$. Визначте надлишковий тиск у перерізі 2-2



проходить в атмосферу. Побудуйте також п'єзометричну і напірну лінії.

Відповідь: $Q = 78,5 \text{ л/с}$.

6.3. Вихід води з горизонтального пісковловлювача виконано у вигляді звуження з плавно заокругленими стінками (рис. 88.). Ширина пісковловлювача $B = 3 \text{ м}$, витрата очищуваної води $Q = 0,9 \text{ м}^3/\text{с}$ при швидкості $V = 0,3 \text{ м/с}$. Яка буде глибина води у відповідному каналі при його ширині $b = 0,8 \text{ м}$? Дно канала прийняти горизонтальним, а втратами напору знехтувати.

Відповідь: $h_2 = 0,93 \text{ м}$.

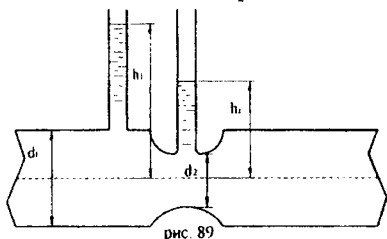


рис. 89

6.5. На яку висоту підніметься вода в трубці, один кінець якої під'єднаний до звуженого перерізу трубопроводу, а другий опущений у воду? Витрата $Q = 25 \text{ л/с}$, надлишковий тиск у перерізі 1-1 (рис. 90) $p_1 = 49 \text{ кПа}$. Діаметри $d_1 = 100 \text{ мм}$, $d_2 = 50 \text{ мм}$.

Відповідь: $h_{\text{max}} = 2,76 \text{ м}$.

6.6. Вода витікає з резервуара при сталому напорі $H = 5 \text{ м}$ через труби

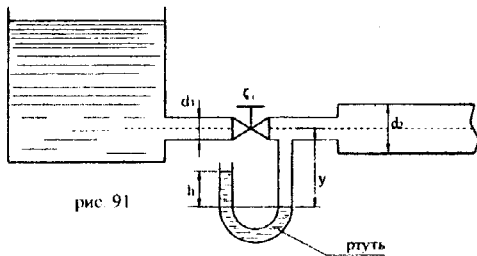


рис. 91

6.4. Обчисліть витрату води в трубі діаметром $d_1 = 250 \text{ мм}$, яка плавно звужується до діаметра $d_2 = 125 \text{ мм}$ (рис. 89). Покази п'єзометрів: $h_1 = 50 \text{ см}$, $h_2 = 30 \text{ см}$. Зменшення витрати за рахунок втрат напору урахувати коефіцієнтом витрати $\mu = 0,98$.

Відповідь: $Q = 24,6 \text{ л/с}$.

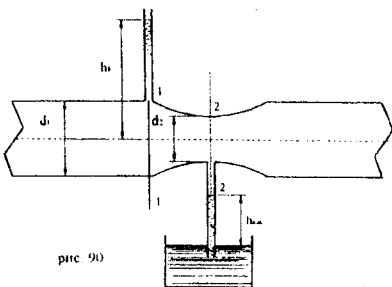


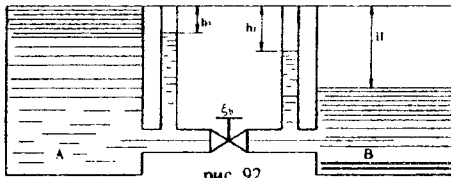
рис. 90

діаметром $d_1 = 75 \text{ мм}$ і $d_2 = 150 \text{ мм}$. Після вентиля, коефіцієнт опору якого $\zeta = 10$, підключено ртутний манометр (рис. 91). Приймавши $h = 10 \text{ см}$ і $y = 1 \text{ м}$ та знехтувавши втратами напору по довжині, обчисліть витрату і абсолютний тиск у вихідному перерізі

трубопроводу. Атмосферний тиск $p_{\text{атм}} = 1010 \text{ гПа}$.

Відповідь: $Q = 13,3 \text{ л/с}$; $p = 1027 \text{ гПа}$.

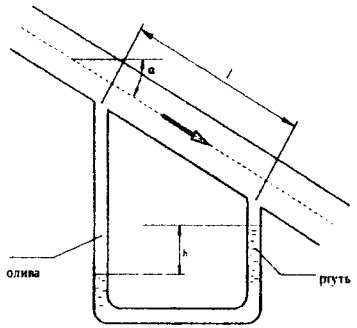
6.7. Два резервуари А і В великих розмірів з'єднані горизонтальним трубопроводом діаметром 150 мм (рис. 92). Коефіцієнт опору вентиля $\zeta_v = 0,4 + \delta(1 - \delta)^2$, де δ – параметр, що змінюється від 0 до 1 і характеризує



ступінь перекриття трубопроводу. Нехтуючи втратами напору по довжині, обчисліть швидкість води в трубопроводі, витрату при $\delta = 0$ і $\delta = 0,75$, а також пониження рівнів води у п'єзометрах при різниці рівнів у резервуарах $H = 2 \text{ м}$.

Відповідь: $V = 4,54 \text{ м/с}$; $Q = 80,2$ і $29,7 \text{ л/с}$; при $\delta = 0,75$ $h_1 = 7,6 \text{ см}$, $h_2 = 1,86 \text{ см}$.

6.8. Олива питомої маси $\rho = 900 \text{ кг/м}^3$ протікає в трубі діаметром 1 см, нахилений під кутом α до горизонту (рис. 93). До труби підключено диференційний ртутний манометр, відстань між точками підключення якого $l = 50 \text{ см}$, а різниця рівнів ртуті $h = 10,6 \text{ см}$. Обчисліть динамічну в'язкість оливи та число Рейнольдса, якщо витрата $Q = 65 \text{ см}^3/\text{с}$.

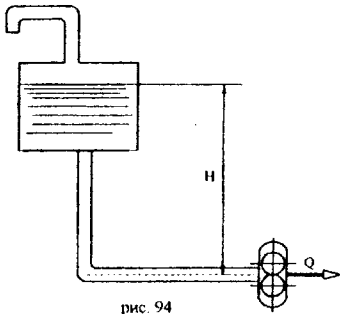


Вказівка. Рівняння Бернуллі записується для перерізів, де підключено гілки диференційного манометра.

Відповідь: $Re = 74,8$; $\mu = 0,0997 \text{ Па·с}$.

6.9. Система змащування літака включає

живильний резервуар, з якого олива надходить по всмоктувальній трубці діаметром 18 мм і довжиною 2 м в помпу (рис. 94). Рівень оливи в резервуарі знаходиться над віссю помпи на висоті $H = 0,7 \text{ м}$. Потрібна витрата оливи ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$; $\nu = 0,11 \text{ см}^2/\text{с}$) для охолодження двигуна літака $Q = 16 \text{ л/хв}$. Який буде абсолютний тиск на вході помпи при польоті на висоті 16 км? Місцеві втрати напору не приймати до уваги.



Вказівка. На висоті 16 км тиск відповідає висоті стовпчика ртуті 77,1 мм.

Відповідь: $p = 133,4 \text{ гПа}$.

6.10. Обчисліть витрату води, що протікає по трубопроводу, який з'єднує два резервуари А і В (рис. 95). Різниця рівнів води у цих закритих резервуарах $H = 5$ м; надлишковий тиск у резервуарі А дорівнює, $p = 2500$ гПа, а вакуумметричний тиск у резервуарі В дорівнює, $p_{\text{вак}} = 50$ кПа. Діаметри резервуарів відповідно дорівнюють $D = 5$ м і $d = 0,3$ м. Втрати напору в системі $h_{\text{AB}} = 12$ м.

Відповідь: $Q = 0,592$ м³/с.

6.11. Обчисліть абсолютний тиск на вході трибової помпи (рис. 96), яка подає 60 л/хв оливи при температурі 20°C ($\rho = 900$ кг/м³; $\nu = 2$ см²/с).

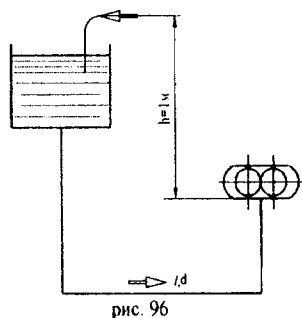


рис. 96

всмоктувальної труби відповідно дорівнюють $l = 5$ м, $d = 35$ мм.

Як зміниться тиск, якщо температура оливи зросте до 80°C ($\rho = 850$ кг/м³; $\nu = 0,1$ см²/с)? Місцеві втрати напору прийняти 10% від втрат по довжині, а рівень оливи у резервуарі на 1 м вище від входу в помпу. Атмосферний тиск $p_{\text{ат}} = 981$ гПа.

Відповідь: $p_1 = 79,5$ кПа; $p_2 = 103,2$ кПа.

6.12. З резервуара великих розмірів через трубопровід діаметром 100 мм випливає в атмосферу потік води (рис. 97). Довжина горизонтальної і нахиленої частини трубопроводу однакові і дорівнюють 50 м. Визначте коефіцієнт опору засувки при $h_1 = 2$ м і $h_2 = 26$ м з умови не перевищення величини вакууму 7 м наприкінці горизонтальної частини трубопроводу. Якою буде витрата, якщо коефіцієнт гідравлічного тертя $\lambda = 0,035$? Втрати напору на повороті труб до уваги не приймати.

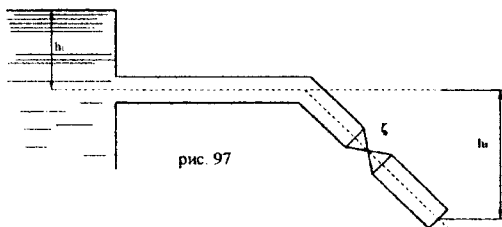


рис. 97

Відповідь: $\zeta = 19,5$;

$Q = 24$ л/с.

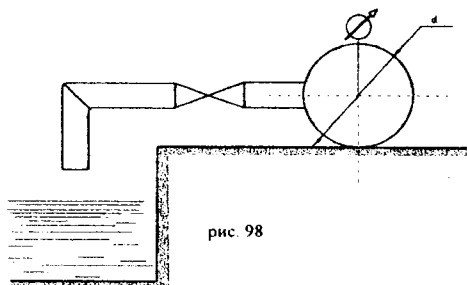


рис. 98

6.13. Обчисліть діаметр трубопроводу d (рис. 98), який має забезпечити заповнення басейну об'ємом $W = 36 \text{ м}^3$ за час $t = 30 \text{ хв.}$ під надлишковим тиском $0,25 \text{ МПа}$. На трубопроводі є засувка ($\zeta_1 = 4$) і відвід ($\zeta_2 = 0,3$). Довжина трубопроводу 45 м , а коефіцієнт гідравлічного тертя визначається за формулою $\lambda = 0,02/d^{1/3}$, де d в м.

Відповідь: $d = 80 \text{ мм.}$

6.14. Обчисліть витрату води, що витікає з резервуара по трубопроводу змінного перерізу під дією надлишкового тиску $p = 0,4 \text{ МПа}$. Рівень води знаходиться на висоті $H = 5 \text{ м}$ над віссю трубопроводу (рис. 99). Коефіцієнти місцевих опорів: засувки $\zeta_2 = 4$; звуження наприкінці трубопроводу $\zeta_3 = 0,06$. Еквівалентна шорсткість $\Delta_\epsilon = 1 \text{ мм}$. Відомо також, що $l_1 = 10 \text{ м}$; $l_2 = 40 \text{ м}$; $d_1 = 100 \text{ мм}$; $d_2 = 200 \text{ мм}$. Як зміниться витрата, якщо $d_1 = d_2 = 200 \text{ мм}$?

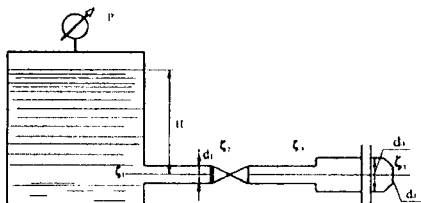


рис. 99

Відповідь: $Q = 66$ і $40,6 \text{ л/с.}$

6.15. Вода витікає з резервуара під дією надлишкового тиску $p = 240 \text{ кПа}$

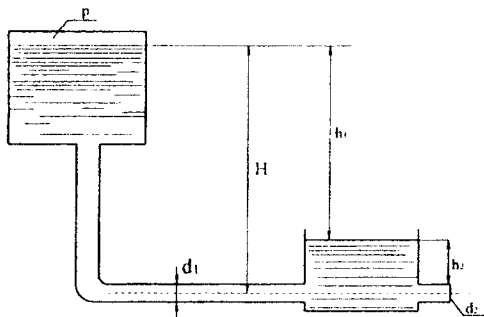


рис. 100

по трубопроводу, складеному з безшовних сталевих труб після декількох років експлуатації, в інший відкритий резервуар, а звідтіля в атмосферу через циліндричний насадок (рис. 100). Обчисліть витрату і положення рівнів води h_1, h_2 , якщо довжина трубопроводу $l = 100 \text{ м}$, $d_1 = d_2 = 200 \text{ мм}$ і $H = 8 \text{ м}$. Коефіцієнт місцевого опору

плавного повороту під кутом 90° визначається за формулою

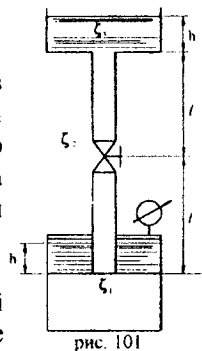
$$\zeta = [0,2 + 0,001(100\lambda)^8] \sqrt{\frac{d}{R}},$$

де R – радіус повороту, рівний 400 мм .

Відповідь: $Q = 0,219 \text{ м}^3/\text{с}$; $h_1 = 4,29 \text{ м}$; $h_2 = 3,71 \text{ м}$.

6.16. Під дією надлишкового тиску вода переміщується з нижнього закритого резервуара по вертикальній трубі діаметром 25 мм і довжиною $2l = 6 \text{ м}$ у верхній відкритий резервуар (рис. 101). Обчисліть величину тиску, знаючи, що витрата $Q = 1,5 \text{ л/с}$, коефіцієнт опору засувки $\zeta_z = 9,3$ і $h = 0,5 \text{ м}$. Труби безшовні сталеві після декількох років експлуатації.

Відповідь: $p = 1463 \text{ гПа}$.

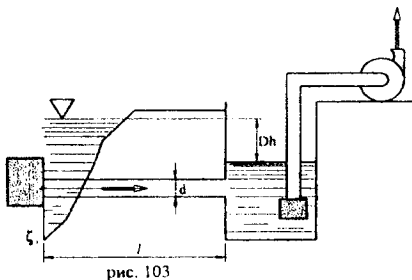


6.17. Помпа забирає воду з температурою 20°C в кількості $Q = 50 \text{ л/с}$. Яка буде максимальна висота розміщення вала помпи над вільною поверхнею води H , якщо тиск перед помпою $p = 30 \text{ кПа}$? На всмоктувальній чавунній (бувшій у використанні) трубі діаметром 250 мм і довжиною 50 м є забірна сітка ($\zeta_s = 6$), плавний поворот радіусом $R = 0,5 \text{ м}$ і засувка, відкрита на 45% площі прохідного перерізу (рис. 102).

Відповідь: $H = 6,26 \text{ м}$.

6.18. Помпа забирає при температурі 20°C 10 л/с води з колодязя, сполученого з водоймищем чавунною, бувшою у використанні трубою, діаметром $d = 150 \text{ мм}$ і довжиною $l = 100 \text{ м}$ (рис. 103). На вході в трубу установлена сітка ($\zeta_s = 6$). Яка буде різниця рівнів води Δh у водоймищі й колодязі?

Відповідь: $\Delta h = 46 \text{ см}$.



6.19. Який напір треба створити в перерізі 1-1 (рис. 104), щоби на виході з трубопроводу одержати витрату води $Q = 10 \text{ л/с}$? Довжина ділянки діаметром $d = 100 \text{ мм}$ дорівнює $l = 50 \text{ м}$; довжина ділянки діаметром $D = 150 \text{ мм}$ становить $L = 30 \text{ м}$. Повороти плавні з радіусом заокруглення $R = 0,5 \text{ м}$, коефіцієнт опору вентиля $\zeta = 4$; $a = 0,5 \text{ м}$.

Вказівка. Коефіцієнт опору повороту визначається, як у задачі 6.15.

Відповідь: $H = 3,73 \text{ м}$.



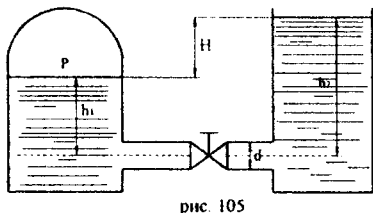


рис. 105

6.20. Трубопровід довжиною $l = 20\text{ м}$ з'єднує два резервуари, з яких перший закритий, а другий відкритий (рис.105). На поверхню води в закритому резервуарі діє тиск $p = 12682\text{ Па}$. Глибини води в резервуарах відповідно дорівнюють $h_1 = 2\text{ м}$ і $h_2 = 3\text{ м}$. Яким повинен бути діаметр трубопроводу, щоби при засувці закритий на 50% витрата при

температурі 20° С дорівнювала $2,9\text{ л/с}$? Атмосферний тиск прийняти $p_{\text{ат}} = 101,3\text{ кПа}$; еквівалентну шорсткість $\Delta_{\text{е}} = 0,1\text{ мм}$.

Відповідь: $d = 50\text{ мм}$.

6.21. Обчисліть витрату води при 20° С через трубопровід, показаний на (рис.106.) Положення вільної поверхні води над центром вихідного перерізу трубопроводу $H = 6,2\text{ м}$; діаметр трубопроводу $d = 25\text{ мм}$, його довжина $l = 100\text{ м}$, а еквівалентна шорсткість $\Delta_{\text{е}} = 0,4\text{ мм}$. Трубопровід

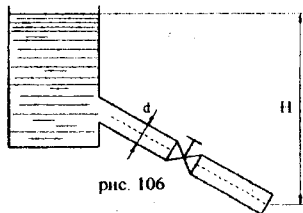


рис. 106

перекритий на кут 30° дроселем з плоско скошеним диском.

Відповідь: $Q = 4,27 \cdot 10^{-4}\text{ м}^3/\text{с}$.

6.22. Трубопровід довжиною 50 м і діаметром $d = 100\text{ мм}$ сполучає два відкриті резервуари (рис.107). Різниця рівнів води в резервуарах $H = 4,6\text{ м}$. Труби сталеві зварні, заржавлені. Засувка перекриває на 50% поперечний переріз трубопроводу. Обчисліть

витрату води, прийнявши її температуру 20° С .

Відповідь. $Q = 16\text{ л/с}$.

6.23. Обчисліть тиск p , що діє на поверхню води в закритому резервуарі (рис.108), при витраті $Q = 3,93\text{ л/с}$, різниці рівнів в резервуарах $H = 0,5\text{ м}$. Трубопровід складається з двох ділянок, діаметри і довжини яких відповідно дорівнюють: $d_1 = 50\text{ мм}$; $l_1 = 20\text{ м}$; $d_2 = 100\text{ мм}$; $l_2 = 20\text{ м}$. Еквівалентна шорсткість труб $\Delta_{\text{е}} = 0,1\text{ мм}$; атмосферний тиск $p = 10132\text{ Па}$; температура води 20° С .

Відповідь: $p = 1517,22\text{ Па}$.

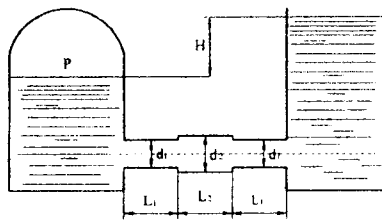
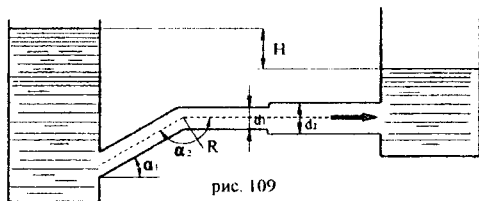


рис. 109

6.24. Обчисліть різницю рівнів води H у резервуарах, сполучених трубопроводом, що складається з двох ділянок (рис.109), діаметри і довжини яких відповідно дорівнюють:

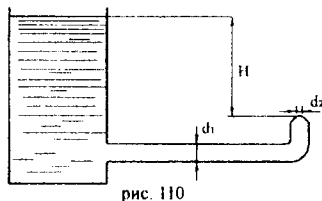
$d_1 = 100\text{мм}; l_1 = 5\text{м}; d_2 = 150\text{мм};$

$l_2 = 50\text{м}$. Еквівалентна шорсткість першої ділянки $\Delta_{e1} = 0,2\text{мм}$, другої $\Delta_{e2} = 0,1\text{мм}$. Тиски в резервуарах $p_1 = 186,4\text{кПа}; p_2 = 157\text{кПа}$; витрата $Q = 20\text{л/с}$; радіус коліна труби $R = 25\text{см}$; кути $\alpha_1 = 10^\circ\text{C}; \alpha_2 = 160^\circ\text{C}$; температура 20°C .



Вказівка. Коефіцієнт опору повороту $\zeta_a = \zeta_{\kappa\rho} a$, де $\zeta_{\kappa\rho}$ – визначається як в задачі 6.15., коефіцієнт a взяти з відповідної таблиці (додаток 7).

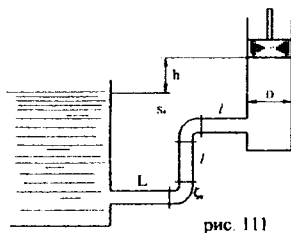
Відповідь: $H = -1,71\text{м}$, тобто рівень води в першому резервуарі нижче рівня в другому на $1,71\text{м}$.



6.25. Який п'єзометричний напір H треба заповнити на вході в трубопровід довжиною $l = 20\text{м}$ і діаметром $d_1 = 25\text{мм}$ (рис.110) що закінчується насадком з $d_2 = 10\text{мм}$, щоб отримати фонтан висотою $h = 5\text{м}$? Втратами напору в звуженні знехтувати. Еквівалентна шорсткість труб $\Delta_e = 0,1\text{мм}$; температура води 14°C .

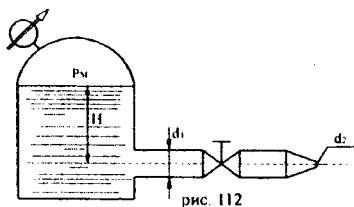
Відповідь: $H = 8\text{м}$.

6.26. Толок діаметром $D = 200\text{мм}$ переміщується рівномірно вгору у циліндрі (рис.111), засмоктуючи воду з відкритого резервуара з постійним рівнем. Діаметр трубопроводу $d = 50\text{мм}$; довжина кожної з трьох ділянок $l = 4\text{м}$; коефіцієнт опору кожного з колін $\zeta_k = 0,5$; коефіцієнт гідравлічного тертя $\lambda = 0,03$. Коли толок знаходиться вище рівня води в резервуарі на $h = 2\text{м}$, потрібна для його переміщення сила $P = 2350\text{Н}$. Яка буде швидкість підймання толока і до якої висоти h його можна підіймати з такою швидкістю без небезпеки відриву від нього рідини при 30°C ? Атмосферний тиск $p_{\text{ат}} = 986,62\text{Па}$.



Вказівка. Необхідно врахувати величину тиску пароутворення води при даній температурі.

Відповідь: $V = 0,27\text{ м/с}; h_{\text{max}} = 4,05\text{м}$.

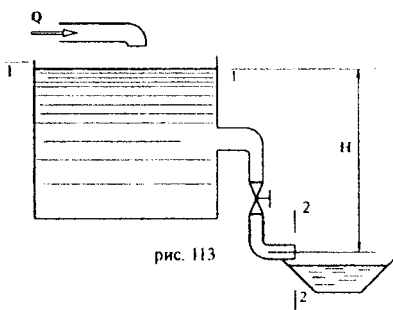


6.27. Із закритого резервуара під тиском $p_m = 3000 \text{ кПа}$ витікає вода по трубопроводу діаметром $d_1 = 40 \text{ мм}$, який закінчується конічнозбіжним насадком з вихідним отвором діаметра $d_2 = 18 \text{ мм}$ (рис. 112). Довжина трубопроводу $l = 125 \text{ м}$, а еквівалентна шорсткість $\Delta_s = 0,2 \text{ мм}$. Обчисліть швидкість

витікання і витрату нафти ($\rho = 950 \text{ кг/м}^3$) при $H = 3 \text{ м}$ і коефіцієнті опору насадка $\zeta_n = 0,06$. Коефіцієнт опору вентиля прийняти за формулою (задача 6.7.) при 57% відкритті; кінематичну в'язкість нафти $\nu = 0,093 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Відповідь: $V = 10,87 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q = 2,76 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3/\text{с}$.

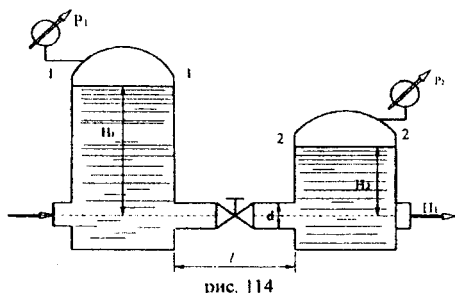
6.28. Вода при температурі 18°C витікає з резервуара великих розмірів під дією постійного напору H (рис. 113) по трубопроводу довжиною $l = 3 \text{ м}$ і діаметром $d = 100 \text{ мм}$. Трубопровід сталевий, після декількох років експлуатації. Обчисліть величину напору для забезпечення витрати $Q = 10 \text{ л/с}$. Трубопровід має два плавні повороти під 90°C з радіусом повороту $R = 300 \text{ мм}$ і вентиль ($\zeta_v = 3,9$).



Вказівка. Коефіцієнт опору повороту визначається, як у задачі 6.15.

Відповідь: $H = 0,68 \text{ м}$.

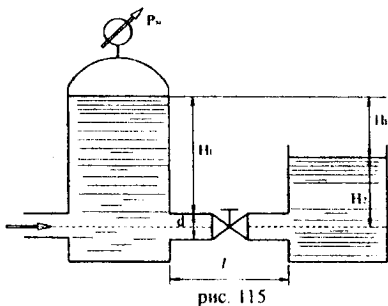
6.29. Два закриті резервуари сполучені між собою трубопроводом довжиною $l = 125 \text{ м}$ і діаметром $d = 100 \text{ мм}$ (рис. 114). Манометричні тиски в



резервуарах відповідно дорівнюють $p_1 = 1800 \text{ кПа}$ і $p_2 = 60 \text{ кПа}$. Положення рівнів води відносно осі трубопроводу $H_1 = 5 \text{ м}$ і $H_2 = 2 \text{ м}$. Обчисліть швидкість перетікання та витрату води, приймаючи незмінність положення рівнів. Трубопровід чавунний новий, без покриття. Опір вентиля прийняти $\zeta_v = 3,9$, температуру води 24°C .

Відповідь: $V = 2,53 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q = 19,9 \text{ л/с}$.

6.30. Із закритого резервуара вода при температурі 10°C перетікає під постійним напором у відкритий резервуар великих розмірів по трубопроводу діаметром $d = 25\text{мм}$ і довжиною $l = 30\text{м}$. Обчисліть витрату і швидкість руху води при таких даних (рис. 115): $p_m = 10\text{Па}$; $H_1 = 2\text{м}$; $H_2 = 1\text{м}$. Труби чавунні нові, асфальтовані; коефіцієнт опору вентиля $\zeta_B = 3,9$.

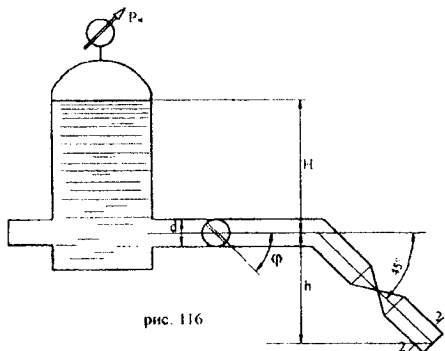


Відповідь: $V = 2,17\text{ м}^3/\text{с}$; $Q = 1,06\text{ л/с}$.

6.31. Вода при температурі 19°C витікає

під тиском $p_m = 10\text{Па}$ із закритого резервуара по трубопроводу діаметром $d = 25\text{мм}$ і довжиною прямої ділянки $l = 3\text{м}$ в атмосферу (рис. 116). На трубопроводі є пробковий кран, відкритий на кут $\varphi = 15^\circ$, і повністю відкритий вентиль (додаток 8). Обчисліть витрату води, якщо $H = 2\text{м}$; $h = 1\text{м}$; еквівалентна шорсткість $\Delta_t = 0,2\text{мм}$.

Вказівка. Для різких поворотів $\zeta = \zeta_{90^\circ} (1 - \cos \alpha)$; $\zeta_{90^\circ} = f(d)$



прийняти з відповідної таблиці (додаток 9).

Відповідь: $Q = 2,86\text{ л/с}$.

6.32. Повітря в кількості $0,03\text{м}^3/\text{с}$ поступає з труби діаметром $D = 36\text{мм}$ в трубу з $d = 30\text{мм}$ через короткий конфузур з кутом конусності $\alpha = 10^\circ$. Який буде тиск у перерізі 1-1 (рис. 117), якщо вода в трубі, під'єднаний до труби меншого діаметра, піднялася на висоту $h = 40\text{см}$? Питому масу повітря прийняти $1,2\text{кг}/\text{м}^3$.

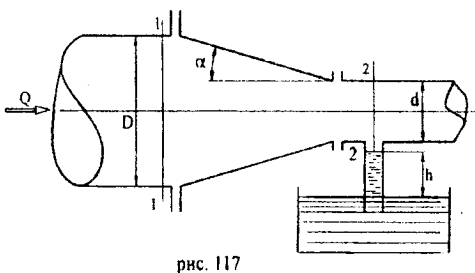


рис. 117

Відповідь: $p_1 = 51,52\text{Па}$.

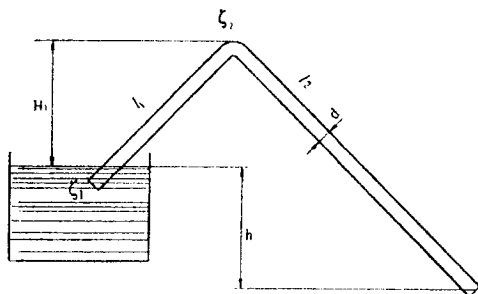


рис. 118

6.33. Визначте діаметр сифонного трубопроводу (рис. 118) для забезпечення витрати води при температурі 20°C у кількості $19,2\text{ л/с}$. Довжина $l_2 = 2,12\text{ м}$; загальна довжина $l = 6,36\text{ м}$; $H_1 = 1,5\text{ м}$; $h = 1,5\text{ м}$. Еквівалентна шорсткість трубопроводу $\Delta_\zeta = 0,1\text{ мм}$; коефіцієнт опору повороту труб $\zeta_2 = 2$. Чи буде забезпечена нормальна робота сифону при $t = 30^\circ\text{C}$?

Відповідь: $d = 100\text{ мм}$; буде, бо $p_v/\rho g = 8,28 > p_c/\rho g$, де p_v – тиск пароутворення (додаток 1).

6.34. Для відведення води під залізничною колією побудовано дюкер (рис. 119) з бетонних труб діаметром $d = 800\text{ мм}$. Обчисліть, при якій позначці дзеркала води в каналі витрата становитиме $1,01\text{ м}^3/\text{с}$.

Вихідні дані: довжина дюкера $l = 20\text{ м}$; $R = 4\text{ м}$; $\alpha = 45^\circ$; кут входу в дюкер $\varphi = 43^\circ$; верхня позначка дзеркала води $\nabla_1 = 90\text{ м}$; температура води $t = 10^\circ\text{C}$.

Вказівка. Коефіцієнт опору повороту обчислити за формулою $\zeta_1 = (0,131 + 0,163(d/R)^3) \cdot \alpha / 90^\circ$, а $\zeta_{\text{вх}} = 0,5 + 0,3\cos\varphi + 0,2\cos^2\varphi$.

Відповідь: $\nabla_2 = 89,46\text{ м}$.

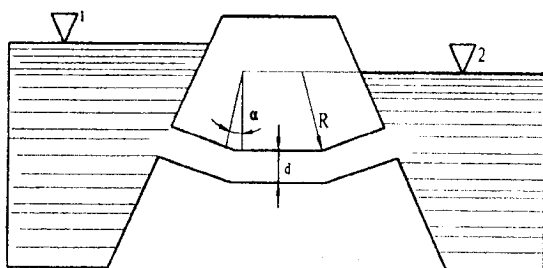


рис. 119

6.35. Сифонний водоскид з ужиткованих бетонних труб діаметром 1 м загальною довжиною $l = 50\text{ м}$ скидає воду з водосховища в ріку, рівень якої на $H = 5\text{ м}$ нижче рівня водосховища (рис. 120). Обчисліть подачу сифонного водоскиду, якщо він має два повороти $\alpha_1 = 90^\circ$ і $\alpha_2 = 45^\circ$ з радіусами заокруглення $R = 2\text{ м}$. Довжина горизонтальної ділянки $L = 2\text{ м}$; температура води у водосховищі 0°C . Визначте також вакуум у верхній частині сифону при $z_1 = 1\text{ м}$ і $z_2 = 3\text{ м}$.

Вказівка. Коефіцієнт опору повороту визначається як у задачі 6.24.

Відповідь: $Q = 4,8\text{ м}^3/\text{с}$; $p_{\text{вак}} = 42,76\text{ кПа}$.

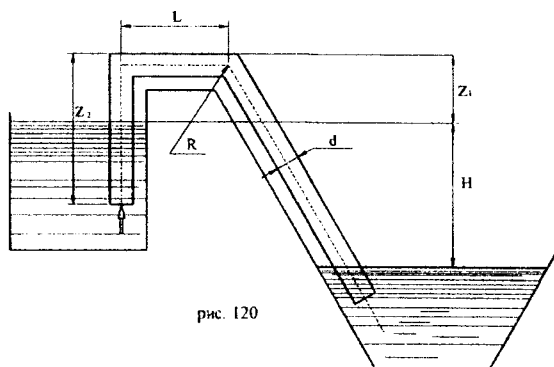


рис. 120

ГІДРАВЛІЧНИЙ РОЗРАХУНОК ДОВГИХ ТРУБОПРОВОДІВ. ГІДРАВЛІЧНИЙ УДАР

7.1. Основні теоретичні положення

У довгих трубопроводах втрати напору на тертя переважають набагато втрати на місцеві опори і швидкісний напір на вході. Це, в основному магістральні трубопроводи, де місцеві втрати напору не перевищують 5...10% від втрат на тертя.

Якщо прийняти до уваги досить велику швидкість руху рідини, при якій можлива квадратична зона опору, то розрахункову формулу для визначення потрібного напору можна представити у вигляді

$$H = (1,05 \dots 1,1) S_o Q^2, \quad (7.1.)$$

де S_o – питомий опір трубопроводу $S_o = \frac{8\lambda}{g\pi^2 d^5}$; l – довжина трубопроводу; Q – витрата. Числовий множник 1,05...1,1 враховує місцеві втрати напору.

Значення питомого опору наводяться в таблицях для різних типів труб. В додатку 10 виписані деякі дані при швидкості $V=1$ м/с для нових сталевих водогазогінних і чавунних труб, а також сталевих електрозварних прямошовних труб. При швидкостях відмінних від 1 м/с питомий опір

$$S_o = \theta S_{от}, \quad (7.2.)$$

де θ – поправка на вплив швидкості, яка приймається з таблиці (див. додаток 11); $S_{от}$ – табличне значення опору. Для розрахунку довгих трубопроводів застосовується також формула

$$H=(1,05\dots 1,1)\frac{Q^2 l}{K^2}, \quad (7.3.)$$

де K – модуль витрати або витратна характеристика трубопроводу. З порівняння формул (7.1.) і (7.3.) видно, що $K=1/\sqrt{S_0}$.

Для трубопроводів, що працюють у квадратичній зоні опору, значення K для труб різного діаметра та матеріалу зведені у таблиці. Для прикладу в додатку 12 наведені ці значення для ненових сталевих і чавунних труб.

Для перехідної зони

$$K=\psi K_r, \quad (7.4.)$$

де ψ – поправка на неквадратичність опору, яка залежить від матеріалу труб і швидкості (див. додаток 13); K_r – табличне значення модуля витрати.

Показники S_0 і K можна вважати узагальненими гідравлічними параметрами трубопроводу, використання яких значно спрощує гідравлічні розрахунки, оскільки відповідні таблиці пришиваються до обчислення.

При послідовному з'єднанні трубопроводів різного діаметра формули (7.1.) і (7.3.) набувають вигляду

$$H=(1,05\dots 1,1) Q \sum_{i=1}^n S_{0i} l_i; \quad (7.5.)$$

$$H=(1,05\dots 1,1) Q \sum_{i=1}^n \frac{l_i}{K_i^2}; \quad (7.6.)$$

тобто опори окремих ділянок сумуються.

При паралельному з'єднанні (рис. 121) система розрахункових рівнянь, з урахуванням (7.1.), може бути зведена до вигляду

$$Q=Q_1+Q_2+Q_3;$$

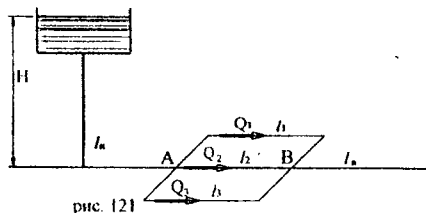
$$S_{01} l_1 Q_1^2 = S_{02} l_2 Q_2^2 = S_{03} l_3 Q_3^2; \quad (7.7.)$$

$$H=(1,05\dots 1,1) (S_{01} l_1 Q_1^2 + S_{02} l_2 Q_2^2 + S_{03} l_3 Q_3^2),$$

де S_{01}, S_{02}, S_{03} – відповідно питомі опори підвідної і відвідної ділянок,

довжини яких l_{II} і l_B , а витрати Q_{II} і Q_B .

Аналогічно можна записати систему рівнянь з урахуванням формули (7.3.).



Розв'язання системи (7.7.) дозволяє визначити всі невідомі величини. Очевидно це пов'язано з методом послідовних наближень, позаяк, не знаючи розмірів труб або протікаючих у них витрат, не можна точно

визначити опори в цих трубах. Тому спочатку приймають квадратичний закон опору і ведуть відповідні обчислення, а відтак повторюють обчислення у другому наближенні. Наближення повторюють до практичного збігу результатів. Звичайно вже друге наближення є достатньо точним.

Приведена методика застосовується при розрахунках водогінних систем. Для трубопроводів іншого призначення гідравлічний розрахунок довгих трубопроводів виконується за допомогою відомої вже формули Дарсі-Вайсбаха (див. розділ 6).

У трубопроводах з безперервною роздачею води по шляху, втрата напору по довжині для квадратичної зони опору

$$h_l = S_0 l Q_p^2, \quad (7.8.)$$

або

$$h_l = \frac{Q_p^2 l}{K^2}, \quad (7.9.)$$

де Q_p – розрахункова витрата, яка визначається за формулою

$$Q_p = \sqrt{Q_r^2 + Q_{III} Q_r + \frac{Q_{IV}^2}{3}}, \quad (7.10.)$$

або наближено

$$Q_p = Q_r + 0,55 Q_{III}; \quad (7.11.)$$

Q_r – транзитна витрата, яка транспортується через ділянку довжини l ;

$Q_{\text{ш}}$ – шляхова витрата: $Q_{\text{ш}} = ql$; q – інтенсивність відбору (звичайно задана).

Складнішими є обчислення при розрахунках розгалужених (тупикових) та кільцевих трубопроводів. Конкретний вид системи розрахункових рівнянь і способи її розв'язання визначаються типом складного трубопроводу і характером поставленої задачі. Для отримання однозначного розв'язку система розрахункових рівнянь повинна бути замкненою, тобто число незалежних невідомих у ній повинно дорівнювати числу рівнянь.

Нижче обмежимося найпростішими прикладами, коли задані діаметри і довжини ділянок труб та відповідні геодезичні позначки і задача зводиться до знаходження витрат або потрібного напору.

У схемі, зображеній на рис. 122 рідина у вузлі В розділяється між двома розгалуженнями, а тому задача зводиться спочатку до знаходження витрат Q_2 і Q_3 при заданих позначках вузла В, кінцевих

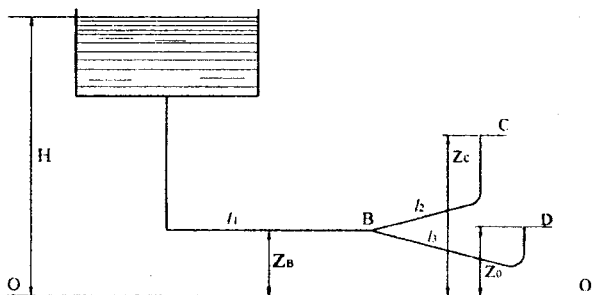


рис. 122

точок С і D та напорі Н. Сума витрат Q_2 і Q_3 дає загальну витрату Q_1 . Після цього уточнюють зону опору і, при необхідності, вносять корективи у визначені витрати.

Для схеми, зображеної на рис. 123 при заданих витратах Q_C і Q_D , на ділянці 4 вибирають довільно напрям руху води і складають рівняння втрат напору $h_{w_2} + h_{w_4} = h_{w_3}$ і балансу витрат, звідки знаходять лінійні витрати Q_2 , Q_3 і Q_4 . Якщо Q_4 виходить від'ємним, то треба змінити напрям руху на ділянці 4, і тоді рівняння втрат зміниться:

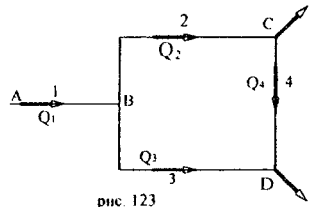


рис. 123

$$h_{w_2} = h_{w_3} + h_{w_4}$$

Після визначення витрат уточнюють зону опору і, при необхідності, вносять корективи на неквадратичність опорів. Потрібний напір знаходиться, як для послідовно з'єднаних труб 1-2-4 або 1-3. При зміні напрямку руху на ділянці 4 це будуть з'єднання 1-2 або 1-3-4.

Газопроводи високого тиску працюють при значних перепадах тиску. За таких умов можна нехтувати зміною питомих кінетичної енергії й енергії положення в рівнянні Бернуллі. У результаті основна розрахункова формула приймає вигляд:

$$p_1^2 - p_2^2 = \frac{\lambda m^2 L R T}{\omega^2 d}, \quad (7.12.)$$

де p_1 і p_2 – відповідно тиск на початку і в кінці трубопроводу; m – масова витрата газу; R – газова стала; T – абсолютна температура; ω – площа поперечного перерізу по внутрішньому діаметру; d – внутрішній діаметр труб; L – довжина трубопроводу.

Для перехідної зони турбулентного режиму, при використанні залежностей (5.8.) і (5.2.), формула (7.12.) запишеться так:

$$p_1^2 - p_2^2 = 0,1785 \left(\frac{\Delta_c}{d} + \frac{53,38 \mu_3}{m} \right)^{0,25} \frac{\lambda m^2 R T}{d^3}, \quad (7.13.)$$

а при наявності квадратичної зони опору (при $V \geq 50 \text{ м/с}$), формула (7.12.) безпосередньо розв'язується відносно діаметра:

$$d = 0,72 \Delta_c^{0,0476} 112^{0,3809} \left(\frac{L R T}{p_1^2 - p_2^2} \right)^{0,1905}. \quad (7.14.)$$

Широке застосування в розрахунках газопроводів у зоні квадратичного опору знайшла формула

$$\lambda = \frac{9,407 \cdot 10^{-3}}{d^{\frac{1}{3}}}, \quad (7.15.)$$

де d у м, і тоді замість (7.14.) отримуємо

$$d = 0,4565 m^{\frac{3}{16}} \left(\frac{LRT}{p_1^2 - p_2^2} \right)^{\frac{3}{16}}. \quad (7.16.)$$

Нормальна робота довгих трубопроводів тісно пов'язана з таким явищем, як гідравлічний удар, який може виникнути при різкому закриванні запірно-регулівних пристроїв на трубопроводах або їх відкриванні. Явище гідравлічного удару це процес поширення вздовж трубопроводу хвиль пружних деформацій і зв'язаних з ними хвиль різкого підвищення й пониження тиску, що може спричинити аварійну ситуацію.

Якщо час закривання запірного пристрою $T_i < 2l/c$, де $2l/c$ – час пробігу ударної хвилі від запірного пристрою до резервуара і назад (фаза гідравлічного удару), то такий удар є прямим і підвищення тиску при цьому визначається формулою Жуковського

$$\Delta p = \rho c V, \quad (7.17.)$$

де c – швидкість поширення ударної хвилі, яка дорівнює

$$c = \frac{l}{\sqrt{\frac{\rho}{K} + \frac{\rho d}{\delta E}}}; \quad (7.18.)$$

V – середня швидкість потоку; K – модуль пружності рідини; E – модуль пружності матеріалу стінок труби; δ – товщина стінок труби, внутрішній діаметр якої d .

При $T_i > 2l/c$ удар є непрямым і тоді

$$\Delta p_{II} = \Delta p \frac{T_{\phi}}{T_i} = \Delta p \frac{2l/c}{T_i}, \quad (7.19.)$$

де Δp_{II} – підвищення тиску при непрямому ударі; T_{ϕ} – фаза гідравлічного удару.

7.2. Приклади розв'язку задач

Приклад 7.1. Визначити потрібний H на початку горизонтального трубопроводу, що складається з двох послідовно сполучених труб різного діаметра $d_1 = 200$ мм ($l_1 = 400$ м) і $d_2 = 150$ мм ($l_2 = 500$ м). Витрата води в кінцевому пункті $Q_k = 22$ л/с, відбір води в місці зміни діаметра $Q = 28$ л/с. Труби чавунні нові класу А.

Розв'язання. Згідно додатку І0 для таких труб
 $S_{от1} = 7,35$ с²/м⁶ і $S_{от2} = 35,83$ с²/м⁶.

Прийнявши 10% на місцеві втрати напору, за формулою (7.5) маємо
 $H = 1,1(S_{от1}l_1Q_1^2 + S_{от2}l_2Q_2^2)$, де $Q_1 = Q + Q_k = 0,028 + 0,022 = 0,05$ м³/с;
 $Q_2 = Q_k = 0,022$ м³/с.
Тоді

$$H = 1,1(7,35 \cdot 400 \cdot 0,05^2 + 35,83 \cdot 500 \cdot 0,022^2) = 17,61 \text{ м.}$$

Перевіримо швидкості:

$$V_1 = \frac{4Q_1}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,05}{3,14 \cdot 0,2^2} = 1,59 \text{ м/с;}$$

$$V_2 = \frac{4Q_2}{\pi d^2} = \frac{4 \cdot 0,022}{3,14 \cdot 0,2^2} = 1,25 \text{ м/с.}$$

Оскільки швидкості більші за 1,2 м/с, то зона опору квадратична і коригування не потрібне.

Приклад 7.2. Два паралельні розгалуження труб (діаметри і довжини ті, що в попередньому прикладі) повинні пропустити 50 л/с води. Скільки води протікатиме в кожному з них? Визначити втрати напору.

Розв'язання. Для вказаних труб модулі витрати дорівнюють $K_1 = 0,34$ м³/с і $K_2 = 0,159$ м³/с (додаток І2).

Оскільки рух рідини по кожній з ділянок відбувається під однаковою різницею напорів, то

$$\frac{Q_1^2 l_1}{K_1^2} = \frac{Q_2^2 l_2}{K_2^2}, \text{ звідки } Q_1 = Q_2 \frac{K_2}{K_1} \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}.$$

Сумарна витрата

$$Q = Q_1 + Q_2 = Q_1 \left(1 + \frac{K_2}{K_1} \sqrt{\frac{l_1}{l_2}} \right).$$

Звідки

$$Q_1 = \frac{Q}{1 + \frac{K_2}{K_1} \sqrt{\frac{l_1}{l_2}}} = \frac{0,05}{1 + \frac{0,159}{0,34} \sqrt{\frac{400}{500}}} = 0,035 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Тоді

$$Q_2 = 0,035 \frac{0,159}{0,34} \sqrt{\frac{400}{500}} = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}.$$

Втрати напору по довжині

$$h_1 = \frac{Q_1^2 l_1}{K_1^2} = \frac{Q_1^2 l_2}{K_2^2} = \frac{0,035^2 \cdot 400}{0,34} = 4,25 \text{ м}.$$

Приклад 7.3. По чавунному трубопроводу діаметром $D = 300$ мм, довжиною $l = 3$ км подається вода зі швидкістю $1,3$ м/с. Товщина стінки трубопроводу $\delta = 12,5$ мм. Необхідно визначити підвищення тиску в трубопроводі для двох випадків, коли: 1) час закриття засувки $t_z = 4$ с; 2) час закриття засувки $t_z = 8$ с.

Розв'язання. За формулою (7.18.) знаходимо швидкість поширення ударної хвилі, скориставшись табл. 4 підручника [2]:

$$c = \sqrt{\frac{2,03 \cdot 10^9}{1000} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + 0,02 \cdot 300/12,5}}} = 1171 \text{ м/с}.$$

Визначаємо час пробігу по трубопроводу прямої і зворотної ударної хвилі (фазу гідравлічного удару):

$$T = \frac{2l}{c} = \frac{2 \cdot 3000}{1171} = 5,12 \text{ с}.$$

Отже, у першому випадку маємо прямий удар, а у другому – непряний.

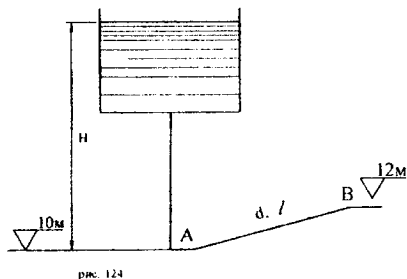
Підвищення тиску при прямому ударі за формулою (7.17.) буде

$$\Delta p = 1000 \cdot 1171 \cdot 1,3 = 1522300 \text{ Па} \approx 1,52 \text{ МПа}.$$

У другому випадку за формулою (7.19.) маємо

$$\Delta p = 1,52 \frac{2 \cdot 3000}{1178,8} = 974000 \text{ Па} = 0,974 \text{ МПа}.$$

7.3. Задачі для самостійного розв'язку



7.1. Визначте витрату води через трубопровід довжиною l км, показаний на (рис.124), якщо умовна позначка точки А дорівнює 10м , а точки В 12м . Труби чавунні не нові класу А, діаметр $d = 200\text{мм}$ і напір $H = 7\text{м}$. Обчислення провести з використанням модуля витрати.

Відповідь: $Q = 23,3 \text{ л/с}$.

7.2. Обчисліть напір, потрібний для пропуску витрати $Q = 50 \text{ л/с}$ через трубопровід, параметри якого наведені в задачі 7.1. Місцеві втрати напору прийняти 5% від втрат по довжині.

Відповідь: $H = 22,7\text{м}$.

7.3. Визначте діаметр трубопроводу, розрахованого на пропуск витрати $Q = 0,25 \text{ м}^3/\text{с}$ при довжині трубопроводу $l = 2,5\text{км}$ і диспонуваному напорі $H = 30\text{м}$. Труби нові чавунні класу А. Для розрахунку використати формулу (7.1.), прийнявши місцеві втрати напору 5% від втрат по довжині.

Відповідь: $d = 400\text{мм}$.

7.4. Обчисліть потрібний напір (рис.124) при вільному напорі в точці В $h_B = 6\text{м}$. Місцеві втрати напору прийняти 10% від втрат по довжині. Витрата води $Q = 23,4 \text{ л/с}$. Для обчислення використати формулу (7.3.), а труби прийняти нові чавунні. Вихідні дані прийняти з задачі (7.1.)

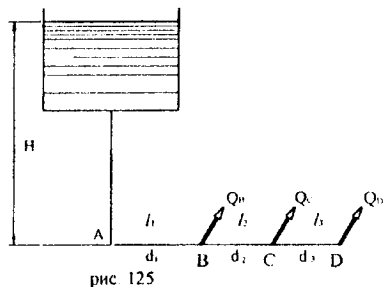
Відповідь: $H_A = 14,1\text{м}$.

7.5. Обчисліть потрібний напір H (рис.125) для забезпечення витрат $Q_B = 0,03 \text{ м}^3/\text{с}$, $Q_C = 0,015 \text{ м}^3/\text{с}$ і $Q_D = 0,02 \text{ м}^3/\text{с}$ в трубопроводі, складеному з труб таких діаметрів і довжин: $d_1 = 250\text{мм}$; $l_1 = 400\text{м}$; $d_2 = 200\text{мм}$; $l_2 = 600\text{м}$; $d_3 = 150\text{мм}$; $l_3 = 300\text{м}$.

Труби нові чавунні класу А. Вільний напір в кінці трубопроводу має бути $h = 2\text{м}$. Місцеві втрати напору прийняти 10% від втрат по довжині. Використати формулу (7.1.).

Відповідь: $H = 16,5\text{м}$.

7.6. Трубопровід із сталевих нових електрозварних труб складається з трьох паралельних вставок: $d_1 = 150\text{мм}$; $l_1 = 500\text{м}$; $d_2 = 150\text{мм}$; $l_2 = 350\text{м}$; $d_3 = 200\text{мм}$; $l_3 = 1000\text{м}$ (рис.121).



Витрата води $Q=80\text{ л/с}$. Обчисліть витрати у вставках Q_1, Q_2 і Q_3 , а також втрати напору між вузлами А і В. Використати в розрахунках модуль витрати, а місцеві втрати напору прийняти 5% від втрат по довжині.

Відповідь: $Q_1 = 21,4\text{ л/с}$; $Q_2 = 27,7\text{ л/с}$; $Q_3 = 30,9\text{ л/с}$; $h_w = 5,3\text{ м}$.

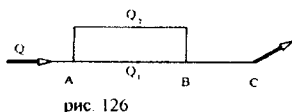


рис. 126

7.7. Обчисліть витрати Q_1 і Q_2 для трубопроводу зі сталевих нових газопровідних труб (рис.126), а також втрати напору між вузлами А і В при відомих: $l_1 = 300\text{ м}$; $l_2 = 400\text{ м}$; $d_1 = 150\text{ мм}$; $d_2 = 100\text{ мм}$; сумарна витрата води

$Q=15\text{ л/с}$. Використати залежність (7.3.) і прийняти місцеві втрати напору 5% від втрат по довжині.

Відповідь: $Q_1 = 11,65\text{ л/с}$; $Q_2 = 3,35\text{ л/с}$; $h_w = 1,09\text{ м}$.

7.8. Визначте потрібний напір H , при якому витрата наприкінці трубопроводу (рис.127)

$Q_B = 50\text{ л/с}$ при відборі води у вузлі А $Q_A = 50\text{ л/с}$. Дані для розрахунку: $l_1 = 300\text{ м}$; $d_1 = 225\text{ мм}$; $l_2 = 150\text{ м}$; $d_2 = 125\text{ мм}$; $l_3 = 250\text{ м}$; $d_3 = 150\text{ мм}$; $l_4 = 100\text{ м}$; $d_4 = 175\text{ мм}$. Місцевими витратами напору знехтувати. Труби прийняти не нові сталеві, а розрахунок провести з використанням формули Дарсі-Вайсбаха. Попередньо величину λ визначити за формулою $\lambda = 0,021/d^{1/4}$. При $V \geq 1,2\text{ м/с}$ зону опору вважати квадратичною.

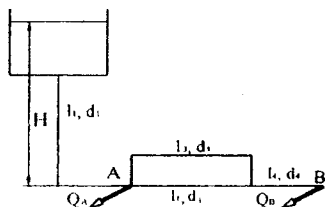


рис. 127

не нові сталеві, а розрахунок провести з використанням формули Дарсі-Вайсбаха. Попередньо величину λ визначити за формулою $\lambda = 0,021/d^{1/4}$. При $V \geq 1,2\text{ м/с}$ зону опору вважати квадратичною.

Відповідь: $H = 21,9\text{ м}$.

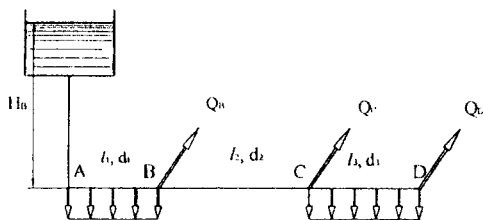


рис. 128

$l_2 = 400\text{ м}$; $d_2 = 250\text{ мм}$; $l_3 = 200\text{ м}$; $d_3 = 200\text{ мм}$. Наприкінці трубопроводу має бути вільний напір $h_B = 10\text{ м}$. Місцеві втрати прийняти 10% від втрат по довжині.

Відповідь: $H_B = 12,7\text{ м}$.

7.9. Яку висоту H повинна мати водонапірна вежа (рис.128), щоби забезпечити витрати у вузлах: В - 20 л/с ; С - 15 л/с ; D - 10 л/с і шляхову витрату на ділянках 1 і 3 з інтенсивністю $q=0,5\text{ л/с}\cdot\text{м}$? Трубопровід складається з трьох ділянок не нових сталевих електрозварних труб: $l_1 = 300\text{ м}$; $d_1 = 300\text{ мм}$;

7.10. Обчисліть витрати Q_1 і Q_2 у відгалуженнях BC і BD (рис.122) від магістрального трубопроводу, складеного із сталевих не нових електрозварних труб. Дані до розрахунку: $l_1 = 1500\text{м}$; $d_1 = 20\text{мм}$; $l_2 = 1000\text{м}$; $d_2 = 150\text{мм}$; $l_3 = 800\text{м}$; $d_3 = 150\text{мм}$; $z_B = 20\text{м}$; $z_C = 25\text{м}$; $z_D = 10\text{м}$. Водонапірна вежа забезпечує напір $H = 50\text{м}$.

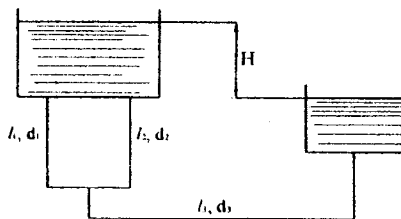


рис. 129

$l_2 = 160\text{м}$; $d_2 = 150\text{мм}$; $l_3 = 200\text{м}$; $d_3 = 200\text{мм}$.

Відповідь: $Q_1 = 7,1\text{л/с}$; $Q_2 = 16,7\text{л/с}$; $Q_3 = 23,8\text{л/с}$.

7.12. Два резервуари А і Б з'єднані трубопроводом, що складається з не нових чавунних труб класу А. У точці С відбирається вода у кількості $Q_C = 10\text{л/с}$ (рис. 130). Вихідні дані до розрахунку такі:

$H_1 = 6,2\text{м}$; $H_2 = 4\text{м}$; $z_B = 2,4\text{м}$; $z_D = 1,6\text{м}$; $l_1 = 100\text{м}$; $d_1 = 150\text{мм}$;

$l_2 = 160\text{м}$; $d_2 = 100\text{мм}$. Які будуть витрати води на ділянках 1 і 2?

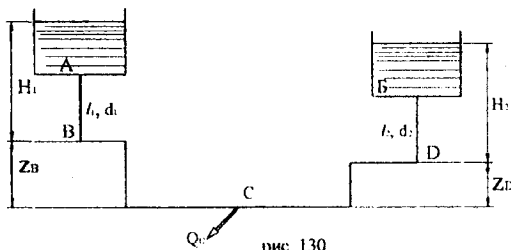


рис. 130

Відповідь: $Q_1 = 2,53\text{л/с}$; $Q_2 = 7,47\text{л/с}$.

7.13. У два вузли кільцевого трубопроводу, що складається з нових сталевих електро-зварник прямошовних труб, подається вода в кількості $Q_C = 20\text{л/с}$ і $Q_D = 30\text{л/с}$ (рис. 123). Обчисліть потрібний напір H в точці А і витрати на ділянках при таких вихідних даних: $l_1 = 400\text{м}$; $d_1 = 200\text{мм}$; $l_2 = 1000\text{м}$; $d_2 = 150\text{мм}$; $l_3 = 1000\text{м}$; $d_3 = 100\text{мм}$; $l_4 = 500\text{м}$; $d_4 = 75\text{мм}$. Втрати напір на місцеві опори прийняти 5% від втрат по довжині.

Відповідь: $Q_1 = 50\text{л/с}$; $Q_2 = 29,7\text{л/с}$; $Q_3 = 20,3\text{л/с}$; $Q_4 = 9,7\text{л/с}$; $H = 82\text{м}$.

7.14. Обчисліть перепад тиску в газопроводі довжиною $l = 5\text{км}$, діаметром $d = 200\text{мм}$ при об'ємній витраті $Q = 14400\text{м}^3/\text{добу}$ ($\rho = 0,7\text{кг/м}^3$; $R = 520\text{Дж/кг}^\circ\text{К}$) і кінцевому манометричному тискові $p_{2\text{м}} = 0,6\text{МПа}$. Температура $T = 280\text{К}$; атмосферний тиск $p_{\text{атм}} = 101325\text{Па}$. Коефіцієнт гідрравлічного тертя прийняти $\lambda = 0,017$.

Відповідь: $\Delta p = p_1 - p_2 = 291\text{кПа}$.

7.15. Визначте, яку кількість газу можна подати по газопроводу, укладеному з труб діаметром 426 мм, на відстань $l = 154$ км. Абсолютний тиск на викиді компресорної станції $p_1 = 4,8$ МПа, в кінці ділянки $p_2 = 3$ МПа. Питома маса газу при атмосферних умовах $\rho = 0,72$ кг/м³, температура $t = 15^\circ$ С, а газова стала $R = 520$ Дж/кг·К.

Відповідь: $Q = 28,5$ м³/с.

7.16. Обчисліть діаметр трубопроводу, призначеного для подачі повітря при температурі 20° С в кількості $Q = 22$ м³/с на відстань $l = 1000$ м. Компресор створює тиск $p_1 = 1,1$ МПа. До кінця трубопроводу підключені пневматичні машини, для нормальної роботи яких потрібен тиск 0,8 МПа.

Відповідь: $d = 123$ мм.

7.17. Визначте величину підвищення тиску в сталевій водогінній трубі, якщо швидкість до гідравлічного удару була 1 м/с. Діаметр труби $d = 500$ мм і товщина стінок $\delta = 5$ мм. Температура води 20° С.

Відповідь: $\Delta p = 1$ МПа.

7.18. У сталевому трубопроводі довжиною $l = 200$ м і діаметром $d = 200$ мм при товщині стінок $\delta = 5$ мм витрата води дорівнює 0,1 м³/с при температурі 20° С. Визначте найменший час закривання засувки, щоби підвищення тиску в кінці трубопроводу, викликане гідравлічним ударом, не перевищувало 400 кПа. Чому дорівнює підвищення тиску при миттєвому закриванні засувки?

Відповідь: $t_{\min} = 3,18$ с; $\Delta p = 3,8$ МПа.

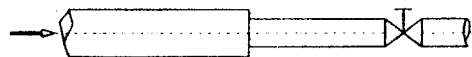


рис. 131

7.19. У кінці системи, що складається з двох послідовно з'єднаних сталевих трубопроводів, встановлена засувка (рис. 131). Обчисліть підвищення тиску перед

нею при її закриванні, якщо час закривання $t = 0,2$ с, витрата $Q = 0,02$ м³/с. Діаметри і довжини трубопроводів: $d_1 = 200$ мм; $l_1 = 100$ м; $d_2 = 100$ мм; $l_2 = 200$ м. Визначте також найменший час закривання засувки для недопущення прямого удару. Товщина стінок труб $\delta = 5$ мм; температура води 20° С.

Відповідь: $\Delta p = 3,26$ МПа; $t_{\min} = 0,48$ с.

7.20. До гідророзподільника, час спрацювання якого $t_2 = 0,03$ с, підводиться олива ($\rho = 900$ кг/м³, $K = 1,35 \cdot 10^9$ МПа) у кількості $Q = 1$ л/с по латунному трубопроводу довжиною $l = 7,5$ м і діаметром $d = 16$ мм. Обчисліть підвищення тиску при гідравлічному ударі, прийнявши товщину стінок $\delta = 1$ мм і початковий тиск у системі $p_0 = 500$ кПа.

Відповідь: $\Delta p = 2,24$ МПа.

ВИТІКАННЯ РІДИН І ГАЗІВ ЧЕРЕЗ ОТВОРИ Й НАСАДКИ

8.1. Основні теоретичні положення

Розрізняють малі і великі отвори. Малими називаються отвори, розміри яких малі порівняно з діючим напором.

При витіканні через малий опір у тонкій стінці (товщина якої $\delta \leq 0,67H$, де H – напір) струмінь стискається, що враховує коефіцієнт стиснення

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

де ω_c – площа стисненого перерізу струменя; ω – площа отвору.

Швидкість при витіканні з малих отворів

$$V = \varphi \sqrt{2gH_{\text{вип}}}, \quad (8.2.)$$

а витрата

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH_{\text{вип}}}, \quad (8.3.)$$

де φ – коефіцієнт швидкості; $H_{\text{вип}}$ – напір витікання або зведений напір, який дорівнює

$$H_{\text{вип}} = H + \frac{p_0 - p}{\rho g};$$

H – геометричний напір над центром отвору; p_0 – тиск на вільній поверхні рідини; p – тиск у середовищі, куди витікає рідина; μ – коефіцієнт витрати.

Для відкритих резервуарів і при витіканні в атмосферу

$$\frac{p_0 - p}{\rho g} = 0 \quad \text{і} \quad H_{\text{вип}} = H.$$

Коефіцієнти φ і μ відповідно дорівнюють

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\zeta}}; \quad (8.4.)$$

$$\mu = \varepsilon \varphi, \quad (8.5.)$$

де ζ – коефіцієнт опору отвору.

Ці коефіцієнти залежать від роду рідини, температури, форми й розмірів отвору, величини напору умов підходу рідини до отвору тощо. Приймається, що в основ-

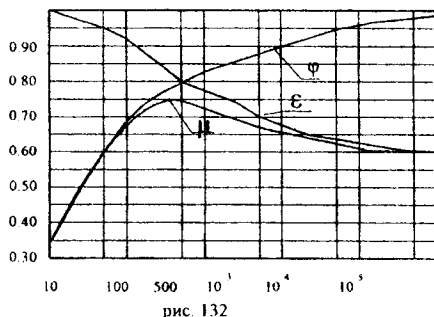


рис. 132

ному вони залежать від числа Рейнольдса (рис. 132). Для $H_{\text{випл}} = H$

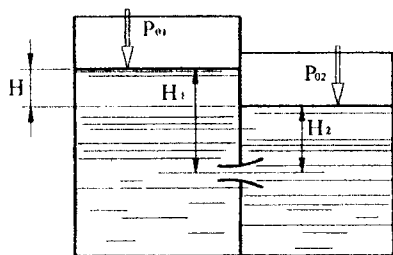


рис. 133

$$Re = \frac{\sqrt{2gHd}}{\nu}, \quad (8.6.)$$

де d – діаметр отвору.

Звичайно при витіканні води через малі отвори при $Re \geq 10^4$ вплив числа Рейнольдса практично відсутній і приймають $\varphi = 0,97$; $\varepsilon = 0,64$; $\zeta = 0,06$; $\mu = 0,62$.

При витіканні (рис. 133) під рівень, швидкість і витрата визначаються за наведеними вище формулами, в яких напір витікання

$$H_{\text{випл}} = H_1 - H_2 + \frac{P_{01} - P_{02}}{\rho g},$$

де p_{01} і p_{02} – відповідно тиски на поверхнях рідин у резервуарах 1 і 2. Для відкритих резервуарів $p_{01} = p_{02} = p_{\text{атм}}$ і

$$H_{\text{випл}} = H_1 - H_2 = H$$

Насадки – це короткі трубки довжиною $(3 \dots 4) d$, приставлені до отвору з метою збільшення витрати або отримання компактного далекобійного струменя. Вони бувають циліндричними, конічно-збіжними або конічно-розбіжними, коноїдними.

Швидкість витікання і витрата визначаються за формулами

(8.2) і (8.3) тільки значення ϕ і μ для різних насадків різні. У додатку 14 наведені значення цих коефіцієнтів.

При достатньо великих розмірах отвору по вертикалі геометричні напори у верхніх і нижніх точках отвору помітно відрізняються. Такі отвори називають великими.

Для отвору прямокутної форми шириною b витрата

$$Q = \frac{2}{3} \mu b \sqrt{2g} (H_2^{\frac{3}{2}} - H_1^{\frac{3}{2}}), \quad (8.7.)$$

де $H_1 = H - \frac{a}{2}$; $H_2 = H + \frac{a}{2}$; a – висота отвору; H – геометричний напір над центром ваги отвору.

Коефіцієнт витрати μ змінюється в широких межах залежно від типу отвору від 0,65 до 0,85.

Витікання при змінному напорі зводиться до знаходження часу пониження рівня рідини або повного часу спорожнення посудини чи резервуара. При витіканні з призматичного або циліндричного резервуара з незмінною площею поперечного перерізу

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} (\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2}), \quad (8.8.)$$

де t – час пониження рівня від положення H_1 до H_2 ; Ω – площа поперечного перерізу резервуара; ω – площа отвору.

Час повного спорожнення

$$T = \frac{2\Omega\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}} = \frac{2H_1\Omega}{\mu\omega\sqrt{2gH_1}} = \frac{2W_1}{Q}, \quad (8.9.)$$

де W_1 – початковий об'єм рідини в резервуарі; Q – витрата при початковому об'ємі.

Швидкість витікання газів через отвори при підтриманні в резервуарі постійного тиску можна обчислити за формулою *Сен-Венана*

$$V = \sqrt{\frac{2k}{k-1} \frac{p_0}{\rho_0} \left[1 - \left(\frac{p}{p_0} \right)^{\frac{k-1}{k}} \right]}, \quad (8.10.)$$

де p_0 і ρ_0 – тиск і питома маса газу в резервуарі (так звані параметри гальмування); p – тиск на виході з отвору; k – показник адиабати.

Якщо тиск у середовищі, куди витікає газ, більший за критичне значення p_{cr} , то на виході $p = p_{am}$. Величина критичного тиску для повітря дорівнює $0,525 p$. При $p = p_{am}$ швидкість витікання досягає критичного значення, рівного швидкості звуку. У цьому випадку швидкість визначається теж за формулою (8.10.), тільки замість p/p_0 підставляється величина

$$\left(\frac{p}{p_0} \right)_{cr} = \left[\frac{2}{(k+1)} \right]^{\frac{k}{k-1}}.$$

8.2. Приклади розв'язку задач

Приклад 8.1. Вода під напором $H = 2 \text{ м} = \text{const}$ витікає в атмосферу через отвір діаметром $d = 1,0 \text{ см}$. Визначити швидкість витікання і витрату води (при 20°C).

Розв'язання. Визначаємо число Рейнольдса за формулою

$$Re = \frac{\sqrt{2gHd}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3}}}{10^{-6}} = 62642.$$

При $Re > 10^4$ можна приймати значення коефіцієнтів ϕ і μ постійними і рівними відповідно $0,97$ і $0,62$. Тоді швидкість витікання за формулою (8.2.) $V = 0,97 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 6,08 \text{ м/с}$.

Витрата становитиме

$$Q = 0,82 \frac{3,14(10 \cdot 10^{-3})^2}{4} \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 2} = 4 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с} = 0,4 \text{ л/с}.$$

Приклад 8.2. Визначте витрату і швидкість витікання нафти з резервуара через отвір діаметром 1 см і через коноїдний насадок того ж діаметра при напорі 4 м (кінематична в'язкість нафти $2 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$).

Розв'язання. Оскільки витікає в'язкий продукт, то для вибору коефіцієнтів μ і ϕ треба спочатку визначити число Рейнольдса:

$$Re = \frac{\sqrt{2gHd}}{\nu} = \frac{\sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4 \cdot 0,01}}{2 \cdot 10^{-5}} = 4429.$$

З графіка залежності μ і φ від Re (рис.132) визначимо, що $\mu = 0,66$ і $\varphi = 0,9$. Тоді $V = \varphi \sqrt{2gH} = 0,9 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4} = 7,97 \text{ м/с}$.

Витрата

$$Q = \mu S_u \sqrt{2gH} = 0,66 \cdot 0,785 \cdot 0,01^2 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4} = 4,59 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с}.$$

При витіканні через коноїдальний насадок ($\mu = \varphi = 0,9$)

$$Q = 0,9 \cdot 0,785 \cdot 0,01^2 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4} = 6,26 \cdot 10^{-4} \text{ м}^3/\text{с},$$

а

$$V = 0,9 \sqrt{2 \cdot 9,81 \cdot 4} = 7,97 \text{ м/с}.$$

8.3. Задачі для самостійного розв'язку

8.1. Обчисліть витрату і швидкість витікання води при 20°C через круглий отвір діаметром 20 мм в тонкій стінці, якщо глибина занурення центру отвору $H = 2,3 \text{ м}$, а площа посудини набагато більша за площу отвору. Як зміниться витрата і швидкість при під'єднанні до отвору циліндричного насадка?

Відповідь: $Q_1 = 1,31 \text{ л/с}$; $V_1 = 6,52 \text{ м/с}$; $Q_2 = 1,73 \text{ л/с}$; $V_2 = 5,51 \text{ м/с}$.

8.2. Із закритого резервуара витікає вода в атмосферу через зовнішній циліндричний насадок діаметром 8 см. Який тиск потрібно створити на вільній поверхні води, щоби витрата становила 50 л/с? Центр насадка занурений під рівень на глибину $H = 3 \text{ м}$.

Відповідь: $p_a = 44,2 \text{ кПа}$.

8.3. Визначте витрату оливи ($\rho = 900 \text{ кг/м}^3$) при витіканні через круглий отвір з резервуара, в якому тиск дорівнює 500 кПа. Отвір має конічно-збіжний насадок з кутом конусності 13° . Діаметр отвору $d = 2 \text{ см}$. Впливом в'язкості на коефіцієнт витрати знехтувати.

Відповідь: $Q = 9,9 \text{ л/с}$.

8.4. Сполучені послідовно три резервуари (рис. 134) мають в бокових стінках малі отвори площею $\omega = 3,14 \text{ см}^2$ кожний. Вода витікає в атмосферу

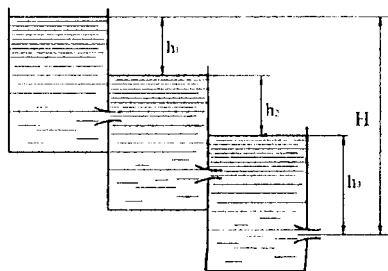


рис. 134

під дією напору $H = 5\text{м}$. Обчисліть витрату і різниці рівнів води h_1, h_2, h_3 у резервуарах.

Відповідь: $Q = 1,1\text{л/с}$; $h_1 = h_2 = h_3 = 1,66\text{м}$.

8.5. Визначте витрату і швидкість витікання нафти з резервуара через отвір з гострими краями діаметром $d = 10\text{мм}$, а також через конічний насадок ($\mu = \varphi = 0,9$) з тим самим діаметром, якщо напір в резервуарі $H = 4\text{м}$, а кінематична в'язкість нафти $\nu = 0,2\text{см}^2/\text{с}$.

Відповідь: $Q_1 = 0,46\text{л/с}$; $V_1 = 7,97\text{м/с}$; $Q_2 = 0,63\text{л/с}$; $V_2 = V_1$.

8.6. У парохолодник через трубу з отворами надходить холодна вода ($t = 20^\circ\text{C}$) з витратою $2,78\text{л/с}$. Тиск води в трубці $p_1 = 1\text{МПа}$. Скільки отворів діаметром 3мм повинно бути у трубці для забезпечення заданої витрати?

Відповідь: 27 отворів.

8.7. Три резервуари, сполучені між собою, (рис. 135), мають у бокових стінках: у першій – циліндричний насадок з $d_1 = 10\text{см}$; у другій – конічний насадок ($\mu_2 = 0,94$) з $d_2 = 20\text{см}$; у третій – отвір з $d_3 = 10\text{см}$. Загальний перепад рівнів $H = 5\text{м}$. Обчисліть витрату й рівні води в кожному з резервуарів. Температура води 20° .

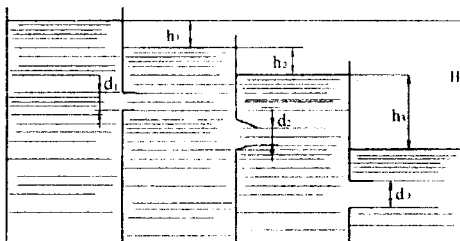


рис. 135

Відповідь: $h_1 = 1,79\text{м}$; $h_2 = 8,5\text{см}$; $h_3 = 3,13\text{м}$.

8.8. Водовипуск бетонної греблі (рис. 136) має пропускати $2\text{м}^3/\text{с}$ води при температу-

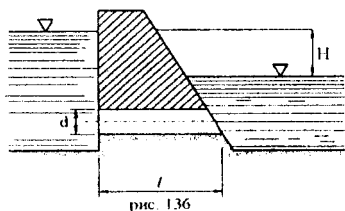


рис. 136

рі 20° і перепаді рівнів верхнього і нижнього б'єфів $H = 10\text{м}$. Довжина водовипуску $l = 10\text{м}$. Обчисліть потрібний діаметр водовипуску.

Відповідь: $d = 500\text{мм}$.

8.9. У бак, розділений на дві частини перегородкою з отвором в ній 100мм (рис. 137), поступає вода в кількості $Q = 80\text{л/с}$. З кожної секції вода витікає через циліндричний насадок, діаметр

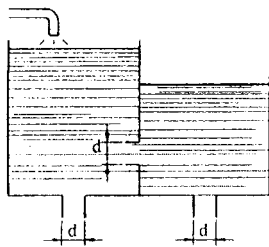


рис. 137

якого такий, як і отвору. Обчисліть витрату через кожний насадок, прийнявши коефіцієнти витрати – насадка 0,82, отвору 0,6.

Відповідь: $Q_{\text{лив}} = 50,3 \text{ л/с}$; $Q_{\text{прав}} = 29,7 \text{ л/с}$.

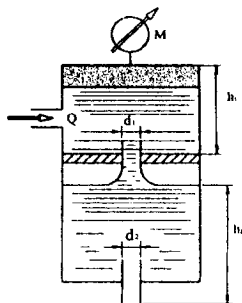


рис. 138

8.10. Вода перетікає з верхньої частини закритого резервуара у нижню через отвір діаметром $d_1 = 30 \text{ мм}$ (рис. 138), а далі через циліндричний насадок з $d_2 = 20 \text{ мм}$ витікає в атмосферу. Обчисліть надлишковий тиск над рівнем води в нижній частині резервуара і витрату через насадок, якщо тиск $p_M = 50 \text{ кПа}$, а положення рівнів $h_1 = 2 \text{ м}$ і $h_2 = 3 \text{ м}$.

Відповідь: $p_0 = 50 \text{ кПа}$; $Q = 3,12 \text{ л/с}$

8.11. З отвору в тонкій стінці діаметром $d = 5 \text{ мм}$ витікає вода при температурі 20°C . Обчисліть витрату води і порівняйте її з витратою гліцерину при однакових умовах витікання. Висота рівня рідини над центром отвору $H = 5 \text{ см}$. Коефіцієнт витрати при витіканні гліцерину в'язкістю $\nu_{\text{гл}} = 1,19 \cdot 10^{-3} \text{ м}^2/\text{с}$ обчислити за формулою $\mu = \sqrt{Re/(25,4 + Re)}$.

Відповідь: $Q_{\text{гл}} = 7,2 \text{ см}^3/\text{с}$; $Q_{\text{в}} = 12,5 \text{ см}^3/\text{с}$; $Q_{\text{в}}/Q_{\text{гл}} = 1,67 \text{ см}^3/\text{с}$.

8.12. Визначте, як зміниться витрата й швидкість витікання води з круглого отвору діаметром $d = 10 \text{ см}$, якщо до нього приставити циліндричний насадок або конічно-розбіжний з кутом конусності $\theta = 6^\circ$ і довжиною $l = 35 \text{ см}$. Напір у центрі ваги отвору $H = 3 \text{ м}$.

Відповідь: $Q_0 = 37,3 \text{ л/с}$; $V_0 = 7,44 \text{ м/с}$; $Q_{\text{ц}} = 49,4 \text{ л/с}$; $V_{\text{ц}} = 6,29 \text{ м/с}$; $Q_{\text{к}} = 50,9 \text{ л/с}$; $V_{\text{к}} = 3,45 \text{ м/с}$.

8.13. Визначте діаметри двох однакових отворів у толоці гідрогаляма (рис. 139), при яких швидкість переміщення толока $u = 0,4 \text{ м/с}$ при навантаженні його силою $F = 25 \text{ кН}$. Діаметр толока $D = 150 \text{ мм}$, ширина манжети $\delta = 15 \text{ мм}$, коефіцієнт

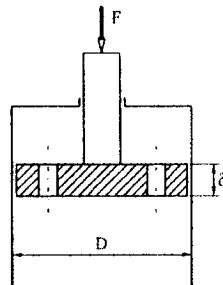


рис. 139

тертя в манжеті $f = 0,12$, питома маса гальмівної рідини $\rho = 870 \text{ кг/м}^3$. Вагою толока і рідини над ним знехтувати.

Відповідь: $d = 10 \text{ мм}$.

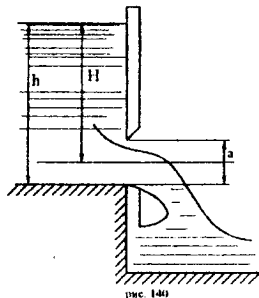


рис. 140

8.14. Визначте витрату через прямокутний щитовий отвір (рис. 140) на каналі шириною $b = 2,5 \text{ м}$ при глибині води у верхньому б'єфі $h = 2 \text{ м}$ і висоті підняття щита $a = 0,8 \text{ м}$. Щит перегороджує всю ширину каналу і поставлений над вертикальним уступом. Коефіцієнт

витрати $\mu = 0,85$. Результат порівняти з витратою, визначеною за формулою (8.3.).

Відповідь: $Q_1 = 10,63 \text{ м}^3/\text{с}$; $Q_2 = 6,95 \text{ м}^3/\text{с}$ при $\mu = 0,62$.

8.15. У дні циліндричного резервуара діаметром $D = 0,5 \text{ м}$ є отвір, а до другого отвору, такого ж діаметра, приєднано зовнішній циліндричний насадок. Яким повинен бути цей діаметр, щоб рівень води в резервуарі підтримувався на висоті $H = 1,2 \text{ м}$ при витраті $Q = 30 \text{ л/с}$? Обчисліть також час спорожнення резервуара через насадок після припинення припливу води в резервуар.

Відповідь: $d = 7,4 \text{ см}$; $t = 27,5 \text{ с}$.

8.16. Нафта витікає з циліндричного резервуара діаметром $D = 1,5 \text{ м}$ через отвір у дні діаметром $d = 32 \text{ мм}$ при початковому напорі $H_1 = 2 \text{ м}$. Визначте час, за який з резервуара витече половина об'єму нафти. Кінематична в'язкість нафти $\nu = 1,4 \text{ см}^2/\text{с}$.

Відповідь: $t = 604 \text{ с}$.

8.17. Обчисліть діаметр отвору в дні резервуара квадратної основи $1 \times 1 \text{ м}^2$, при якому вся рідина, залита в резервуар до рівня $H = 1,5 \text{ м}$, витече за 30 хв . Як зміниться час спорожнення, якщо до отвору приєднати насадок довжиною $l = 50 \text{ см}$? Прийняти: коефіцієнт гідравлічного тертя $\lambda = 0,025$; коефіцієнт витрати отвору $\mu = 0,62$.

Відповідь: $d = 2,51 \text{ см}$; $T = 913 \text{ с}$.

8.18. Для визначення продуктивності вентилятора потік повітря спрямовується у великий закритий бак, у боковій стінці якого є отвір діаметром 100 мм . Всередині бака підтримується надлишковий тиск 400 мм вод.ст. і температура 15°C . Обчисліть об'ємну і масову продуктивність вентилятора. Атмосферний тиск дорівнює 760 мм рт.ст.

Відповідь: $Q = 0,383 \text{ м}^3/\text{с}$; $m = 0,486 \text{ кг/с}$.

8.19. З резервуара великих розмірів під тиском p_1 виходить через малий отвір повітря при температурі 15°C ($\rho_1 = 1,225 \text{ кг/м}^3$). Яка буде швидкість витікання при умові максимальної зміни питомої маси на 5%

$$\left(\frac{\rho_1 - \rho_{\text{ам}}}{\rho_{\text{ам}}} = 0,05 \right)?$$

Витікання прийняти як адіабатний процес, тобто $\frac{p_1}{\rho_1^k} = \frac{p_{\text{ам}}}{\rho_{\text{ам}}^k}$.

Вказівка. Швидкість витікання $V = \sqrt{\frac{2(p_1 - p_{\text{ам}})}{\rho}}$, атмосферний тиск $p_{\text{ам}} = 98100 \text{ Па}$.

Відповідь: $V = 106 \text{ м/с}$.

8.20. Повітря знаходиться в резервуарі під тиском $p_0 = 108 \text{ кПа}$ при температурі $t_0 = 27^\circ \text{C}$ і витікає крізь отвір діаметром 100 мм в атмосферу ($p_{\text{ат}} = 101325 \text{ Па}$). Обчисліть швидкість витікання і масову витрату повітря. Порівняйте з результатом обчислення за формулою для нестисливої рідини.
Відповідь: $V_1 = 104 \text{ м/с}; m_1 = 0,963 \text{ кг/с}; V_2 = 106 \text{ м/с}; m_2 = 0,982 \text{ кг/с}.$

ВЗАЄМОДІЯ ПОТОКУ З ТВЕРДИМИ ТІЛАМИ

9.1. Основні теоретичні положення

Сила дії вільного струменя на тверду перешкоду визначається зміною кількості руху за одиницю часу внаслідок відхилення потоку перешкодою. При цьому впливом сили ваги можна знехтувати.

Відповідно до рис. 137 сила реакції стінки

$$R = \frac{(m_1 V_1 \cos \alpha_1 + m_2 V_2 \cos \alpha_2) - m V}{\cos \beta}, \quad (9.1.)$$

де m, m_1, m_2 – відповідно масові витрати в контрольних перерізах.

Якщо вісь струменя є віссю симетрії твердої перешкоди, тобто $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha$

то $m_1 = m_2 = 0,5m$; $V_1 = V_2 = V$; $\beta = 0$ і, оскільки сила дії $P = -R$, то

$$P = mV(1 - \cos \alpha) = \rho QV(1 - \cos \alpha). \quad (9.2.)$$

При набіганні потоку на плоску стінку, розміщену перпендикулярно до напрямку струменя

$$P = \rho QV = \rho V^2 \omega, \quad (9.3.)$$

де ω – площа живого перерізу струменя.

Найбільша сила дії

$$P = 2 \rho V^2 \omega \quad (9.4.)$$

буде при $\alpha = 180^\circ$ (рис. 142). Таку форму мають лопаті активної гідротурбіни.

Якщо перешкода переміщується зі швидкістю u і цей напрям

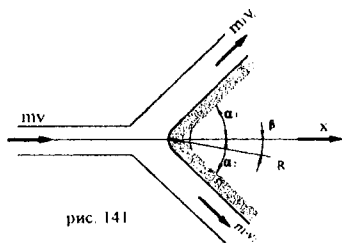


рис. 141

збігається з напрямом струменя, то формула (9.3.), наприклад, запишеться

$$P = \rho(V-u)^2 \omega. \quad (9.5.)$$

Сила, з якою потік рідини діє на стінки, що його обмежують (рис. 143), дорівнює

$$P = \rho Q(V_1 - V_2) + P_1 + P_2 + G, \quad (9.6.)$$

де P_1 і P_2 – сили тиску в перерізах 1 і 2; G – вага рідини, що заповнює канал між перерізами 1 і 2.

Останній член рівняння (9.6.) не відіграє істотної ролі

і ним звичайно нехтують.

При русі твердого тіла в рідині або газі виникає опір, для подолання якого треба прикласти силу. При обтіканні рідиною або газом тіла воно чинить опір рухові, на подолання якого витрачається частина енергії потоку.

Повний опір визначається формулою

$$F = C \omega \frac{\rho V^2}{2}, \quad (9.7.)$$

де C – коефіцієнт опору, який звичайно визначають експериментально. Цей коефіцієнт можна розглядати як суму двох коефіцієнтів – коефіцієнта опору тиску C_p , і коефіцієнта опору тертя C_f ; ω – характерна площа тіла; V – характерна швидкість.

Отже, відповідно до (9.7.) опір тиску дорівнює

$$F_p = C_p \omega \frac{\rho V^2}{2}, \quad (9.8.)$$

а опір тертя

$$F_f = C_f \omega \frac{\rho V^2}{2} \quad (9.9.)$$

Коефіцієнт опору тиску теж знаходиться дослідом. Значення

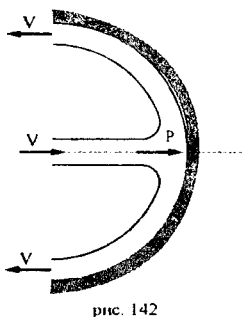


рис. 142

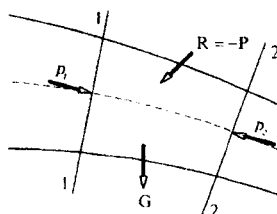


рис. 143

його для деяких тіл наведені в додатку 15.

Для визначення коефіцієнта тертя при повздовжньому обтіканні гладкої пластини довжиною l використовують формулу Кармана

$$C_f = 0,072 Re^{-0,2}, \quad (9.10.)$$

або формулу Шліхтинга

$$C_f = 0,455 (\lg Re)^{-2,58}. \quad (9.11.)$$

Формула Альтишуля

$$C_f = 0,03 \left(\frac{A_r}{l} + \frac{83}{Re} \right)^{0,2} \quad (9.12.)$$

враховує шорсткість пластини.

У формулах (9.10.) – (9.12.) число Рейнольдса

$$Re = \frac{Vl}{\nu} \quad (9.13.)$$

9.2. Приклади розв'язку задач

Приклад 9.1. Визначити силу тиску струменя води на вертикальну стінку, якщо струмінь, який на неї набігає, спрямований під кутом $\theta = 30^\circ$. Швидкість струменя $V = 6 \text{ м/с}$, а площа живого перерізу $\omega = 0,005 \text{ м}^2$.

Розв'язання. В даному випадку сила тиску струменя

$$P = \rho \omega V \sin \theta = 1000 \cdot 0,005 \cdot 6^2 \sin 30^\circ = 90 \text{ Н}.$$

Приклад 9.2. Обчислити силу, з якою струмінь води діє на опуклу робочу поверхню клапана (рис. 141). Площа поперечного перерізу струменя 79 см^2 , витрата води 20 л/с , кут $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha = 45^\circ$.

Розв'язання. Рівняння кількості руху запишемо так:

$$\rho Q_1 V_1 \cos \alpha + \rho Q_2 V_2 \cos \alpha - \rho Q V + N = 0.$$

Враховуючи, що поверхня симетрична,

тоді $Q_1 = Q_2 = 0,5 Q$.

$$N = \rho Q V - \rho Q V \cos \alpha = \rho Q V (1 - \cos \alpha).$$

Оскільки $V = Q/S$, то

$$N = \rho \frac{Q^2}{\omega} (1 - \cos \alpha) = 1000 \frac{0,02^2}{79 \cdot 10^{-4}} (1 - \cos 45^\circ) = 14,8 \text{ Н}$$

Приклад 9.3. На коловий циліндр, вісь якого паралельна до вектора швидкості, набігає потік води при 4°C зі швидкістю 5 м/с . Визначити величину опору тиску при діаметрі циліндра $d = 10 \text{ см}$ і $l/d = 4$.

Розв'язання. Площа живого перерізу циліндра

$$\omega = \frac{\pi d^2}{4} = \frac{3,14 \cdot 0,1^2}{4} = 0,00785 \text{ м}^2.$$

Перевіримо число Рейнольдса

$$Re = \frac{Vl}{\nu} = \frac{4Vd}{\nu} = \frac{4 \cdot 5 \cdot 0,1}{10^{-6}} = 2 \cdot 10^6.$$

З додатку 15 при $l/d = 4$ і $Re > 10^5$ коефіцієнт опору тиску $C_p = 0,87$. Тоді за формулою (9.8.)

$$F_p = 0,87 \cdot 0,00785 \cdot \frac{1000 \cdot 5^2}{2} = 85,4 \text{ Н}.$$

9.3. Задачі для самостійного розв'язку

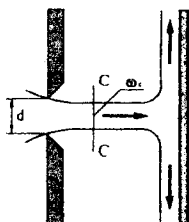


рис. 144

9.1. Визначте силу удару струменя води P об вертикально поставлену пластину (рис. 144) під напором $H = 20 \text{ м}$. Струмінь витікає з отвору діаметром $d = 116 \text{ мм}$ у тонкій стінці. Питомі маса води $\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: $P = 2,5 \text{ кН}$.

9.2. Визначте за даними попередньої задачі силу тиску на пластину, вигнуту по дузі кола з кутом 135° (рис. 145).

Відповідь. $P = 4,6 \text{ кН}$.

9.3. У струмін з витратою $Q_i = 20 \text{ л/с}$ і швидкістю $V_i = 25 \text{ м/с}$ введена пластина під кутом $\varphi = 60^\circ$ до осі струменя (рис. 146).

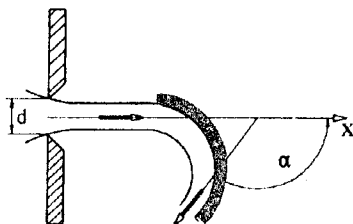


рис. 145

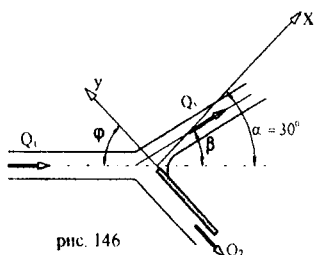


рис. 146

Обчисліть силу P дії струменя води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) на пластину і витрати Q_2 і Q_3 при куті відхилення струменя від початкового напрямку $\beta = 15^\circ$. Вагою рідини і тертям знехтувати.

Відповідь: $Q_2 = 6,51$ і $Q_3 = 13,49 \text{ л/с}$; $P = 107,3 \text{ Н}$.

9.4. Струмінь води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) витікає з конічного насадку діаметром $d = 150 \text{ мм}$ і набігає

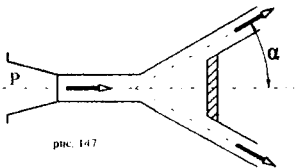


рис. 147

на перешкоду з силою $P = 20 \text{ кН}$. Обчисліть витрату води Q і тиск p перед насадком, якщо перешкода ділить струмінь на дві симетричні частини з відхиленням $\alpha = 60^\circ$ (рис. 147). Коефіцієнт витрати конічного насадку $\mu = 0,98$.

Відповідь: $Q = 0,84 \text{ м}^3/\text{с}$; $p = 1,18 \text{ кПа}$.

9.5. Обчисліть силу P , яка діє на неповністю відкриту засувку в трубі діаметром $d = 200 \text{ мм}$ (рис. 148). Ступінь відкриття засувки $n = \omega_2/\omega_1 = 0,2$; витрата води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) $Q = 100 \text{ л/с}$; тиск перед засувкою $p = 200 \text{ кПа}$.

Відповідь: $P = 5382 \text{ Н}$.

9.6. Обчисліть силу P , з якою струмінь води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) діє на кульовий хлипак з опуклою і вгнутою робочою поверхнею (рис. 149). Площа живого перерізу струменя $\omega_0 = 79 \text{ см}^2$, витрата води $Q_0 = 20 \text{ л/с}$; $\alpha = 45^\circ$.

Відповідь: $P_{\text{опук}} = 14,8 \text{ Н}$; $P_{\text{вгл}} = 86,4 \text{ Н}$.

9.7. По трубі діаметром $d = 50 \text{ мм}$ тече вода ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) зі швидкістю $V = 3 \text{ м/с}$. Визначте силу дії потоку рідини на коліно (рис. 150), якщо надлишковий тиск перед ним $p_1 = 10 \text{ кПа}$, а коефіцієнт опору $\zeta = 1,3$. Силою ваги знехтувати.

Відповідь: $P = 45,4 \text{ Н}$.

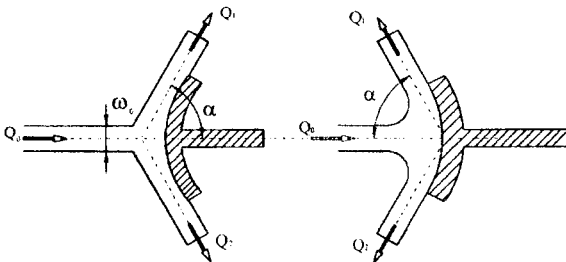
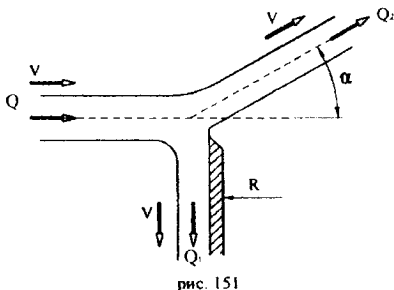


рис. 149

9.8. У струмівні води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$) введено перпендикулярно до його осі пластину, що викликає відхилення частини струменя на кут α (рис. 151). Відомо, що швидкість $V = 30 \text{ м/с}$; витрата $Q = 36 \text{ л/с}$ і $Q_1 = 12 \text{ л/с}$. Обчисліть реакцію R пластини і кут α , знехтувавши тертям і вагою струменя.

Вказівка. Треба використати теорему про зміну кількості руху в проекції на вісь струменя і на напрям, перпендикулярний до цієї осі.

Відповідь: $R = 456,5 \text{ Н}$; $\alpha = 30^\circ$.

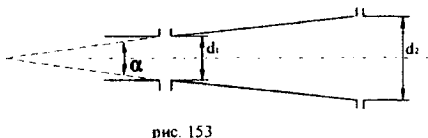


9.10. Обчисліть надлишковий тиск на вході в дифузор (рис. 153) за умови, щоби сила, яка діє на дифузор у напрямі руху, дорівнювала нулю.

Вихідні дані: $Q = 10 \text{ л/с}$; $d_1 = 3 \text{ см}$; $d_2 = 10 \text{ см}$; $\alpha = 60^\circ$.

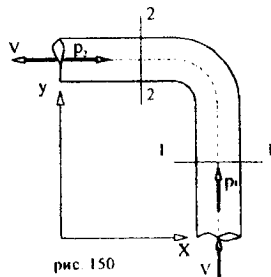
Вказівка. Коефіцієнт опору дифузора прийняти за формулою $\zeta = k_{np} (\omega_2/\omega_1 - 1)^2$, де $k_{np} = f(\alpha)$ береться з відповідної таблиці [1].

Відповідь: $p = -41 \text{ кПа}$, тобто тиск на вході в дифузор повинен бути від'ємним.



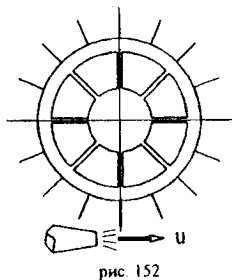
$p_1 = 120 \text{ кПа}$; $Q = 15 \text{ л/с}$; коефіцієнт опору $\zeta = 0,4$.

Відповідь: $P = 698 \text{ Н}$.



9.9. Колесо діаметром 2 м з радіальними плоскими лопатями (рис. 152) обертається під дією сили тиску струменя води ($\rho = 1000 \text{ кг/м}^3$), що витікає з конічно-збіжного насадка діаметром 100 мм (коефіцієнт швидкості $\phi = 0,95$) під тиском $p = 50 \text{ кПа}$. Визначте силу тиску струменя, необхідну для забезпечення швидкості обертання $n = 90 \text{ хв}^{-1}$. Яка при цьому буде потужність струменя?

Відповідь: $P = 84,3 \text{ Н}$; $N = 706 \text{ Вт}$.



9.11. Визначте осьову силу, прикладену до трубопроводу (рис. 154) на ділянці поступового звуження ($d_1 = 100 \text{ мм}$; $d_2 = 50 \text{ мм}$), якщо надлишковий тиск перед звуженням

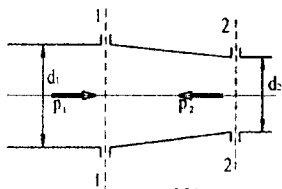


рис. 154

9.12. Горизонтальна стінка, площа якої $\omega = 0,785 \text{ м}^2$ і вага $G = 150 \text{ Н}$, підіймається вгору зі швидкістю $V = 0,5 \text{ м/с}$ під дією знизу вертикального струменя повітря (рис. 155). Яка повинна бути швидкість струменя і його потужність для надання заданої швидкості піднімання стінки? Питома маса повітря $\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$.

Вказівка. Потужність струменя виражається виконаною роботою $(1/2) \rho \omega u^2$, де m – масова витрата; u – швидкість струменя.

Відповідь: $u = 13,1 \text{ м/с}$; $N = 1059 \text{ Вт}$.

9.13. Якою повинна бути швидкість струменя і його потужність, якщо стінка, про яку йшлося в задачі 9.12, опускається під його дією зі швидкістю $V = 0,5 \text{ м/с}$. Використати дані і вказівку задачі 9.12.

Відповідь: $u = 12,1 \text{ м/с}$; $N = 834,4 \text{ Вт}$.

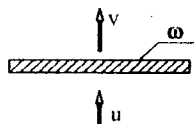


рис. 155

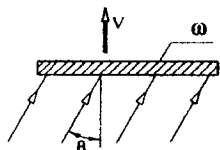


рис. 156

9.14. Визначте швидкість і потужність струменя, нахилоного до вертикалі під кутом $\beta = 30^\circ$ (рис. 156), під дією якого стінка піднімається зі швидкістю $V = 0,2 \text{ м/с}$. Площу і вагу стінки прийняти з задачі 9.12.

Відповідь: $u = 14,8 \text{ м/с}$; $N = 859,4 \text{ Вт}$.

9.15. Яка потрібна швидкість і потужність струменя, нахилоного до вертикалі під кутом $\beta = 30^\circ$, щоби утримати в повітрі горизонтальну стінку (рис. 156). Дані взяти в задачі 9.12.

Відповідь: $u = 14,6 \text{ м/с}$; $N = 1264,4 \text{ Вт}$.

9.16. Носійна поверхня літака $\omega = 15 \text{ м}^2$ нахилена під кутом $\alpha = 20^\circ$ до горизонту (рис. 157) і переміщується зі швидкістю $V = 600 \text{ км/год}$. Обчисліть складові сили тиску повітря, що діятимуть на цю поверхню: вертикальну – підймальну силу і горизонтальну, що дорівнює рушійній силі.

Відповідь: $P_t = 160,7 \text{ кН}$; $P_n = 58,5 \text{ кН}$.

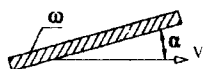


рис. 157

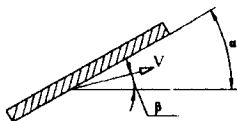


рис. 158

9.17. Носійна поверхня літака нахилена під кутом $\alpha = 30^\circ$ до горизонту, рухається зі швидкістю V , напрям якої з горизонтом утворює кут $\beta = 15^\circ$ (рис. 158). Обчисліть горизонтальну і вертикальну складові сили тиску. Дані взяти з попередньої задачі.

Відповідь: $P_t = 64,8 \text{ кН}$; $P_n = 112,1 \text{ кН}$.

9.18. Плоска пластина довжиною $l = 1 \text{ м}$ і шириною $b = 3 \text{ м}$ та еквівалентною шорсткості $\Delta_s = 0,1 \text{ мм}$ обдувається в ребро потоком повітря ($\rho = 1,2 \text{ кг/м}^3$)

зі швидкістю $V = 50 \text{ м/с}$ при температурі 15°C . Яка виникатиме сила тертя повітря об пластину? Як зміниться результат, якщо вважати пластину гладкою?

Вказівка. Використати формули Кармана і Шліхтінга при $\Delta_r = 0$ та формулу Альтшуля для $\Delta_r = 0,1 \text{ мм}$.

Відповідь: $T = 44,7 \text{ Н}$; за Карманом $T = 32,1 \text{ Н}$; за Шліхтінгом $T = 32,4 \text{ Н}$.

9.19. Обчисліть силу гідродинамічного тиску води в ріці на опору моста обтічної форми. Глибина води перед опорою $H = 4 \text{ м}$; середня швидкість течії $V = 1 \text{ м/с}$; ширина опори $b = 2 \text{ м}$; а довжина її $l = 10 \text{ м}$. Температура води 18° .

Відповідь: $P = 359,5 \text{ Н}$.

9.20. Парашут у вигляді пустотілої півкулі має забезпечити опускання вантажу вагою 1000 Н зі швидкістю, рівною швидкості вільного падіння з висоти 2 м . Яким повинен бути діаметр парашута, якщо його опускання проходить у повітрі при нормальних умовах ($t = 0^\circ \text{C}$; тиск 760 мм.рт.ст.). Кінематична в'язкість повітря при цих умовах $\nu = 0,133 \cdot 10^{-1} \text{ м}^2/\text{с}$.

Відповідь: $d = 6,15 \text{ м}$.

ПОДІБНІСТЬ І МОДЕЛЮВАННЯ ГІДРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

10.1. Основні теоретичні положення

На практиці зустрічаються ситуації, при яких неможливо отримати відповідь за допомогою чисто теоретичних розрахунків. У цьому випадку проводять дослідження на моделях. Очевидно модель повинна бути механічно подібна натурі. Це вимагає, в першу чергу, збереження геометричної подібності, тобто всі розміри моделі мають бути зменшені в однакове число разів. Тоді

$$\frac{l_n}{l_m} = C_l, \quad (10.1.)$$

де l_n – певний лінійний розмір натурі; l_m – те ж саме моделі; C_l – лінійний масштаб або масштаб геометричної подібності.

Крім геометричної подібності вимагається збереження динамічної подібності натурі й моделі, тобто сили, діючі в моделі, повинні бути зменшені порівняно з натурою в однакове число разів. При цьому

$$\frac{F_n}{F_m} = C_F, \quad (10.2.)$$

де C_F – масштаб сил, для якого справедливе співвідношення

$$C_F = C_\rho C_l^2 C_v^2; \quad (10.3.)$$

де $C_\rho = \rho_n / \rho_m$ – масштаб питомих мас; $C_v = u_n / u_m$ – масштаб швидкостей.

Співвідношення (10.3.) виражає загальний закон динамічної подібності *Ньютона*

$$\left(\frac{F}{\rho \omega u^2}\right)_{II} = \left(\frac{F}{\rho \omega u^2}\right)_M, \quad (10.4.)$$

де $F/\rho \omega u^2$ – число Ньютона; ω – характерна площа; u – характерна швидкість.

Збереження геометричної і динамічної подібності означає одночасно й збереження кінематичної подібності, тобто подібності швидкостей, пришвидшень тощо.

Виконання умови (10.4) рідко коли можливе, а тому існують критерії часткової динамічної подібності. При переважній дії сил тертя умова буде

$$\left(\frac{ul}{\nu}\right)_{II} = \left(\frac{ul}{\nu}\right)_M, \quad (10.5.)$$

або $Re_{II} = Re_M$, що означає рівність чисел Рейнольда натури і моделі.

При вирішальній дії сили ваги

$$\left(\frac{u^2}{gl}\right)_{II} = \left(\frac{u^2}{gl}\right)_M, \quad (10.6.)$$

або $Fr_{II} = Fr_M$, тобто має зберігатися рівність чисел Фруда.

У випадку переважної дії сил тиску умовою буде рівність чисел *Ойлера* для натури й моделі $Eu_{II} = Eu_M$, або

$$\left(\frac{p}{\rho u^2}\right)_{II} = \left(\frac{p}{\rho u^2}\right)_M, \quad (10.7.)$$

де p – характерний тиск.

Зауважимо, що за характерний лінійний розмір, швидкість, тиск приймаються різні величини залежно від конкретних умов. Так, наприклад, для труби характерним лінійним розміром буде її внутрішній діаметр; при поздовжньому обтіканні пластини це буде довжина пластини і т.д. Характерною швидкістю може бути місцева, середня, усереднена в часі швидкість і ін. За характерний тиск можна приймати тиск надлишковий, абсолютний, вакуумметричний, суму або різницю тисків тощо.

При виконанні умов подібності всі безрозмірні характеристики

потоків – безрозмірні комбінації різних фізичних величин (напр. коефіцієнт місцевого опору ζ , швидкості витікання φ , витрати μ і ін.), мають в натурі й моделі однакове числове означення.

10.2. Приклади розв'язання задач

Приклад 10.1. Вода тече в трубі діаметром $d_1 = 25$ мм зі швидкістю $V_1 = 0,8$ м/с. Якою буде швидкість руху повітря в трубі діаметром $d_2 = 100$ мм за умови, що обидва потоки подібні. Температура води 20°C , а температура повітря 50°C ($\nu = 0,178 \cdot 10^{-4}$ м²/с).

Розв'язання. Два напірні потоки будуть подібними при однакових числах Рейнольдса, тобто коли

$$\frac{V_1 d_1}{\nu_1} = \frac{V_2 d_2}{\nu_2}. \text{ Звідси швидкість руху повітря } V_2 = V_1 \frac{d_1}{d_2} \frac{\nu_2}{\nu_1}.$$

При значеннях $\nu_1 = 10^{-6}$ м²/с і $\nu_2 = 0,178 \cdot 10^{-4}$ м²/с одержимо

$$V_2 = 0,8 \frac{25}{100} \frac{0,178 \cdot 10^{-4}}{10^{-6}} = 3,56 \text{ м/с}.$$

Приклад 10.2. Олива, кінематична в'язкість якої $\nu = 10^{-4}$ м²/с, витікає з малого отвору діаметром $d = 50$ мм. Визначте діаметр отвору в моделі d_m під час проведення на ній дослідів на воді при температурі 20°C (кінематична в'язкість води при 20°C $\nu_m = 10^{-6}$ м²/с).

Розв'язання. Для забезпечення гідродинамічної подібності витікання в моделі й натурі треба, щоби числа Рейнольдса і Фруда в натурі й моделі були однакові.

Отже,

$$\left(\frac{Vd}{\nu} \right)_n = \left(\frac{Vd}{\nu} \right)_m,$$

або при витіканні крізь отвір

$$\left(\frac{\sqrt{2gHd}}{\nu} \right)_n = \left(\frac{\sqrt{2gHd}}{\nu} \right)_m. \quad (1)$$

Також

$$\left(\frac{V^2}{gd} \right)_H = \left(\frac{V^2}{gd} \right)_M,$$

або

$$\left(\frac{H}{d} \right)_H = \left(\frac{H}{d} \right)_M. \quad (2)$$

З рівнянь (1) і (2) отримаємо $\frac{v_H}{v_M} = \left(\frac{H_H}{H_M} \right)^{1/2} = C_L^{1/2}$.

При використанні на моделі води

$$C_L^{1/2} = 10^{-4}/10^{-6} = 100 \text{ і } C_L^{1/2} = 21,54.$$

Отже, діаметр отвору на моделі

$$d_M = \frac{d_H}{C_L} = \frac{50}{21,54} = 2,31 \text{ мм}.$$

10.3. Задачі для самостійного розв'язання

10.1 Потрібно перевірити в лабораторії опір ділянки водогінної труби з арматурою випробуванням на повітрі. Визначте, з якою швидкістю треба вести продування повітрям, зберігаючи подібність, якщо швидкість руху води в трубі 2 м/с ? Якою буде втрата напору при роботі на воді з зазначеною вище швидкістю, якщо при продуванні повітрям втрата тиску становить 8350 Па ? В'язкість води прийняти $10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, в'язкість повітря прийняти $0,156 \text{ см}^2/\text{с}$ питому масу повітря $1,2 \text{ кг/м}^3$.

Відповідь: $V_* = 31,2 \text{ м/с}$; $h_* = 2,91 \text{ м}$.

10.2. При випробуванні моделі греблі, виконаної у масштабі $1:100$, замірена швидкість після греблі – $0,6 \text{ м/с}$. Якою буде швидкість води після греблі в натурі?

Відповідь: 6 м/с .

10.3. З метою експериментального визначення найвигіднішої форми сопла, змонтованого в кінці повітропроводу, його модель буде випробувана на воді в лабораторії. Яким повинен бути лінійний масштаб, щоб швидкість витікання води була у 15 разів меншою, ніж швидкість повітря? Кінематична в'язкість води $1,14 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, повітря – $0,149 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$.

Відповідь: $0,89$.

10.4. Витрата оливи ($\rho_l = 890 \text{ кг/м}^3$, $\nu_l = 0,2 \text{ см}^2/\text{с}$) через запобіжний

хлипак діаметром 25мм дорівнює 1,65 л/с при перепаді тиску 7 МПа. Як треба змінити діаметр хлипака, щоб при незмінному ступені відкриття він пропускав 0,75л/с оливи питомої маси 900кг/м^3 і в'язкості $0,12 \cdot 10^{-3} \text{ л/с}$? Який при цьому буде перепад тиску?

Відповідь: $d = 18,9\text{мм}$; $\Delta p = 4,48\text{МПа}$.

10.5. Необхідно визначити аеродинамічний опір автомобіля висотою $h = 1,5\text{м}$ шляхом продування його моделі в аеродинамічній трубі. Яким повинен бути розмір моделі h_M для збереження подібності, якщо максимальна швидкість автомобіля $V_H = 180\text{км/год}$, а швидкість продування обмежена величиною $V_M = 60\text{м/с}$? Яка сила лобового опору P діятиме на автомобіль при максимальній швидкості руху, якщо для моделі ця сила $P_M = 1500\text{Н}$?

Відповідь: $h_M = 1,25\text{м}$; $P_H = 2,16\text{кН}$.

10.6. Проведено випробування моделі дискового засуви діаметром $D_M = 250\text{мм}$ при витраті через нього повітря $Q_M = 1,6\text{м}^3/\text{с}$ ($\rho_M = 1,25\text{кг/м}^3$). Замірена втрата тиску $\Delta p_M = 2,7\text{кПа}$, а сила $P_M = 140\text{Н}$. Які будуть втрати напору і діюча сила на натурний засув діаметром $D_H = 2,5\text{м}$ при витраті води $Q_H = 8\text{м}^3/\text{с}$?

Відповідь: $h_H = 0,55\text{м}$; $P_H = 28\text{кН}$.

10.7. Труба Вентурі з вхідним $D = 300\text{мм}$ і звуженим $d = 150\text{мм}$ діаметрами призначена для вимірювання витрати гасу. Дослідження її ведеться водою на моделі, виконаній у масштабі 1:3. Якою повинна бути витрата води Q , якщо витрата гасу в натурній трубі $Q_H = 0,1\text{м}^3/\text{с}$? Кінематична в'язкість води $\nu_M = 10^{-4}\text{см}^2/\text{с}$, гасу – $\nu_H = 4,5 \cdot 10^{-4}\text{см}^2/\text{с}$.

Відповідь: $Q = 7,4\text{л/с}$.

10.8. Використовуючи дані попередньої задачі, обчисліть втрати напору і перепад тиску Δp_H у натурному витратомірі, якщо при випробуванні моделі отримано втрати напору $h_M = 0,2\text{м}$ і $\Delta p_M = 10\text{кПа}$. Питомо маса гасу $\rho_H = 820\text{кг/м}^3$.

Відповідь: $h = 0,45\text{м}$; $\Delta p_H = 18,5\text{кПа}$.

10.9. Запобіжний хлипак діаметром $D_M = 25\text{мм}$ при відкритті $h_M = 2\text{мм}$ пропускає витрату оливи $Q_M = 5\text{л/с}$ при перепаді тиску $\Delta p_M = 1\text{МПа}$. Як треба змінити діаметр хлипака, щоби при збільшенні витрати оливи у 4 рази перепад тиску зріс тільки в два рази. Вважати, що хлипак працює в квадратичній зоні опору.

Відповідь: $D_H = 42\text{мм}$.

10.10. Виходячи з умов попередньої задачі, визначте відкриття хлипака h_H та силу P_H , що діє на нього, якщо сила тиску на хлипак діаметром 25мм $P_M = 150\text{Н}$.

Відповідь: $h_H = 3,35\text{мм}$; $P_H = 850\text{Н}$.

10.11. Вода протікає по трубопроводу діаметром 500мм при температурі

20°C зі швидкістю $0,6\text{ м/с}$. У трубопроводі діаметром 10 см тече олива, динамічна в'язкість якої $\mu = 0,15\text{ Па}\cdot\text{с}$, а питома маса $\rho = 900\text{ кг/м}^3$. Обчисліть витрату оливи, виходячи з умови подібності потоків.

Відповідь: $Q = 3,925\text{ м}^3/\text{с}$.

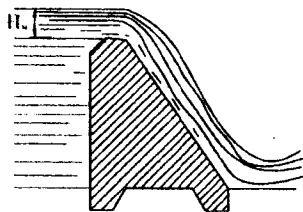


рис. 159

10.12. Водозливна гребля досліджується в лабораторії на геометрично подібній моделі, виконаній у масштабі $1:20$. обчисліть:

1) напір H_M на водозливній моделі (рис.159), якщо в натурі $H_H = 3\text{ м}$;

2) витрату води через водозлив при витраті на моделі $Q_M = 190\text{ л/с}$.

Відповідь: $H_M = 15\text{ см}$; $Q_H = 340\text{ м}^3/\text{с}$.

10.13. Визначте максимальний діаметр моделі мостової опори для визначення особливостей силової взаємодії потоку з мостовою опорою циліндричної форми діаметром $D_H = 6\text{ м}$, якщо швидкість набіжного потоку $V_H = 2\text{ м/с}$, глибина потоку 10 м . Яка повинна бути швидкість води на моделі і сила лобового опору при незмінному значенні коефіцієнта опору $C = 1,2$? Геометричний масштаб моделювання $C_L = 20$.

Відповідь: $D_M = 3\text{ см}$; $V_M = 0,45\text{ м/с}$; $P_M = 8\text{ Н}$.

10.14. Прототип підводного човна повинен розвивати під водою швидкість $V_H = 20\text{ км/год}$ при в'язкості води $\mu = 1,6 \cdot 10^{-3}\text{ Па}\cdot\text{с}$. Досліди проводяться на моделі в масштабі $1:20$ в аеродинамічній трубі при тиску $p_M = 0,6\text{ МПа}$ і температурі 40°C ($\mu_M = 19 \cdot 10^{-6}\text{ Па}\cdot\text{с}$). Обчисліть потрібну швидкість потоку повітря в аеродинамічній трубі і силу опору човна, якщо замірена сила на моделі $P_M = 15\text{ Н}$. Атмосферний тиск $p_{\text{атм}} = 101325\text{ Па}$; газова стала повітря $R = 287\text{ Дж/кг}\cdot\text{К}$.

Відповідь: $V_M = 169\text{ м/с}$; $P_H = 8,32\text{ кН}$.

10.15. Витікання гасу ($\nu_H = 0,045\text{ см}^2/\text{с}$) через отвір діаметром $d_H = 75\text{ мм}$ моделюється на воді ($t = 20^{\circ}\text{C}$) при збереженні в'язкості і гравітаційної подібності. Обчисліть:

1) діаметр отвору для моделі;

2) у якому відношенні мають бути висоти рівнів для натурі і моделі (рис. 160);

3) у якому відношенні при виконанні цих умов знаходяться витрати.



рис. 160

Відповідь: $d_M = 27,5\text{ мм}$; $H_H/H_M = 2,726$; $Q_H/Q_M = 12,27$.

Додаток 1
Фізичні властивості води

$t, ^\circ\text{C}$	$\rho, \text{кг/м}^3$	$\mu, \text{Па}\cdot\text{с}$	$p, \text{Па}$
0	999,8	0,00179	610,9
4	1000	0,00156	812,0
5	999,98	0,00152	870,8
6	999,94	0,00147	993,6
8	999,84	0,00139	1064,9
10	999,7	0,00131	1228,8
12	999,48	0,00124	1403,3
14	999,2	0,00117	1599,5
16	999,88	0,00111	1820,1
18	998,54	0,00106	2068,2
20	998,2	0,00101	2334,9
24	997,32	0,00091	2989
30	995,7	0,000801	4242,3
35	993,9	0,000723	5630
40	992,2	0,000656	7378,5
45	990,2	0,000599	9592,8
50	988,1	0,000549	12341,7
55	985,7	0,000506	15709,27

Додаток 2

Моменти інерції для деяких плоских симетричних фігур

Форма плоскої фігури	Формула моменту інерції
Квадрат	$J = \frac{a^4}{12}$; a – сторона
Прямокутник	$J = \frac{ab^3}{12}$; a – довжина; b – висота
Круг	$J = \frac{\pi d^4}{64}$; d – діаметр
Рівносторонній трикутник	$J = \frac{bh^3}{36}$; h – висота; b – сторона
Трапеція	$J = \frac{a^3 + 4ab + b^3}{36(a+b)}$; a – верхня основа більша; b – нижня основа менша;
Півкруг дугою вниз	$J = \frac{9\pi^2 - 64}{72\pi} R^4$; R – радіус
Еліпс	$J = \frac{\pi a^3 b}{4}$; a – мала піввісь; b – велика піввісь

Додаток 3

Значення абсолютної еквівалентної шорсткості труб

Характеристика труб	Величина $\Delta, \text{мм}$	Характеристика труб	Величина $\Delta, \text{мм}$
Тягнені з кольорових металів, нові, технічно гладкі	0,001	Оцинковані залізні: нові і чисті; після декількох років експлуатації	0,15 0,5
Безшовні сталеві: нові і чисті;	0,014	Чавунні: нові асфальтовані;	0,12
після декількох років експлуатації	0,2	нові без покриття;	0,3
Сталеві зварні:		бувші у використанні;	1
нові і чисті;	0,06	дуже старі	до 0,30
з незначною корозією після очищення;	0,15	Азбестоцементні нові	0,085
помірковано заіржавлені;	0,5	Бетонні: нові з попередньо напруженого бетону;	0,03
старі заіржавлені;	1	нові відцентрові;	0,2
сильно заіржавленні з відкладеннями	3	бувші у використанні; з необробленого бетону	0,5 1...3

Додаток 4

Значення коефіцієнтів місцевих опорів трубопровідної арматури (квадратична зона опору)

Арматура		Арматура	
Приймальні хлипаки помп	6...5	Кран прохідний	2...4
Зворотні хлипаки	6,5...5,5	Кран подвійного регулювання	2...4
Вентиль звичайний	4...16	Шиберна засувка	0,5...1,5
Вентиль із косим шпінделем	2...3	Радіатор двоколонний	2
Засувка (повністю відкрита)		0,12	

Додаток 5

Значення коефіцієнтів A і $\zeta_{\kappa\phi}$ для деяких місцевих опорів

Місцевий опір	A	$\zeta_{\kappa\phi}$
Пробковий кран	150	0,4
Вентиль звичайний	3000	6
Вентиль кутовий	400	0,8
Кульовий хлипак	5000	45
Коліно 90°	130	0,2
Трійник	150	0,3
Різкий поворот труби під кутом 90°	400	1,4
Засувка повне відкриття	75	0,15
Засувка відкрита на 75%	350	0,2
Засувка відкрита на 50%	1300	2,0
Засувка відкрита на 25%	3000	20
Вхід в трубу	30	0,5
Вихід з труби	30	1,0

Додаток 6

Коефіцієнт опору пробкового крана в залежності
від кута повороту

Кут повороту, град.	5	10	15	20	25	30
ζ	0,05	0,31	0,88	1,84	3,45	6,15

Кут повороту, град.	35	40	45	50	55
ζ	11,2	20,7	41	95	275

Додаток 7

Значення коефіцієнта a залежно від центрального
кута повороту труби a

a , град	20	30	40	50	60	70	80
a	0,40	0,55	0,65	0,75	0,83	0,88	0,95

a , град	90	100	120	140	160	180
a	1	1,05	1,13	1,20	1,27	1,33

Додаток 8

Значення коефіцієнта місцевого опору для
повністю відкритого вентиля

Діаметр труби, мм	13	25	50	100
ζ	10,8	6,1	4,6	4,1

Додаток 9

Значення коефіцієнта ζ при різкому повороті труби на 90°

$d, \text{мм}$	20	25	34	39	49
ζ	1,7	1,3	1,1	1	0,83

Додаток 10

Питомий опір $S_{от}, \text{с}^2/\text{м}^6$ при швидкості $l \text{ м/с}$ для нових сталевих водогазопровідних і електрозварних прямошовних чавунних труб

$d, \text{мм}$	Сталеві труби		Чавунні труби
	водогазопровідні	електрозварні	класу А
25	228500	—	—
32	52570	—	—
40	26260	—	—
50	6864	2362	—
65	1940	911,1	2855
80	772,7	431,3	910
90	360,1	224,2	—
100	192,7	119,8	300
125	60,65	53,88	92,9
150	24,35	22,04	35,83
200	—	5,149	7,35
250	—	1,653	2,44
300	—	0,6619	0,94
350	—	0,2948	0,415
400	—	0,1483	0,209
500	—	0,04887	0,065
600	—	0,01957	0,0249

Додаток 11

Поправкові коефіцієнти θ

до питомих опорів для нових сталевих і чавунних труб.

$V, \text{м/с}$	Значення θ для труб		$V, \text{м/с}$	Значення θ и для труб	
	сталевих	чавунних		сталевих	чавунних
0,2	1,24	1,46	1	1	1
0,3	1,16	1,32	1,2	0,99	0,97
0,4	1,11	1,23	1,5	0,97	0,93
0,5	1,08	1,16	2	0,95	0,88
0,6	1,06	1,12	2,5	0,94	0,86
0,7	1,04	1,08	3	0,93	0,84
0,8	1,02	1,05			

Додаток 12

Значення модуля витрати K для ненових сталевих і чавунних труб при $V \geq 1,2 \text{ м/с}$

$d, \text{мм}$	$K, \text{м}^3/\text{с}$ для труб	
	сталевих електрозварних	чавунних класу А
50	0,061	—
65	0,0269	0,0173
75	0,0328	—
80	0,0395	0,0310
100	0,0760	0,0543
115	0,0992	—
125	0,114	0,0983
150	0,180	0,159
175	0,219	—
190	0,306	—
200	0,379	0,340

d , мм	K , м ³ /с для труб	
	сталевих електрозварних	чавунних класу А
225	0,505	—
250	0,676	0,616
300	1,085	1,007
350	1,637	1,513
375	1,925	—
400	2,319	2,137
450	3,174	—
500	4,117	3,840
600	6,523	6,202

Додаток 13

Поправковий коефіцієнт Ψ , що враховує
неквадратичність опору

Труби	Середня швидкість V , м/с					
	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1
сталеві і чавунні	0,84	0,88	0,91	0,95	0,97	0,99
азбестоцементні	0,88	0,91	0,93	0,96	0,98	1

Труби	Середня швидкість V , м/с			
	1,2	1,6	2	3
сталеві і чавунні	1	1	1	1
азбестоцементні	1,01	1,03	1,05	1,07

Додаток 14

Коефіцієнти витікання води з отворів і насадків

Тип отвору або насадка	Значення коефіцієнтів			
	<i>ж</i>	<i>ц</i>	<i>е</i>	<i>μ</i>
Круглий отвір в тонкій стінці	0,06	0,97	0,64	0,62
Зовнішній циліндричний насадок (насадок Вентурі)	0,50	0,82	1	0,82
Внутрішній циліндричний насадок (насадок Борда)	1,0	0,71	1	0,71
Конічно-збіжний насадок з кутом конусності $13^{\circ}24'$	0,06...0,09	0,963	0,982	0,946
Конічно-розбіжний насадок з кутом конусності 8°	3...4	0,45	1	0,45
Коноїдний	0,04	0,98	1	0,98

Примітка. Для конічних насадків коефіцієнти віднесені до вихідного перерізу насадка.

Додаток 15

Значення коефіцієнта опору C_p для тіл простих геометричних форм

Форма тіла	Re	C_p
Диск, нормальний до напрямку потоку	$>10^3$	1,12
Пластина прямокутна довжини l і ширини b , нормальної до напрямку потоку при відношенні l/b :		
1	$>10^3$	1,16
5	$>10^3$	1,20
20	$>10^3$	1,50
Коловий циліндр довжини l і діаметра D , вісь якого нормальна до напрямку потоку при відношенні l/D		
1	$10^3 \dots 10^5$	0,63
5	$10^3 \dots 10^5$	0,74
5	$>5 \cdot 10^5$	0,35
20	$10^3 \dots 10^5$	0,90
Коловий циліндр, вісь якого паралельна до вектора швидкості		
1	$>10^3$	0,91
2	$>10^3$	0,85
4	$>10^3$	0,87
7	>10	0,99
Куля	$10^3 \dots 10^5$	0,47
Куля	$3 \cdot 10^5$	0,20
Пустотіла півкуля:		
угнутість назустріч потоку	$>10^3$	1,33
угнутість позаду	$>10^3$	0,34
Дирижабль	$>2 \cdot 10^5$	0,05

Використана і рекомендована література

1. Альтшуль А.Д., Калицун В.И., Майрановский Ф.Г. и др. Примеры расчетов по гидравлике, –М.: Стройиздат, 1977. –225с.
2. Левицький Б.Ф., Лещій Н.П. Гідравліка. Загальний курс. – Львів: Світ, 1994. – 264с.
3. Мандрус В.І., Лещій Н.П., Зв'ягін В.М. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади розрахунків. – Львів: Світ, 1995. – 264с.
4. Greplowska Z. Zbior zadan z przeplywow pod cisnieniem. Politechnika Krakowska. – Krakow, 1993. – 98 str.
5. Prystaj A. Zadania z hydrodynamiki. Politechnika Krakowska. – Krakow, 1993. – 238 str.

**Серія “Вища освіта в Україні”
Заснована в 1999 р.**

Навчальне видання

**Завойко Богдан Михайлович
Лещій Нестор Павлович**

**ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА РІДИН І ГАЗІВ:
ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ ТА
ЗАДАЧІ**

Навчальний посібник

**Відповідальний за випуск *В. М. Піча*
Коректор *І. А. Марченко*
Дизайн та комп'ютерна верстка *О. М. Безотосний***

**Підписано до друку з оригінал-макета 25.11.2003.
Формат 60х84/16. Папір офсетний. Гарнітура Таймс Нью Роман..
Друк офсетний. Умовн. друк. арк.8. Умовн. фарбовід. 9,2. Обл.-вид. арк. 7,3.**

**Видавництво «Новий Світ–2000»
а/с № 2623, м. Львів–60, 79060, Україна,
тел/факс: 295-41-46
E-mail: novyisvit2000@org.lviv.net
Свідцтво про видавничу діяльність і розповсюдження видавничої продукції:
серія № 59 ДК від 25.05.2000 року, видане Державним комітетом інформаційної
політики, телебачення та радіомовлення України.**

Оригінал-макет виготовлений В. М. Піча.

**Віддруковано в поліграфічному центрі СПД ФО “А. А. Краснощоких”.
79026, м. Львів, вул. В. Великого, 4.**

ТЕХНІЧНА МЕХАНІКА
РІДИН І ГАЗІВ:
ОСНОВНІ ТЕОРЕТИЧНІ
ПОЛОЖЕННЯ ТА ЗАДАЧІ

ISBN 966-7827-44-5



9 789667 827441

Вища освіта в Україні