

БУДІВЕЛЬНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра «Будівельна механіка та гідравліка»

І.М. Єгорова
ГІДРАВЛІКА
Конспект лекцій

Харків - 2013
Єгорова І.М. Гідравліка: Конспект лекцій. – Харків:
УкрДАЗТ, 2013. – 86 с.

Розглянуто рівновагу і рух нестиснутої рідини, гідравлічні опори, рух води в трубах і відкритих руслах, а також осідання твердих частинок у рідині та фільтрування рідини. Наведено основні методи розрахунку напірних трубопроводів, каналів і безнапірних водопровідних труб при рівномірному русі води, розрахунок отворів і водозливів.

Лл. 36, табл. 3, бібліогр.: 8 назв.

Конспект лекцій розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Будівельна механіка та гідравліка» 12 травня 2011 р., протокол № 11.

Рекомендується для студентів спеціальності «Залізничні споруди та колійне господарство» всіх форм навчання.

Рецензент:

доц. В.А. Борщов

І.М. Єгорова

ГІДРАВЛІКА

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

Відповідальний за випуск Єгорова І.М.

Редактор Ібрагімова Н.В.

Підписано до друку 08.06.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,75. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ

Кафедра «Будівельна механіка та гідравліка»

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ З ДИСЦИПЛІНИ ГІДРАВЛІКА
для студентів спеціальності «Будівництво залізниць, колія та ко-
лійне господарство» всіх форм навчання

ХАРКІВ 2013

Єгорова І.М. Гідравліка: Конспект лекцій. – Харків: УкрДАЗТ, 2013. – 86 с.

Розглянуто рівновагу і рух нестиснутої рідини, гідравлічні опори, рух води в трубах і відкритих руслах, а також осідання твердих частинок у рідині та фільтрування рідини. Наведено основні методи розрахунку напірних трубопроводів, каналів і безнапірних водопровідних труб при рівномірному русі води, розрахунок отворів і водозливів.

Іл. 36, табл. 3, бібліогр.: 8 назв.

Конспект лекцій розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри «Будівельна механіка та гідравліка» 12 травня 2011 р., протокол № 11.

Рекомендується для студентів спеціальності «Залізничні споруди» всіх форм навчання.

Рецензент:
доц. Борщов В.А

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Основні фізичні властивості рідини	4
2 Гідростатика	9
2.1 Гідростатичний тиск і його властивості	9
2.2 Основне рівняння гідростатики. Поверхні рівного тиску	11
2.3 Епюри гідростатичного тиску	13
2.4 Сила тиску рідини на плоскі поверхні	15
2.5 Сили тиску рідини на криволінійні поверхні	19
3 Основи гідродинаміки	23
3.1 Основні поняття	23
3.2 Рівняння нерозривності та рівняння Бернуллі	24
3.3 Втрати енергії	30
4 Основи гідравлічного розрахунку трубопроводів	34
5 Витікання рідини крізь отвори і насадки	41
6 Рівномірний сталий рух рідини у відкритих потоках	45
7 Нерівномірний сталий рух води у відкритих руслах	48
7.1 Основні поняття нерівномірного руху води	48
7.2 Визначення координат вільної поверхні	52
8 Водозливи	56
8.1 Гідравлічний стрибок	58
8.2 Спряження б'єфів	59
8.3 Гідравліка малих мостів і труб	61
9 Фільтрація	64
10 Основи гідрології і гідрометрії	66
10.1 Гідрологія	66
10.2 Гідрометрія	69
Список літератури	65
Додаток А. Вихідні дані для розрахунків коротких трубопроводів	72
Додаток Б. Значення коефіцієнтів місцевого опору	80
Додаток В. Вихідні дані для розрахунків РГР № 2	81
Додаток Г. Значення величин C, λ, a, K і b для круглих труб, розрахованих за повною формулою П.М. Павловського при $n=0,012$ (для розмірів у метрах і секундах)	86

ВСТУП

Гідравліка – це наука, що визначає закони рівноваги і руху рідини та газу, розробляє методи застосування цих законів для вирішення практичних питань.

Гідравліка складається з таких розділів: гідростатика, кінематика рідини і гідродинаміка. У гідростатиці розглядаються закони рівноваги рідини, у кінематиці – зв'язки між геометричними характеристиками руху і часом (це швидкість, прискорення), а у гідродинаміці – рух рідини і сили, які спричиняють цей рух.

Термін «гідравліка» походить від двох грецьких слів «ὕδωρ» – вода і «αἰλός» – трубка і спочатку означав вчення про водоводи. Зараз гідравліка визначає рух різноманітних рідин у трубах, каналах, річках, у гідротехнічних спорудах тощо. Водночас гідравліка є основою гідравлічних розрахунків систем водопостачання, водовідведення, теплопостачання, опалення, вентиляції, насосних і компресорних станцій, гідротехнічних і гідромеліоративних споруд, систем дорожнього водовідведення.

Гідравліка як прикладна наука потрібна для розрахунків при проектуванні мереж і споруд систем водопостачання, водопропускних споруд залізниць, водовідводу від насипів і виїмок, дренажних систем, каналізації, гідротехнічних споруд, мостів, а також для розрахунків транспортування будівельних розчинів трубами тощо.

1 ОСНОВНІ ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РІДИНИ

Рідина – це суцільне середовище, яке може легко змінювати свою форму під дією навіть незначних сил.

Текучість. Це найхарактерніша властивість рідини, легкорухливість її частинок, яка зумовлена неспроможністю рідини сприймати дотичні напруження в стані спокою. Рідина не може зберігати свою форму, вона набирає форми того резервуара, в якому вона міститься.

Рідини бувають *стисливі* та *нестисливі*. До нестисливих рідин належать вода, нафта, олія та інші (це краплинні рідини). Стисливими рідинами є повітря та інші газу. Краплинні рідини

мають власний об'єм, що займає частину об'єму резервуара. Стисливі рідини такої властивості не мають і заповнюють весь об'єм закритого резервуара. Краплинні рідини також мають (на відміну від газів) вільну поверхню.

Густина рідини (питома маса). Густиною середовища називають границю відношення маси нескінченно малої частинки Δm навколо певної точки до її об'єму ΔW , коли останній наближується до нуля:

$$\rho = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta W} \quad (1.1)$$

або для безперервного середовища

$$\rho = m/W .$$

Значення густини деяких рідин, кг/м³:

Вода при t=0°C	999,9
Вода при t=4°C	1000,0
Вода при t=20°C	998,2
Вода при t=40°C	992,2
Вода при t=99°C	952,1
Вода морська при t=20°C	1002...1029
Нафта при t=20°C	850...950
Ртуть при t=20°C	13547
Масло для гідравлічних систем	до 850
Повітря при атмосферному тиску і температурі 20°C (стандартні умови)	1,2

Стисливість рідини. Густина нестисливої рідини мало змінюється при зміні тиску. Це характеризується залежністю

$$\frac{d\rho}{\rho} = \beta_p d_p = \frac{d_p}{E_{pid}}, \quad (1.2)$$

де β_p – коефіцієнт об'ємного стискання. Для води $\beta_p = 5 \cdot 10^{-6}$ см²/Н = $5 \cdot 10^{-7}$ 1/кПа;

E_{pid} – модуль об'ємної пружності рідини (для води $E_{pid} = 2 \cdot 10^6$ кПа).

Температурне розширення рідини. Густина також мало змінюється зі зміною температури:

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\beta_t dt, \quad (1.3)$$

де β_t – температурний коефіцієнт об'ємного розширення. Для води при температурі $t = 10 \dots 20^\circ \text{C}$ $\beta_t = 0,00015 \text{K}^{-1}$.

Густина води має максимум при $t = 4^\circ \text{C}$, при 0°C вода переходить у твердий стан (крига), а при $t = 100^\circ \text{C}$ у газовий (пара).

Питома вага. У гідравліці також використовують таку характеристику рідини, як питома вага, що є відношенням ваги рідини G до об'єму W , який вона займає:

$$\gamma = G/W.$$

Оскільки питома вага і густина – це відношення ваги та маси до однакового об'єму, то маємо такий зв'язок між ними:

$$\gamma = \rho g, \quad (1.4)$$

де g – прискорення вільного падіння.

Пружність. Це здатність рідини відновлювати свій об'єм після припинення дії зовнішніх сил.

Опір розтяжним зусиллям. Міцність рідини на розрив характеризується дуже великими значеннями. Однак наявність у рідині дуже малих твердих частинок або бульбашок газу призводить до різкого її зменшення (практично до нуля). З урахуванням цього на практиці вважають, що рідина не чинить опору розтяжним зусиллям, і тому ними нехтують.

Капілярність. Поверхневий шар нестисливої рідини перебуває в особливому напруженому стані, що зумовлений неурівноваженістю дії молекулярних сил і характеризується силами поверхневого натягу. Вплив цих факторів більший у трубках малого діаметра, в яких рідина, що змочує стінки трубки (наприклад вода), піднімається, а рідина, що не змочує стінки трубки (наприклад ртуть), опускається. Це явище називають *капілярністю*.

Висота капілярного підняття води h , мм, у скляній трубці діаметром d , мм, при температурі $t = 20^\circ$ буде $h = 30/d$, а висота опускання ртуті - $h = 10/d$.

Висоту підняття (опускання) рідини треба враховувати при відліках у вимірювальних приладах, в яких використовують скляні трубки з рідиною.

В'язкість рідини. Це властивість рідини і газу чинити при своєму русі опір відносному зсуву своїх частинок.

У рідини, що рухається, швидкості різні в різних шарах. Вони відрізняються на величину зміни швидкості du . Між шарами рідини виникають сили внутрішнього тертя. За гіпотезою Ньютона, закон внутрішнього тертя в рідині записують як

$$\tau = \pm \mu \frac{du}{dy}, \quad (1.5)$$

де τ – дотичне напруження (або сила опору, що припадає на одиницю площі);

μ – динамічна в'язкість;

$\frac{du}{dy}$ – градієнт швидкості, тобто зміна швидкості на одиницю довжини в перпендикулярному напрямі.

З формули випливає, що в рідині, яка перебуває в стані спокою, $\tau = 0$, тобто в'язкість виявляється лише під час її руху.

Одиницею динамічної в'язкості є

$$|\mu| = \frac{|\tau|}{\left| \frac{du}{dy} \right|} = \frac{\left| \frac{H \cdot c \cdot m}{m^2 \cdot m} \right|}{\left| \frac{H \cdot c}{m^2} \right|} = |Pa \cdot c| \quad (\text{паскаль-секунда}). \quad (1.6)$$

Динамічна в'язкість визначає силу, потрібну для переміщення одного шару рідини по другому при значеннях площі контакту шарів і градієнтів швидкості, що дорівнюють одиниці. У гідравлічних розрахунках часто використовують величину ν – кінематичну в'язкість, яка є відношенням динамічної в'язкості μ до густини ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \left| \frac{H \cdot c \cdot m^3}{m^2 \cdot kg} \right| = \left| \frac{m^2}{c} \right|, \quad (1.7)$$

ν залежить від рідини і температури. З підвищенням температури для краплинної рідини в'язкість зменшується, а для газів збільшується.

Поняття про в'язку і нев'язку рідину. *Нев'язкою рідиною* називають уявну рідину, яка характеризується відсутністю внутрішнього тертя при її русі. Такої рідини в природі не існує, але абстрактна модель нев'язкої рідини зручна при вирішенні теоретичних питань і описуванні ряду явищ, пов'язаних із обтіканням твердих тіл і рухом рідини через деякі споруди і пристрої. Проте така модель не дає змоги пояснити походження втрат енергії при протіканні води трубопроводами, а також опору руху твердих тіл у рідині. Для описання цього використовують складнішу модель рідини – в'язку, де враховано вплив внутрішнього тертя.

Найпростішою моделлю в'язкої рідини є ньютонівська рідина, де дотичні напруження виражаються формулою (1.5).

Крім звичайних (ньютонівських) рідин існують аномальні (неньютонівські) рідини, до яких належать мастила, нафтопродукти, колоїдні розчини. Для таких рідин закон внутрішнього тертя має вигляд [8]

$$\tau = \tau_{\phi} + \mu \frac{du}{dy}, \quad (1.8)$$

де τ_{ϕ} – дотичні напруження в нерухомій рідині (або початкові напруження зсуву).

Сили, які діють у рідині. У рідині діють масові і поверхневі сили. Масові сили діють на кожний елемент рідкого середовища і, за другим законом Ньютона, вони дорівнюють добутку маси тіла на прискорення.

До масових сил належать сили тяжіння

$$G = mg, \quad (1.9)$$

а також сили інерції

$$I = -m \frac{du}{dt}, \quad (1.10)$$

де $\frac{du}{dt}$ – прискорення руху тіла (t – час);

знак «-» показує, що сила інерції має напрям, протилежний прискоренню.

Поверхневі сили проявляються на граничних поверхнях розглядуваного рідкого тіла. Поверхневу силу, яка діє нормально до будь-якої площадки, називають *силою опору*. Сили тиску виявляються як під час руху, так і за умови рівноваги рідини, а сили опору за формулою (1.5) – тільки при русі рідини.

2 ГІДРОСТАТИКА

2.1 Гідростатичний тиск і його властивості

Гідростатика вивчає загальні закони спокою рідини та їх використання на практиці.

Гідростатичний тиск є границею відношення сили тиску до площини дії при умові прагнення розміру площини до нуля:

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

Таким чином, гідростатичний тиск є нормальним напруженням, що виникає в рідині під впливом зовнішніх і внутрішніх сил. Середній по площині тиск:

$$p = P/\omega; \quad (2.2)$$

де P – сила тиску, Н;

ω – площа, м².

Розмірність тиску – Н/м²(Па) – Паскаль, або кг/см²(ат) – атмосфера.

Гідростатичний тиск має дві основні властивості:

1 Гідростатичний тиск спрямований по нормалі і до поверхні, на яку він діє (тобто перпендикулярно до поверхні).

У рідині не виникають розтяжні напруження, а якщо вона перебуває в стані спокою, то в ній не виникають і дотичні напруження.

Тиск може діяти на площину тільки під кутом 90°, бо інакше його можна було б розкласти на дві складові: нормальну P і дотичну τ . Проте, як уже було зазначено, дотичні напруження можуть виникати в рідині тільки під час її руху. Тому це ще раз

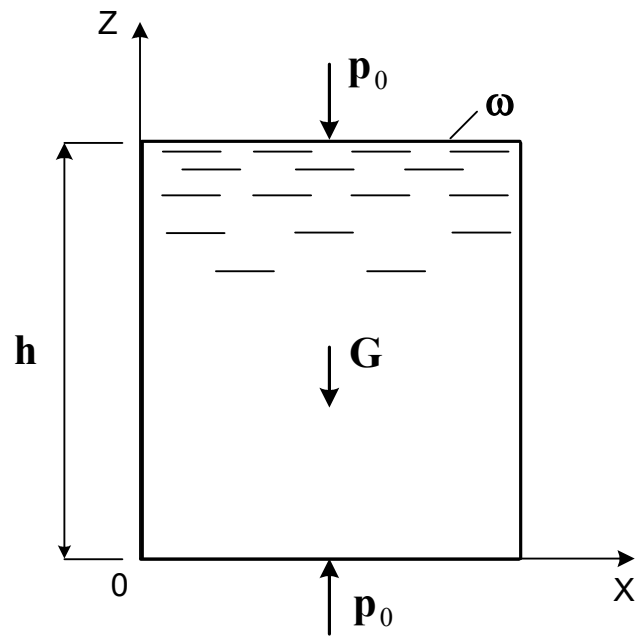


Рисунок 2.1

Тиск (p) у будь-якій точці об'єму рідини дорівнює тиску на поверхні (p_0) і тиску, обумовленому вагою вище розташованих шарів рідини ($p_p = \gamma h$).

Рівняння (2.5) є одним із основних рівнянь гідростатики, з фізичної точки зору.

Розглянемо рівновагу того самого об'єму з геометричної точки зору (рисунок 2.2).

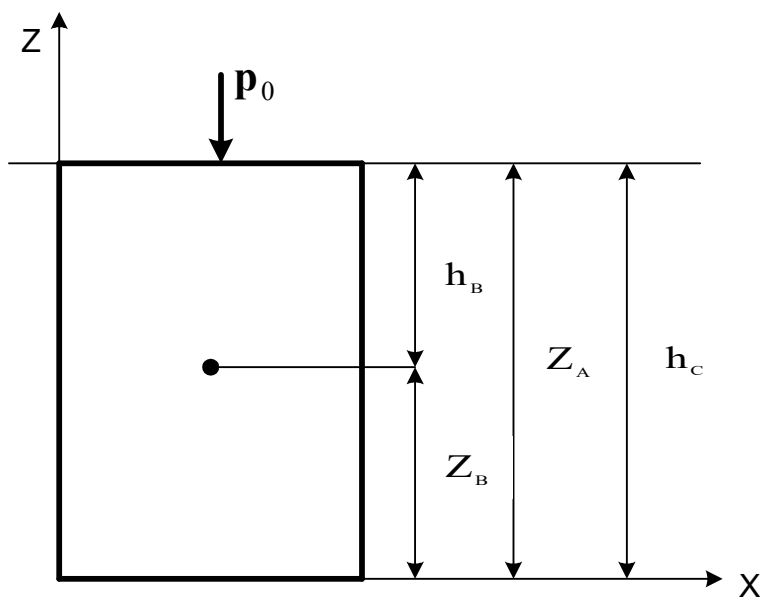


Рисунок 2.2

Для точки В: $p_B = p_0 + \gamma(Z_A - Z_B)$. Поділимо на γ :

$$\frac{p_B}{\gamma} = \frac{p_0}{\gamma} + Z_A - Z_B, \text{ тоді} \quad Z_B + \frac{p_B}{\gamma} = Z_A + \frac{p_A}{\gamma}. \quad (2.6)$$

Поверхня, що проходить через точку А – поверхня рівного тиску.

Рівняння (2.6) є основним рівнянням гідростатики з геометричної точки зору.

З рисунка 2.2 і рівняння (2.5) видно: $p_A = p_0$; $p_B = p_0 + \gamma h_B$; $p_C = p_0 + \gamma h_C$, поверхневий тиск p_0 передається в решту точок об'єму без змін – закон Паскаля. Закон Паскаля використовується в машинах, що діють тиском рідини: гідравлічні преси, домкрати тощо.

На рисунку 2.3 наведена схема дії преса. До меншого поршня прикладається сила P , яка утворює тиск $\frac{P_1}{\omega_1}$, котрий за законом Паскаля розповсюджується у всі точки об'єму і діє на великий поршень з площею ω_2 з силою $P_2 = p\omega_2 = P\frac{\omega_2}{\omega_1}$. Таким чином, сила P_2 більша за силу P_1 у стільки разів, у скільки площа ω_2 більша за ω_1 .

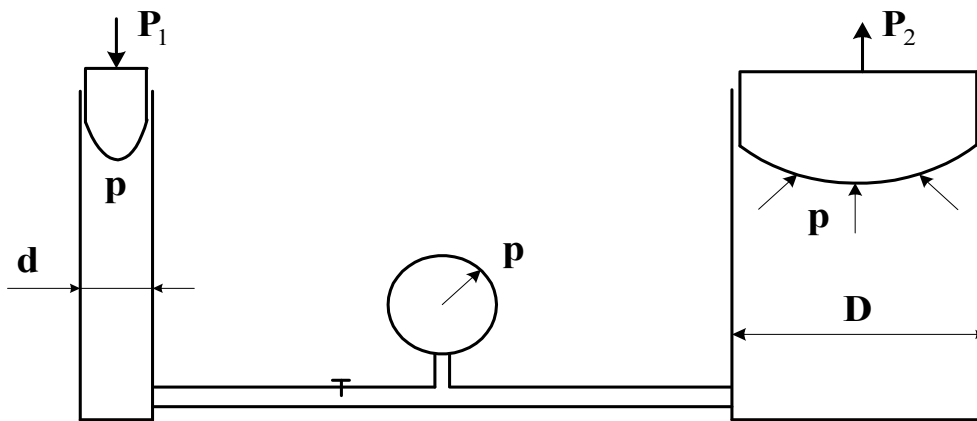


Рисунок 2.3

2.3 Епюри гідростатичного тиску

а) **плоска горизонтальна поверхня** – ешюра має прямокутний переріз, а її об'єм є силою тиску (рисунки 2.4).

$$P = (p_0 + \gamma h)\omega \quad (2.7)$$

при

$$p_0 = p_{ат} - P_{надл.} = \gamma h\omega \quad (2.8)$$

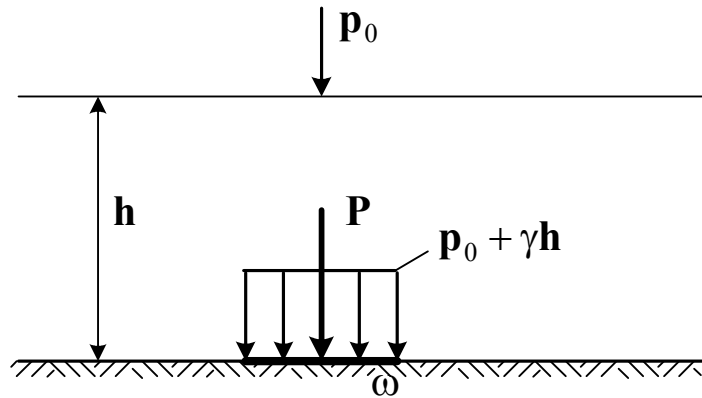


Рисунок 2.4

б) **плоска вертикальна, або похила до горизонту поверхня** – ешюра має форму трапеції (абсолютний тиск) і трикутника (надлишковий тиск) (рисунки 2.5). При $p_0 = p_{ат}$

$$P = p_{ц.в.}\omega = (p_0 + \gamma \frac{h}{2})\omega; \quad (2.9)$$

або при $p_0 = p_{ат}$

$$P_{надл.} = \gamma \frac{h}{2}\omega, \quad (2.10)$$

де $p_{ц.в.}$ – тиск у центрі ваги.

Координата точки прикладення сили тиску (центр тиску) визначається за формулою

$$y_D = y_{ц.в.} + \frac{I_0}{y_{ц.в.}\omega}, \quad (2.11)$$

де $y_{ц.в.}$ – координата центра ваги площі;

I_0 – момент інерції площі ω відносно центральної осі,

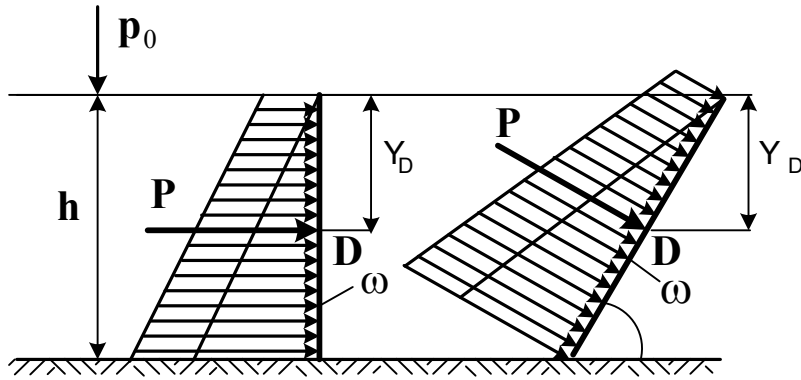


Рисунок 2.5

в) **криволінійна поверхня** – епюра має криволінійну форму (рисунок 2.6). Силу гідростатичного тиску розкладають на горизонтальну та вертикальну складові. Горизонтальна складова – сила, яка діє на вертикальну проекцію криволінійної поверхні і визначається аналогічно п. б):

$$P_{\Gamma} = p_{ц.в.} \omega_{в.п.} = (p_0 + \gamma \frac{h}{2}) DL; \quad (2.12)$$

де $p_{ц.в.}$ – тиск у центрі ваги вертикальної проекції;
 $\omega_{в.п.}$ – площа вертикальної проекції.

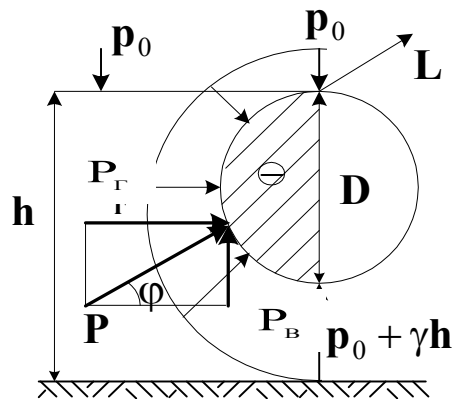


Рисунок 2.6

2.4 Сила тиску рідини на плоскі поверхні

Визначення сили тиску рідини на ту чи іншу поверхню (стінку, заглишку тощо) має велике практичне значення. При роз-

рахунках має значення не тільки тиск в окремих точках, а й сила тиску на споруду чи її частину.

Розглянемо визначення сили тиску на плоску стінку довільної форми, яка утворює з горизонтом кут α (рисунок 2.7). На цьому рисунку плоска стінка показана також в іншій проекції, що повернена на 90° .

Рідина тисне на поверхню з площиною ω в усіх точках, але цей тиск нерівномірний. У верхніх точках тиск менший, у нижніх – більший. Для того щоб знайти рівнодійну силу тиску на плоску стінку, треба обчислити силу тиску dP на елементарну площадку з площею $d\omega$, яка занурена на глибину h , а потім цей вираз проінтегрувати по всій площі стінки ω .

Елементарну силу гідростатичного тиску на площу $d\omega$ визначають як тиск у точці, помножений на площу площадки:

$$dP = p d\omega = (p_0 + \rho g h) d\omega, \quad (2.13)$$

де p_0 – манометричний (надлишковий) тиск на поверхні рідини. Зробимо деякі перетворення: помножимо і поділимо праву частину на ρg :

$$dP = \rho g \left(\frac{p_0}{\rho g} + h \right) d\omega = \rho g h' d\omega,$$

де h' – глибина занурення точки від п'єзометричної площини $0''-0''$, проведеної вище вільної поверхні на величину п'єзометричної висоти $\frac{p_0}{\rho g}$; $h' = \frac{p_0}{\rho g} + h$ або $h' = y' \sin \alpha$.

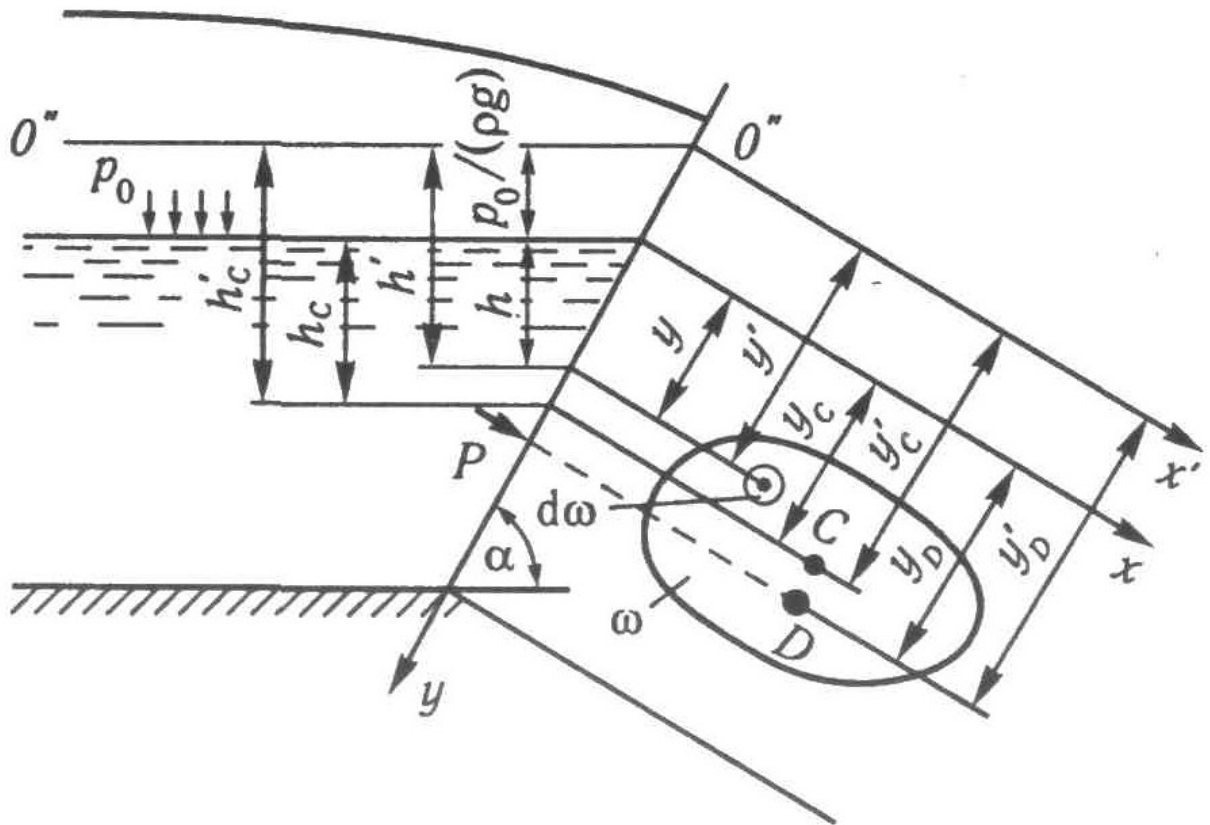


Рисунок 2.7

Звідси

$$dP = \rho g y' \sin \alpha d\omega, \quad (2.14)$$

Після інтегрування по всій площі маємо

$$P = \rho g \sin \alpha \int_{\omega} y' d\omega.$$

Вираз $\int_{\omega} y' d\omega$ є статичним моментом $S_{x'}$ площі ω відносно осі x' ; його визначають як добуток відстані y'_C від центра ваги C до осі x' на площину поверхні ω :

$$\int_{\omega} y' d\omega = S_{x'} = y'_C \omega.$$

З урахуванням цього рівнодійна сила

$$P = \rho g \sin \alpha \cdot y'_C \omega \quad (2.15)$$

або

$$P = \rho g h'_C \omega, \quad (2.16)$$

де h'_C – глибина занурення центра ваги плоскої поверхні від п'єзометричної площини.

Виразимо h'_C через h_C

$$h'_C = h_C + \frac{p_0}{\rho g}$$

і

$$P = (p_0 + \rho g h_C) \omega. \quad (2.17)$$

В окремому випадку, якщо резервуар відкритий ($p_0 = 0; h' = h; y' = y$),

$$P = \rho g h_C \omega. \quad (2.18)$$

Силу тиску на плоску стінку визначають як тиск у її центрі ваги, помножений на площу змоченої поверхні.

Ці фактори, а не кількість рідини, визначають силу тиску, наприклад, для випадків, наведених на рисунку 2.8, а-в. Сили тиску на дно резервуарів є однаковими при однакових площах дна ω і глибинах рідин h у резервуарах. Однак вага рідини в резервуарах буде різною. Таке явище називають *гідравлічним парадоксом*. Тут треба пояснити, що різниця між силами тиску на дно P і реакціями опор R урівноважується вертикальними складовими сил тиску P_B на похилі стінки резервуарів.

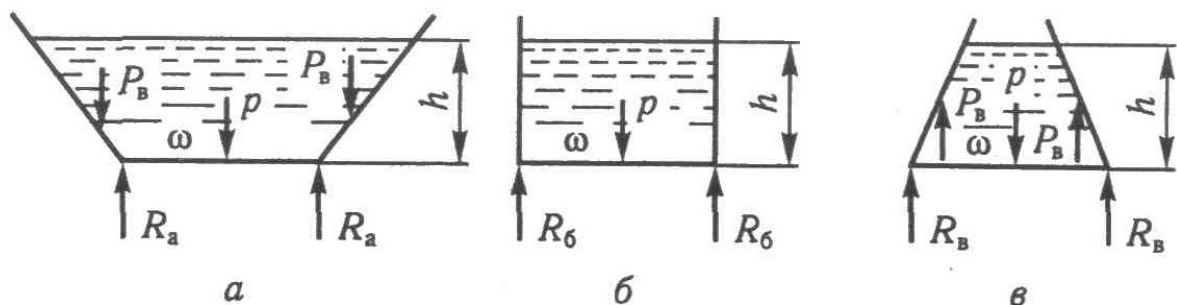


Рисунок 2.8

Центр тиску. Після визначення сили тиску на плоску стінку слід знайти точку її прикладання – центр тиску (точку прикладання рівнодійної елементарних сил).

Для визначення центра тиску користуємося принципом, згідно з яким момент рівнодійної сили дорівнює алгебраїчній сумі моментів складових сил.

Позначимо відстань від центра тиску D до осі X через Y_D , а до осі X' - через Y'_D . Тоді

$$PY'_D = \int_{\omega} dPY'. \quad (2.19)$$

Звідси з урахуванням формул (2.13) і (2.15) одержимо

$$Y'_D = \frac{\int dPY'}{P} = \frac{\rho g \sin \alpha \int Y'd\omega Y'}{\rho g \sin \alpha Y'_C \omega} = \frac{\int Y'^2 d\omega}{Y'_C \omega} = \frac{I_{X'}}{S_{X'}}. \quad (2.20)$$

Вираз $\int_{\omega} Y'^2 d\omega = I_{X'}$ є моментом інерції площі відносно осі X' , $Y'_C \omega = S_{X'}$ – статичний момент площі відносно осі X' . Тому

$$Y'_D = \frac{I_{X'}}{S_{X'}}.$$

Отже, Y'_D – відстань від центра тиску до осі X' – дорівнює відношенню моменту інерції $I_{X'}$ до статичного моменту $S_{X'}$. Для практичних розрахунків можна перетворити цей вираз.

З механіки відомо, що між моментом інерції $I_{X'}$ і центральним моментом інерції I_C (це момент інерції відносно осі, що проходить через центр ваги плоскої стінки) існує такий зв'язок:

$$I_{X'} = I_C + Y_C'^2 \omega.$$

Тоді одержимо

$$Y'_D = Y'_C + \frac{I_C}{Y'_C \omega}. \quad (2.21)$$

В окремому випадку, якщо резервуар відкритий,

$$Y_D = Y_C + \frac{I_C}{Y_C \omega}. \quad (2.22)$$

Вираз $\frac{I_C}{Y_C \omega}$ показує, наскільки нижче центра ваги розміщений центр тиску.

Центр тиску – це точка прикладення рівнодійної сили тиску, яка проходить через центр ваги епюри тиску.

Для трикутної епюри центр тиску розміщений на відстані $1/3$ від дна резервуара.

Для горизонтальної поверхні центр тиску і центр ваги розміщені на одному рівні.

2.5 Сили тиску рідини на криволінійні поверхні

При визначенні сили тиску рідини на криволінійні поверхні точка прикладення цієї сили та її напрям заздалегідь не відомі, бо в кожній точці тиск буде перпендикулярний (нормальний) до цієї поверхні.

Для криволінійних поверхонь елементарні сили тиску, залишаючись нормальними відносно відповідної площадки, вже не будуть паралельними між собою. У загальному випадку вони утворюють систему сил, як завгодно розміщених у просторі; розрахунок їх зводиться до визначення головного вектора сил.

У загальному випадку для визначення сили тиску на криволінійну поверхню передусім треба визначити три її складові, паралельні координатним осям.

Розглянемо довільну криволінійну поверхню нескінченно малої товщини, на яку з двох боків діє рідина (рисунок 2.9).

Сила тиску на елементарну площадку

$$dP = p d\omega = \rho g \left(\frac{P_0}{\rho g} + h \right) d\omega = \rho g h' d\omega,$$

де $h' = \frac{P_0}{\rho g} + h$ – глибина занурення точки, розміщеної в центрі елементарної площадки і відкладеної від п'єзометричної площини.

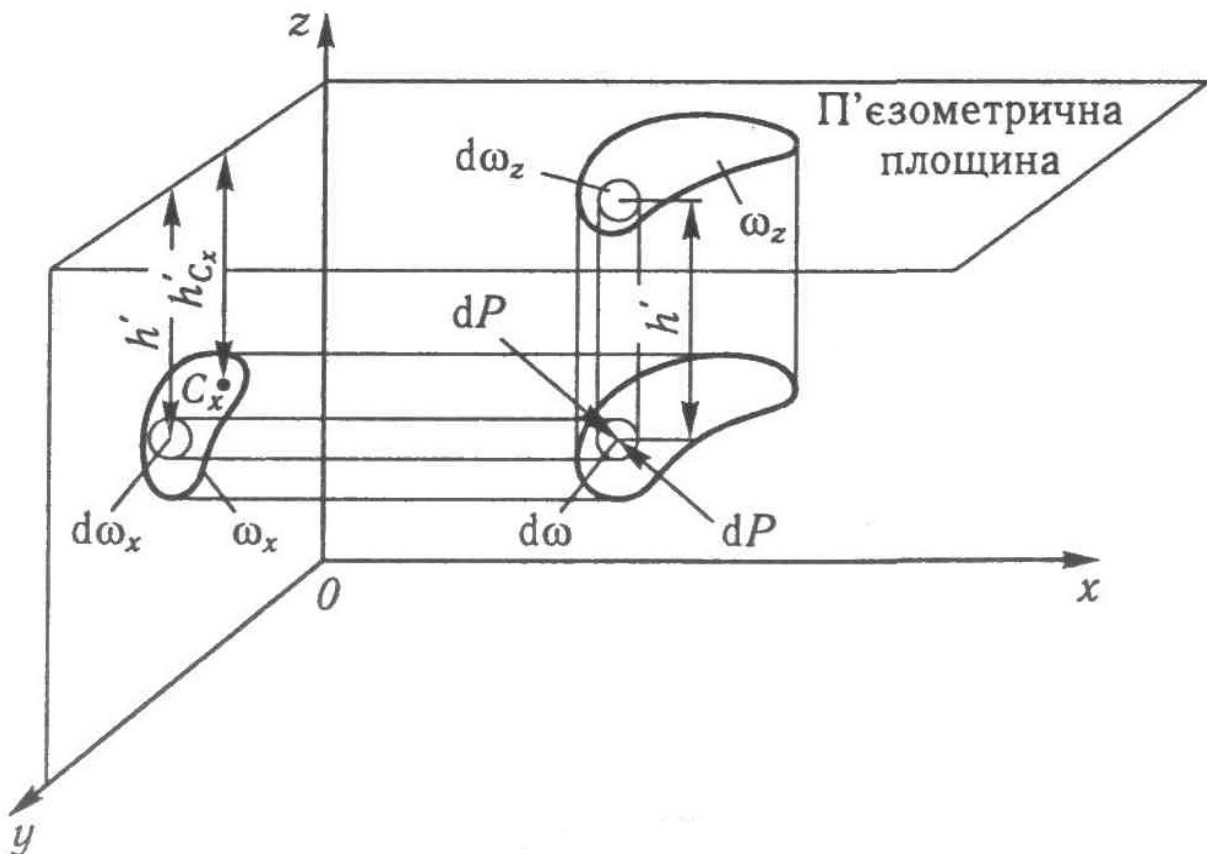


Рисунок 2.9

Складові сили dP , паралельні координатним осям, визначають як добуток цієї сили на косинус кута між напрямом сили і відповідною віссю:

$$\begin{aligned} dP_x &= p d\omega \cos(dP, X); \\ dP_y &= p d\omega \cos(dP, Y); \\ dP_z &= p d\omega \cos(dP, Z). \end{aligned}$$

Добуток $d\omega$ на відповідний косинус кута між силою і координатною віссю є проекцією цієї площі на площину, перпендикулярну до відповідної осі, тобто

$$\begin{aligned} d\omega \cos(dP, X) &= d\omega_x; \\ d\omega \cos(dP, Y) &= d\omega_y; \\ d\omega \cos(dP, Z) &= d\omega_z. \end{aligned}$$

Звідси маємо

$$dP_x = p d\omega_x.$$

Після інтегрування одержимо

$$P_X = \int_{\omega} p d\omega_X = \rho g \int_{\omega} h' d\omega_X = \rho g h'_{C_X} \omega_X; \quad (2.23)$$

$$P_Y = \rho g h'_{C_Y} \omega_Y. \quad (2.24)$$

де ω_X і ω_Y – проекції площі криволінійної поверхні на вертикальні площини, які перпендикулярні до осей X і Y ;

h'_{C_X} і h'_{C_Y} – глибини занурення центрів ваги цих проекцій від п'єзометричної площини.

Отже, горизонтальні складові сили тиску на криволінійну поверхню дорівнюють силам тиску на проекції цієї поверхні, які перпендикулярні до відповідних координатних осей.

Розглянемо тепер вертикальну складову силу тиску:

$$P_Z = \int_{\omega_Z} p d\omega_Z = \rho g \int_{\omega_Z} h' d\omega_Z,$$

де $h' d\omega_Z = dW'$ – об'єм вертикального стовпця рідини, який спирається на площадку $d\omega_Z$, висотою h' .

Інтеграл цього виразу є об'ємом W' всього вертикального стовпця рідини, який спирається на криволінійну поверхню й обмежується зверху п'єзометричною площиною

Такий стовпець називають **тілом тиску**:

$$W' = \int_{\omega_Z} h' d\omega_Z$$

$$P_Z = \rho g W'. \quad (2.25)$$

де W' – об'єм тіла тиску.

Тіло тиску – це об'єм, замкнений між п'єзометричною площиною криволінійної поверхні та вертикальними площинами, які проведені через крайні точки криволінійної поверхні (рисунок 2.10).

Вертикальна складова сила тиску на криволінійну поверхню дорівнює вазі тіла тиску. Звідси рівнодійна сила тиску

$$P = \sqrt{P_X^2 + P_Y^2 + P_Z^2}. \quad (2.26)$$

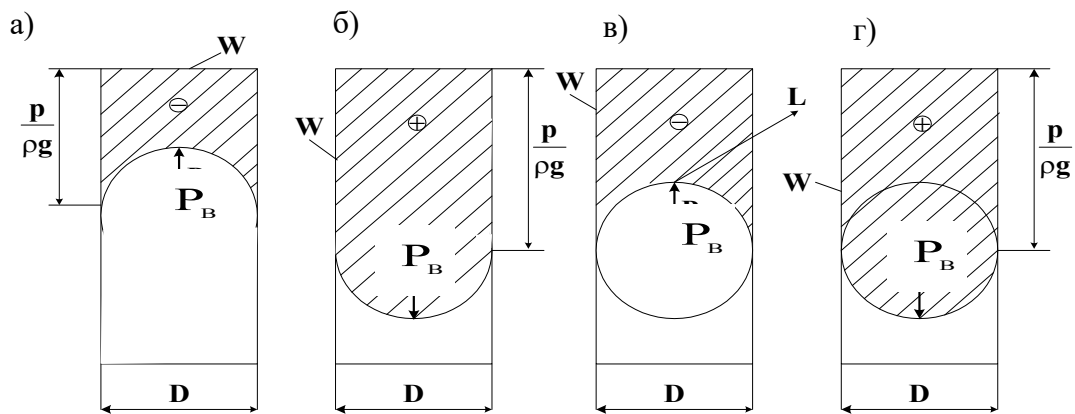


Рисунок 2.10

Тіло тиску, заповнене рідиною (рисунок 2.10, б), називають дійсним, на відміну від фіктивного, заповненого рідиною умовно (рисунок 2.10, а).

Якщо одну частину криволінійної поверхні рідина стискує зверху, а другу знизу, то тіло тиску визначають як суму тіл тиску на кожну частину криволінійної поверхні з відповідними знаками.

Напрямок рівнодійної сили тиску характеризують кутом нахилу її до горизонту:

$$\operatorname{tg}\varphi = \frac{P_B}{P_T}. \quad (2.27)$$

3 ОСНОВИ ГІДРОДИНАМІКИ

Гідродинаміка вивчає загальні закони руху рідини та їх використання на практиці.

3.1 Основні поняття

Основними параметрами руху рідини є:

- швидкість руху в окремих точках U , м/с;
- середня швидкість потоку V , м/с;
- витрата (кількість рідини в одиницю часу) Q , м³/с, кг/с, Н/с;
- гідродинамічний тиск p , Н/м²;

- глибина потоку h , м.

Сталий рух – рух потоку, при якому його параметри не є функціями часу.

Несталий рух – рух потоку, при якому його параметри є функціями часу і простору.

Рівномірний рух – сталий рух, при якому параметри не є функціями довжини.

Нерівномірний рух – сталий рух, при якому параметри (окрім витрати) є функціями довжини.

Траєкторія частинки – крива руху частинки.

Лінія течії – крива, у кожній точці якої вектор швидкості дотичний до неї.

Елементарна струминка – пучок ліній течії.

Потік рідини – сукупність елементарних струминок.

Основними гідравлічними елементами потоку є:

- **живий переріз** – поверхня, проведена нормально до всіх ліній течії, ω , м²;

- **змочений периметр** – частина периметра твердого русла, змочена рідиною, χ , м;

- **гідравлічний радіус** – відношення живого перерізу до змоченого периметра $R = \frac{\omega}{\chi}$, м;

- **середня швидкість** – швидкість, при якій через живий переріз потоку за одиницю часу проходить такий саме об'єм рідини, як і при місцевих швидкостях V , м/с;

- **витрата** – об'єм рідини, яка протікає в одиницю часу через живий переріз потоку, Q , м³/с.

3.2 Рівняння нерозривності та рівняння Бернуллі

Рівняння нерозривності пов'язує витрати і середні швидкості в різних перерізах потоку:

$$Q_1 = \omega_1 V_1; Q_2 = \omega_2 V_2; Q_n = \omega_n V_n. \quad (3.1)$$

При сталому русі $Q_1 = Q_2 = Q_n = const$;

$$i \quad \omega_1 V_1 = \omega_2 V_2 = \omega_n V_n = const. \quad (3.2)$$

Звідси
$$\frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{V_1}{V_2}; \text{ або } V_2 = V_1 \frac{\omega_1}{\omega_2}. \quad (3.3)$$

Рівняння Бернуллі – закон зберігання енергії відносно рідини, який пов’язує швидкість і гідродинамічний тиск у потоці, а також потенціальну та кінематичну енергії в перерізі і вздовж потоку.

Для одного живого перерізу елементарної струминки “ідеальної” (нев’язкої) рідини рівняння має вигляд

$$Z + \frac{p}{\gamma} + \frac{U^2}{2g} = const; \quad (3.4)$$

для двох перерізів (рисунок 3.1)

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g}; \quad (3.5)$$

для сталого потоку в’язкої рідини

$$Z_2 + \frac{p}{\gamma} + \frac{\alpha V^2}{2g} = const; \quad (3.6)$$

і

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \sum_1^n h_n, \quad (3.7)$$

де Z – питома (віднесена до одиниці ваги) потенціальна енергія положення, яка залежить від положення центра ваги перерізу над площиною порівняння;

$\frac{p}{\gamma}$ – питома потенціальна енергія тиску, залежить від тиску в центрі ваги перерізу;

$\frac{U^2}{2g}$ та $\frac{\alpha V^2}{2g}$ – питома кінетична енергія;

α – коефіцієнт, що враховує нерівномірність розподілу місцевих швидкостей по живому перерізу потоку;

$\sum_1^n h_n$ – втрата питомої енергії між перерізами 1-1 і 2-2.

Таким чином, згідно з рівнянням Бернуллі повна питома енергія в першому перерізі дорівнює повній питомій енергії у другому перерізі з додаванням втрати енергії між перерізами.

Розглянемо рівняння Бернуллі з геометричної точки зору (рисунок 3.1).

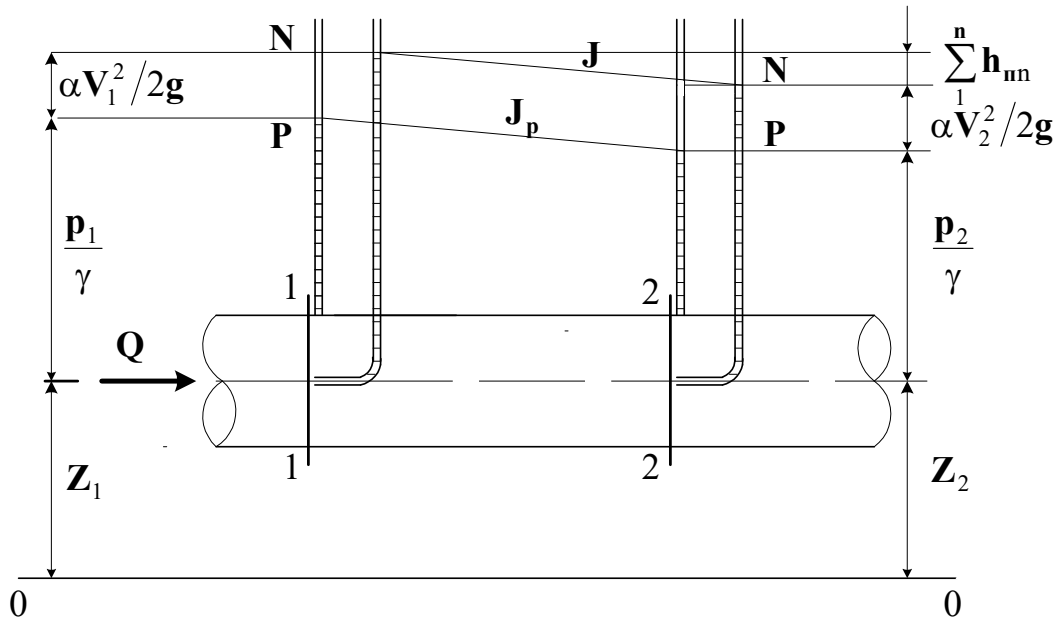


Рисунок 3.1

На рисунку 3.1 в перерізах 1-1 і 2-2 встановлено дві трубки: п'єзометрична і гідродинамічна (трубка Піто), які наочно демонструють геометричний зміст кожного члена рівняння Бернуллі:

Z_1 і Z_2 – координати центра ваги перерізу або геометричний напір;

$\frac{p_1}{\gamma}$ і $\frac{p_2}{\gamma}$ – висота стовпа рідини в п'єзометрі – п'єзометричний напір;

$\frac{\alpha V_1^2}{2g}$ і $\frac{\alpha V_2^2}{2g}$ – додаткова висота в гідродинамічних трубках порівняно з п'єзометричними – швидкісний напір;

$\sum_1^n h_n$ – різниця повних напорів у перерізах або втрати напору.

Таким чином, згідно з рівнянням Бернуллі повний напір у першому перерізі дорівнює повному напору у другому перерізі з додаванням втрати напору між перерізами.

На рисунку 3.1 лінія $N-N$ є лінією повної енергії, або повного напору (напірна лінія). Вона характеризує втрати енергії (напору) і має уклон

$$I = \frac{\sum_1^n h_n}{\ell}. \quad (3.8)$$

Уклон напірної лінії називається **гідрравлічним уклоном**.

Лінія $p-p$ є п'єзометричною, або лінією потенціальної енергії, і її уклон називають п'єзометричним:

$$I_p = \frac{\left(Z_1 + \frac{p_1}{\gamma}\right) - \left(Z_2 + \frac{p_2}{\gamma}\right)}{\ell}. \quad (3.9)$$

Рівняння нерозривності потоку та рівняння Бернуллі дозволяють розв'язувати більшість задач, які пов'язані з рухом рідин.

Застосовуються обидва рівняння також з практичною метою, наприклад для вимірювання швидкостей трубкою Піто і витрати витратоміром Вентурі.

Приклад 3.1

Розглянемо потік рідини в напірній трубці, в якій встановлено п'єзометричну та гідродинамічну трубки (рисунок 3.2). Напишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 відносно площі порівняння 0-0:

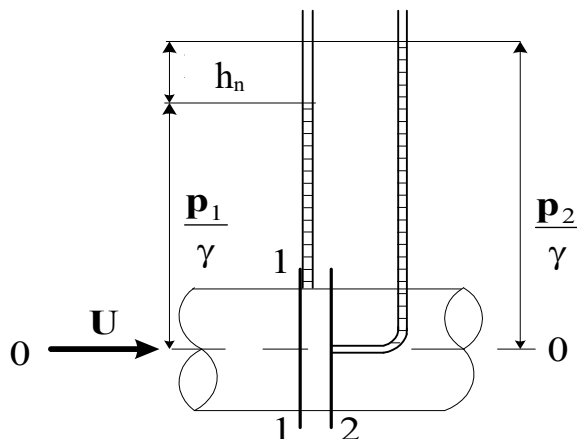


Рисунок 3.2

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{U_2^2}{2g},$$

де $Z_1 = Z_2 = 0; U_2 = 0; h_n \cong 0$.

Тоді

$$\frac{p_1}{\gamma} + \frac{U_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma}, \text{ або } \frac{U_1^2}{2g} = \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = h_n;$$

Звідки

$$U_1 = \varphi \sqrt{2gh_n}; \quad (3.10)$$

де φ – поправочний коефіцієнт, який враховує конструктивні особливості приладу і визначається експериментальним шляхом.

Приклад 3.2

Розглянемо протікання рідини у трубі змінного перерізу (рисунок 3.3) з двома п'єзометрами, які встановлено в нормальному та звуженому перерізах 1-1 і 2-2.

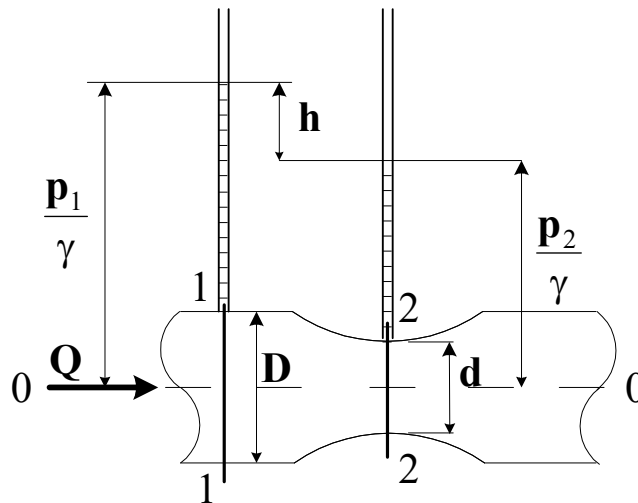


Рисунок 3.3

Напишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 відносно площі порівняння 0-0, нехтуючи втратами напору:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g},$$

де $Z_1 = Z_2 = 0$; $\alpha \cong 1$,
тоді маємо

$$\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = \frac{V_2^2}{2g} - \frac{V_1^2}{2g}.$$

Із рівняння нерозривності (3.3) маємо

$$V_2 = V_1 \frac{D^2}{d^2}.$$

Позначивши $\frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} = h$, маємо

$h = \frac{V_1^2}{2g} \left(\frac{D^4}{d^4} - 1 \right)$; звідки $V_1 = \sqrt{\frac{2gh}{\frac{D^4}{d^4} - 1}}$ і шукана витрата (теоретична)

$$Q_T = \omega_1 V_1 = \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\frac{D^4}{d^4} - 1}}.$$

Фактична витрата буде менша за рахунок втрат напору, які враховуються коефіцієнтом втрат μ :

$$\mu = \frac{Q_\phi}{Q_T}.$$

Тоді

$$Q = \mu Q_T = \mu \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{\frac{D^4}{d^4} - 1}} = \mu \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\frac{D^4}{d^4} - 1}} \sqrt{h} = c \sqrt{h}, \quad (3.11)$$

де $c = \mu \frac{\pi D^2}{4} \sqrt{\frac{2g}{\frac{D^4}{d^4} - 1}}$ – експериментальний коефіцієнт (стала витрато-міра), який враховує конструктивні особливості приладу.

Як видно з наведених прикладів, для практичного використання рівняння Бернуллі необхідно вміти визначати його останній член – втрати енергії (напору) при русі рідини.

3.3 Втрати енергії

Втрати енергії залежно від опору руху рідини можна поділити на втрати по довжині та місцеві.

Втрати по довжині виникають внаслідок сил тертя рідини об стінки труб і каналів.

Місцеві втрати енергії виникають внаслідок внутрішнього тертя в рідинах, яке є найбільшим на ділянках різкої зміни перерізу або напрямку потоку (зміна діаметрів, закруглення, засувки, вентиля, фільтри тощо).

При дослідженні втрат енергії було встановлено їх залежність від режимів руху рідини, які обумовлені в'язкістю, густиною і швидкістю рідини, а також геометричними параметрами русла. Існує два режими руху: **ламінальний** (ламіна – шар) – рідина рухається окремими шарами, які не змішуються між собою; **турбулентний** (турбулюс – вихор) – у рідині створюється система вихрів, які взаємодіють між собою і з руслом.

Найбільш повне дослідження режимів руху рідини було виконано англійським фізиком О.Рейнольдсом, який запропонував безрозмірну характеристику режиму – **число Рейнольдса** – R_e :

$$R_e = \frac{V\ell}{\frac{\mu}{\rho}} = \frac{V\ell}{\nu}, \quad (3.12)$$

де V – швидкість руху;

ℓ – характерний розмір русла;

ν – кінематична в'язкість.

Для напірної круглої труби

$$R_e = \frac{Vd}{\nu} = \frac{4Q}{\pi d\nu}. \quad (3.13)$$

Для відкритого русла

$$R_e = \frac{VR}{\nu}. \quad (3.14)$$

Для безнапірної круглої труби

$$R_e = \frac{Vd}{4\nu} = \frac{Q}{\pi d \nu}. \quad (3.15)$$

де

$$R = \frac{\omega}{\chi} = \frac{\pi d^2}{4\pi d} = \frac{d}{4}. \quad (3.16)$$

Рейнольдс встановив також критичне значення числа R_e , яке дорівнює:

для круглих напірних труб $R_{e_{кр}} = 2320$,

для безнапірних русел $R_{e_{кр}} = 580$.

Таким чином:

для напірних труб:

ламінальний режим $<(R_{e_{кр}} = 2320) <$ турбулентний режим;

для безнапірних:

ламінальний режим $<(R_{e_{кр}} = 580) <$ турбулентний режим.

У напірних і безнапірних системах залізничного транспорту здебільшого має місце турбулентний режим руху.

Втрати енергії по довжині і при ламінальному і турбулентному режимах можна визначити за формулою Дарсі-Вейсбаха:

$$\text{для напірних труб} \quad h_d = \lambda \frac{\ell}{d} \frac{V^2}{2g} = \lambda \frac{8\ell Q^2}{\pi g d^5}; \quad (3.17)$$

$$\text{для безнапірних} \quad h_d = \lambda \frac{\ell}{4R} \frac{V^2}{2g} = \lambda \frac{\ell Q^2}{8R^3 g \chi^2}, \quad (3.18)$$

де λ – коефіцієнт тертя (втрат по довжині).

Коефіцієнт тертя при ламінальному режимі визначається за формулою

$$\lambda = \frac{64}{R_e}. \quad (3.19)$$

При турбулентному режимі коефіцієнт тертя, у загальному випадку, залежить від трьох факторів: шорсткості стінок водоводу, в'язкості рідини і режиму руху. Згідно з існуючими поглядами структура попереречного перерізу турбулентного потоку поділяється на дві частини: ламінальний шар біля стінок русла і турбулентне ядро (рисунок 3.4).

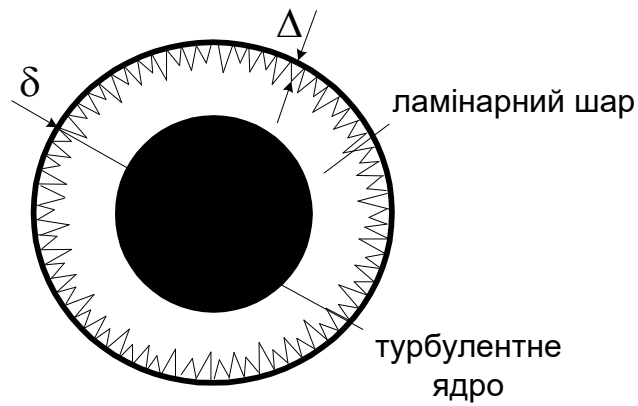


Рисунок 3.4

Товщина ламiнарного шару δ залежить від ступеня турбулентності потоку, який характеризується числом Рейнольдса. У деяких випадках ламiнарний шар покриває виступи шорсткості Δ (таблиця 3.1), в інших буває однаковою з ними, або меншою за них. Залежно від співвідношення товщини ламiнарного шару δ і висоти виступів шорсткості Δ у турбулентному потоці виділяють три зони гiдравлічного опору і три групи формул для визначення коефіцієнта тертя.

Перша зона. Виконується умова $\delta > \Delta$ – зона гладких труб. У даному випадку коефіцієнт тертя залежить лише від числа Рейнольдса і визначається за формулою

$$\lambda = \frac{A}{R_e^n}, \quad (3.20)$$

де A та n – емпіричні коефіцієнти.

Існує велика кількість формул вказаної структури. Можна навести формули, які здебільше використовуються в розрахунках:

формула Блазіуса $\lambda = \frac{0,3164}{R_e^{0,25}};$ (3.21)

формула П.К. Конакова $\lambda = \frac{1}{(1,8 \lg R_e - 1,5)^2}.$ (3.22)

Друга зона. Виконується умова $\delta \cong \Delta$ – перехідна зона. У цьому випадку коефіцієнт тертя залежить від усіх трьох факторів і може бути визначений за формулою А.Д. Альтшуля

$$\lambda = 0,11\left(\frac{\Delta}{d} + \frac{68}{R_e}\right)^{0,25}. \quad (3.23)$$

а також за іншими аналогічними формулами.

Третя зона. Виконується умова $\delta < \Delta$ – квадратична або автомодельна зона. У цьому випадку коефіцієнт тертя залежить тільки від шорсткості русла. Для визначення коефіцієнта тертя можна використати формулу (3.23) у вигляді

$$\lambda = 0,11\left(\frac{\Delta}{d}\right)^{0,25}, \quad (3.24)$$

тому що значення $\frac{68}{R_e}$ – нескінченно мала величина.

Таблиця 3.1 – Значення еквівалентної шорсткості

Труби	Δ , мм
Сталеві цільнотягнуті нові	0,02 – 0,05
Те саме, старі (ті, що були в експлуатації)	0,15 – 0,3
Сталеві зварні нові	0,04 – 0,1
Чавунні нові	0,25 – 1,0
Чавунні і сталеві зварні старі	0,8 – 1,5
Азбестоцементні нові	0,05 – 0,1
Те саме, старі	0,6
Бетонні та залізобетонні	0,3 – 0,8

Для розрахунків безнапірних потоків формула (3.18) використовується у вигляді, який отримав французький інженер Шезі.

Запишемо формулу (3.18) у вигляді

$$h_0 \cdot 4R \cdot 2g = \lambda \ell V^2, \quad (3.25)$$

звідки

$$V = \sqrt{\frac{8gRh_0}{\lambda \ell}} = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}} \cdot \sqrt{R \frac{h_0}{\ell}} = c \sqrt{R \cdot I}, \quad (3.26)$$

де $c = \sqrt{\frac{8g}{\lambda}}$ – швидкісний коефіцієнт (коефіцієнт Шезі);

$I = \frac{h_0}{\ell}$ – гідравлічний уклон.

Для витрати рідини маємо

$$Q = \omega V = \omega c \sqrt{R \cdot I} \quad (3.27)$$

Для втрат енергії по довжині

$$h_0 = \frac{\ell Q^2}{\omega^2 c^2 R}. \quad (3.28)$$

Для визначення коефіцієнта Шезі запропоновано велику кількість півемпіричних формул, із яких найбільш досконалою є формула М.М. Павловського

$$c = \frac{1}{n} R^y, \quad (3.29)$$

де n – коефіцієнт шорсткості русел;

y – експериментальний показник степеня;

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,10). \quad (3.30)$$

Широко застосовуються також формули:

Базена

$$C = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}}, \quad (3.31)$$

де γ – коефіцієнт шорсткості;

Манінга

$$C = \frac{1}{n} R^{1/6}. \quad (3.32)$$

Місцеві втрати енергії визначаються за формулою

$$h_m = \zeta \frac{V^2}{2g}, \quad (3.33)$$

для напірних труб

$$h_m = \zeta \frac{8Q^2}{\pi^2 g d^4}, \quad (3.34)$$

де ζ – коефіцієнт місцевих опорів, визначається переважно дослідним шляхом;

для безнапірних русел:

$$h_m = \zeta \frac{8Q^2}{2gR^2 \chi^2}. \quad (3.35)$$

Визначення місцевих втрат, особливо в безнапірних природних руслах, є дуже складною задачею, тому їх часто визначають як відсоток від втрат по довжині.

При розрахунку коротких гідравлічних систем втрати енергії по довжині і місцеві втрати розраховуються і підсумовуються. При таких розрахунках вводиться поняття коефіцієнта опору системи:

$$\zeta_{\text{сист.}} + \sum_1^n \lambda \frac{\ell}{d} + \sum_1^n \zeta. \quad (3.36)$$

Як видно з викладеного вище, визначення втрат енергії при розрахунках гідросистем є дуже складною задачею, яка розв'язується на сьогодні тільки наближеними методами.

4 Основи гідравлічного розрахунку трубопроводів

Метою гідравлічного розрахунку трубопроводів є визначення одного з трьох параметрів: витрати Q , напору H і діаметра d при відомих двох. Вихідними даними є також: довжина ділянок трубопроводу l , шорсткість труб Δ і відмітки точок.

При розрахунку трубопроводів поділяють на короткі і довгі; прості і складні; тупикові і кільцеві.

Короткі трубопроводи – це такі, у яких місцеві втрати енергії значні і їх треба розраховувати. Довгі – місцеві втрати приймаються як відсоток від втрат по довжині.

I При розрахунку **коротких трубопроводів** є два типи задач:

1 – рідина витікає з резервуара в атмосферу,

2 – рідина витікає з резервуара в резервуар (рисунок 4.1).

Порядок розв'язування:

1 Записуємо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 відносно площини порівняння 0-0:

$$Z_1 + \frac{p_1}{\gamma} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\gamma} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \sum_1^n h_g,$$

де $Z_1 = H$; $Z_2 = 0$; $V_1 \cong 0$; $p_2 = p_a$.

Тоді

$$H + \frac{p_1}{\gamma} = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \sum_1^n h_g,$$

або

$$H = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \sum_1^n h_g - \frac{p_1}{\gamma}, \quad (4.1)$$

при

$$p_1 = p_a; \quad H = \frac{\alpha V_2^2}{2g} + \sum_1^n h_g. \quad (4.2)$$

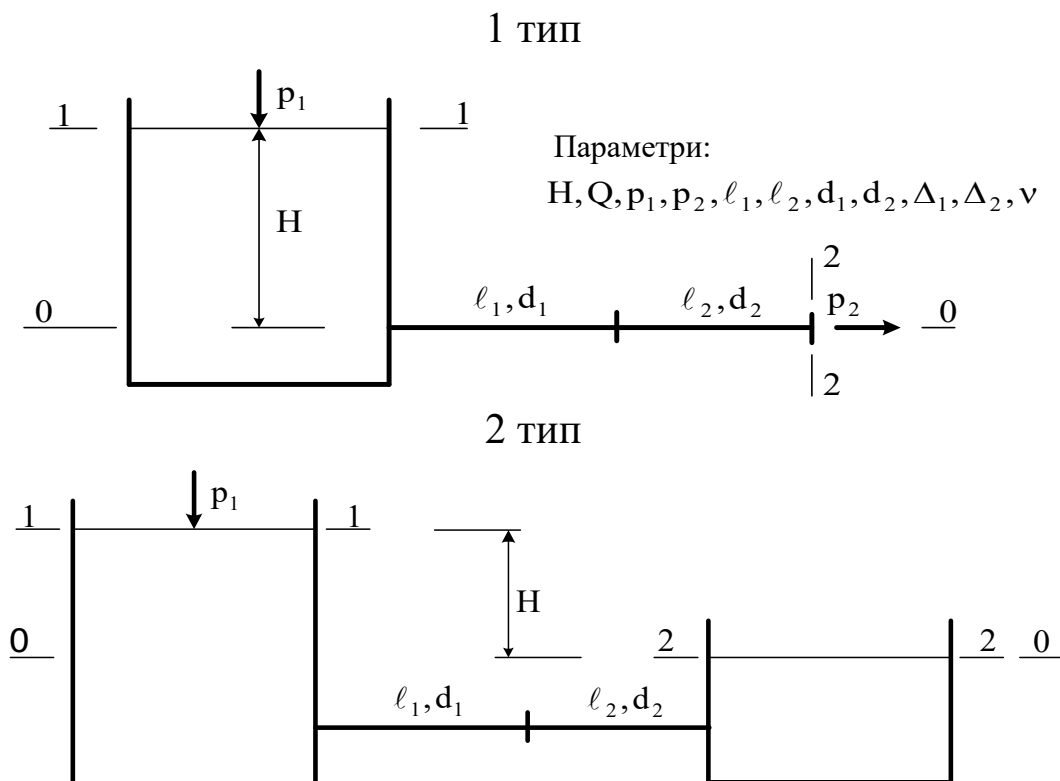


Рисунок 4.1

Очевидно, що для другого типу ($V_1 \cong 0$) маємо

$$H = \sum_1^n h_g + \frac{p_2}{\gamma} - \frac{p_1}{\gamma} \quad (4.3)$$

при

$$p_1 = p_2 = p_a; \quad H = \sum_1^n h_g. \quad (4.4)$$

2. Визначаємо втрати напору в системі як суму втрат по довжині і місцевих втрат:

$$\sum_1^n h_g = \sum_1^n h_d + \sum_1^n h_m = (h_{d_1} + h_{d_2}) + (h_{ex} + h_d + h_{vix}),$$

де h_{d_1} і h_{d_2} – втрати по довжині на ділянках;

h_{ex} – місцева втрата на вхід;

h_d – місцева втрата при зміні діаметра;

h_{vix} – місцева втрата на вихід.

Згідно з формулами (3.17) і (3.34) маємо

$$\sum_1^n h_g = \left(\lambda_1 \frac{8\ell_1 Q^2}{\pi^2 g d_1^5} + \lambda_2 \frac{8\ell_2 Q^2}{\pi^2 g d_2^5} \right) + \left(\zeta_{ex} \frac{8Q^2}{\pi^2 g d_1^4} + \zeta_o \frac{8Q^2}{\pi^2 g d_2^4} + \zeta_{vix} \frac{8Q^2}{\pi^2 g d_2^4} \right) \quad (4.5)$$

де λ_1 і λ_2 – коефіцієнти тертя, розраховуються за формулами (3.21), (3.22), (3.23), (3.24);

ζ_{ex} , ζ_o , ζ_{vix} – коефіцієнти місцевих опорів, визначаються за довідником.

3 Підставляємо вираз (4.5) у формули (4.1)÷(4.4) і визначаємо невідомий параметр.

II При розрахунку **довгих трубопроводів** частіше за все використовується формула Шезі:

$$Q = \omega c \sqrt{R J} = K \sqrt{J}, \quad (4.6)$$

де $K = \omega c \sqrt{R}$ – витратна характеристика (таблиця 4.1).

Таблиця 4.1 – Витратна характеристика для деяких діаметрів труб

D, мм	K _{екв} , м ³ /с для труб		D, мм	K _{екв} , м ³ /с для труб	
	сталевих	бетонних і залізобетонних		сталевих	бетонних і залізобетонних

100	0,0763	-	700	9,57	7,99
125	0,115	-	800	13,49	11,42
150	0,180	-	900	18,37	15,65
175	0,190	-	1000	28,24	20,75
200	0,378	-	1100	-	26,77
250	0,679	-	1200	39,01	33,78
300	1,089	0,75	1300	-	41,83
350	1,637	-	1400	58,50	50,99
400	2,268	1,79	1500	70,40	61,31
450	3,165	-	1600	83,35	72,84
500	4,160	3,25	1700	-	85,64
600	6,649	5,29	1800	-	99,77

Величини ω , c , R при постійному коефіцієнті шорсткості n є функцією лише діаметра труби d .

Запишемо формулу (4.6) у вигляді

$$J = \frac{h_d}{\ell} = \frac{Q^2}{K^2}; \quad (4.7)$$

звідки

$$h_d = \frac{\ell Q^2}{K^2}; \quad (4.8)$$

або

$$Q = K \sqrt{\frac{h_d}{\ell}}. \quad (4.9)$$

Формули 4.8 і 4.9 є основними при розрахунку довгих трубопроводів. Розглянемо деякі приклади застосування формул.

III Гідравлічний розрахунок замкнених трубопроводів

Розглянемо схему водопроводу з трьома паралельними лініями (рисунок 4.2). Як видно з рисунка, напори в точках А і В рівні для всіх трьох ліній, а тому і втрати напору теж рівні.

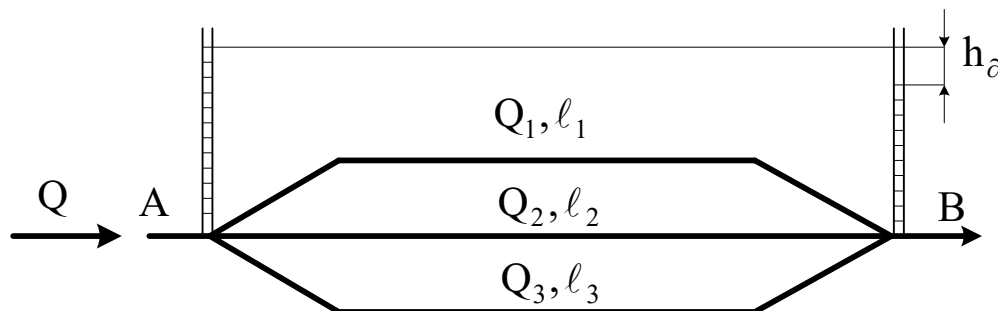


Рисунок 4.2

Використаємо формулу (4.9):

$$Q_1 = K_1 \sqrt{\frac{h_0}{\ell_1}} ; \quad Q_2 = K_2 \sqrt{\frac{h_0}{\ell_2}} ; \quad Q_3 = K_3 \sqrt{\frac{h_0}{\ell_3}} ,$$

або

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3 = K_1 \sqrt{\frac{h_0}{\ell_1}} + K_2 \sqrt{\frac{h_0}{\ell_2}} + K_3 \sqrt{\frac{h_0}{\ell_3}} = \sqrt{h_0} \left(\frac{K_1}{\sqrt{\ell_1}} + \frac{K_2}{\sqrt{\ell_2}} + \frac{K_3}{\sqrt{\ell_3}} \right) ,$$

звідки

$$h_0 = \frac{Q^2}{\left(\frac{K_1}{\sqrt{\ell_1}} + \frac{K_2}{\sqrt{\ell_2}} + \frac{K_3}{\sqrt{\ell_3}} \right)^2} . \quad (4.10)$$

Приклад 4.1. Визначити втрати окремих ліній на рисунку 4.2, якщо $Q = 250$ л/с; $d_1 = 300$ мм; $\ell_1 = 500$ м; $d_2 = 250$ мм; $\ell_2 = 300$ м; $d_3 = 400$ мм; $\ell_3 = 800$ м.

Розв'язання

1 Визначаємо втрати напору за формулою (4.10):

$$h_0 = \frac{0,250^2}{\left(\frac{1,12}{\sqrt{500}} + \frac{0,69}{\sqrt{300}} + \frac{2,40}{\sqrt{800}} \right)^2} = 2,04 \text{ м},$$

де K – витратна характеристика (дивись додаток Г).

2 Визначаємо втрати за формулою (4.9):

$$Q_1 = 1,12 \sqrt{\frac{2,04}{500}} = 0,0714 \text{ м}^3/\text{с} = 71,4 \text{ л/с};$$

$$Q_2 = 0,69 \sqrt{\frac{2,04}{300}} = 0,0572 \text{ м}^3/\text{с} = 57,3 \text{ л/с};$$

$$Q_3 = 2,40 \sqrt{\frac{2,04}{800}} = 0,1213 \text{ м}^3/\text{с} = 121,3 \text{ л/с}.$$

Перевірка: $Q = 71,4 + 57,3 + 121,3 = 250$ л/с.

IV Розрахунок **розгалужених глухих і кільцевих** трубопроводів виконується з використанням формул (4.8) і (4.9), за якими складено таблиці, графіки і програми для ЕОМ стосовно

різноманітних типів труб. Докладно методи розрахунків розглядаються в розділі “Водопостачання та водовідвід”.

5 ВИТІКАННЯ РІДИНИ КРІЗЬ ОТВОРИ І НАСАДКИ

Витікання крізь отвори і насадки охоплює широке коло питань, пов'язаних з розрахунком як простого витікання з резервуарів, так і складного руху рідини в гідросистемах (сопла, форсунки тощо). Основні розрахункові параметри, що потребують визначення, – це витрата, швидкість, напір, розмір перерізу і час витікання.

5.1. Витікання крізь отвори

При витіканні рідини крізь отвори розрізняють:

– малі отвори - $a \leq 0,1H$ (рисунок 5.1);

– великі отвори - $a > 0,1H$;

де a – вертикальний розмір отвору;

H – напір над центром отвору;

а також:

– отвори в тонкій стінці – опори зосереджені на одній площині (гострі кромки);

– отвори в товстій стінці – опори об'ємні (без гострих кромок).

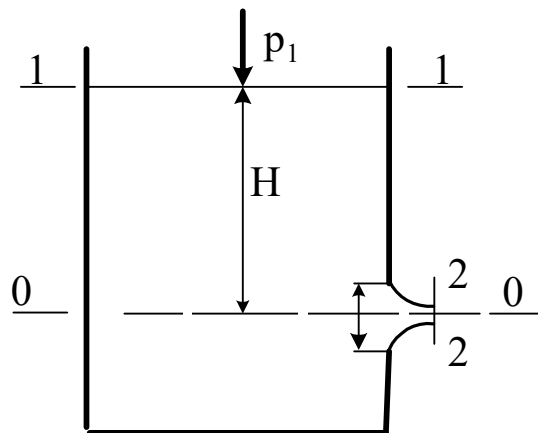


Рисунок 5.1

Розглянемо витікання рідини крізь малий отвір у тонкій стінці при сталому напорі. У цьому випадку струмінь рідини знає двох видів опорів: місцевий опір на вході в отвір і опір під час звуження струмнини на виході. Звуження відбувається внаслідок дії сил інерції бокових струменів, які рухаються під кутом до осі отвору. Запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 відносно площини порівняння 0-0, яка проведена крізь центр ваги перерізу 2-2 (рисунок 5.1):

$$Z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha V_2^2}{2g} + h_g,$$

де $Z_1 = H$;

$$Z_2 = 0;$$

$$p_1 = p_2 = p_{атм};$$

$$V_1 \cong 0;$$

$V_2 = V_c$ – швидкість у стиснутому перерізі;

$$h_g = \zeta \frac{V_c^2}{2g},$$

тоді

$$H = \frac{\alpha V_c^2}{2g} + \zeta \frac{V_c^2}{2g} = \frac{V_c^2}{2g}(\alpha + \zeta),$$

або

$$V_c = \sqrt{\frac{1}{\alpha + \zeta}} \cdot \sqrt{2gH} = \varphi \sqrt{2gH}, \quad (5.1)$$

де $\sqrt{\frac{1}{\alpha + \zeta}} = \varphi$ – коефіцієнт швидкості,

і витрата:

$$Q = \omega_c \cdot V_c = \varepsilon \omega \varphi \sqrt{2gH} = \mu \omega \sqrt{2gH}, \quad (5.2)$$

де ω_c – площа стиснутого перерізу;

ε – коефіцієнт стиску;

μ – коефіцієнт втрати.

Фізичний зміст коефіцієнтів:

$\varphi = \frac{V}{V_m}$ – відношення дійсної швидкості до теоретичної –

ураховує зменшення швидкості внаслідок місцевого опору на вході в отвір;

$\varepsilon = \frac{\omega_c}{\omega}$ – відношення стиснутої площі до площі отвору –
ураховує зменшення площі струменя у стиснутому перерізі;

$\mu = \frac{Q}{Q_m}$ – відношення дійсної витрати до теоретичної –
ураховує зменшення витрати внаслідок сумарних втрат напору.

Час витікання рідини з посудини при змінному напорі ви-
значається за формулою

$$t = \frac{2\Omega H}{\mu\omega\sqrt{2gH}}, \quad (5.3)$$

де Ω – площа перерізу посудини.

Таблиця 5.1 – Коефіцієнти витрати для малих круглих і квадратних отворів

Напір над центро м отвору H, м	Коефіцієнт витрати μ					
	для круглого отвору з діаметром d , м			для квадратного отвору зі стороною квадрата d , м		
	0,015	0,06	0,3	0,015	0,06	0,3
0,2	0,62	0,60	-	0,63	0,61	-
0,3	0,62	0,60	0,59	0,62	0,61	0,6
0,5	0,61	0,60	0,59	0,62	0,61	0,6
1	0,61	0,60	0,60	0,61	0,61	0,6
2	0,60	0,60	0,60	0,61	0,60	0,6
6	0,60	0,60	0,59	0,60	0,60	0,6
15	0,59	0,59	0,59	0,60	0,60	0,6

5.2 Витікання рідини з насадків

Насадок – короткий патрубок, довжина якого складає 3÷4
внутрішнього розміру.

Насадки використовуються з метою підвищення витрати та одержування струмини з потрібними параметрами (швидкість, дальність польоту, компактність, дисперсність).

Витрата підвищується внаслідок утворення вакууму у стиснутому перерізі, а параметри – конструкцією насадка.

Формула для визначення витрати при витіканні рідини з насадків виводиться аналогічно отворам і має таку саму структуру:

$$Q = \mu_n S \sqrt{2gH}; \quad (5.4)$$

де μ_n – коефіцієнт витрати насадка.

6 РІВНОМІРНИЙ СТАЛИЙ РУХ РІДИНИ У ВІДКРИТИХ ПОТОКАХ

Рух у відкритих каналах характеризується наявністю вільної поверхні; при цьому змочений периметр χ є лише частиною загального периметра живого перерізу

Під час рівномірного руху у відкритому руслі $V = const$. Сталими будуть також площа ω , форма русла, глибина h , змочений периметр χ , гідравлічний радіус R (рисунок 6.1).

Крім середньої швидкості V , мають бути постійними також і місцеві швидкості вздовж кожної лінії течії.

Глибину рівномірного руху h_0 називають **нормальною** або **побутовою**.

Внаслідок того, що при безнапірному русі швидкості і глибини в перерізах однакові, а п'єзометрична лінія збігається з вільною поверхнею, буде мати місце рівність уклонів: дна, п'єзометричного і гідравлічного:

$$i = J_p = J. \quad (6.1)$$

З урахуванням цього використовуємо формулу Шезі для розрахунку рівномірного руху

$$Q = \omega c \sqrt{R \cdot i}, \quad (6.2)$$

де i – уклон дна русла.

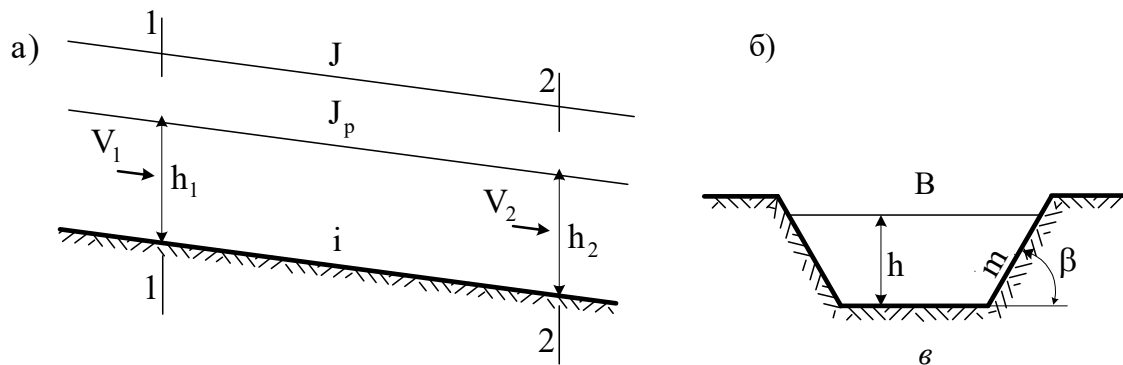


Рисунок 6.1

Найбільш зручною для виконання робіт є трапецеїдальна форма поперечного перерізу русла, елементи якої визначаються за формулами:

– площа живого перерізу:

$$\omega = (e + mh)h, \quad (6.3)$$

де e – ширина русла по дну;

$m = ctg\beta$ – коефіцієнт закладання схилу;

h – глибина потоку;

– змочений периметр:

$$\chi = e + 2h\sqrt{1 + m^2}; \quad (6.4)$$

– гідравлічний радіус:

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (6.5)$$

При розрахунку відкритих русел існує дві групи задач:

– відомі деякі параметри, потрібно визначити невідому величину;

– потрібно визначити глибину води в каналі при відомих інших параметрах.

Задачі першої групи розв’язуються з застосуванням формули (6.2) у такому порядку:

– визначаємо площу поперечного перерізу за формулою (6.3);

– визначаємо змочений периметр і гідравлічний радіус за формулами (6.4) і (6.5);

– визначаємо коефіцієнт Шезі за формулою (3.32);

– визначаємо витрату за формулою Шезі (6.2).

Якщо невідома якась величина при відомій витраті, тоді формула (3.52) розв’язується відносно потрібної величини.

Задачі другої групи розв’язуються графоаналітичним способом за формулою (6.2) у такому порядку:

– задаємося довільно вибраною глибиною h_1 (краще задатися $h_1 = 1,0$ м) і послідовно визначаємо значення: $\omega_1, \chi_1, R_1, c_1$ і Q_1 ;

– порівнюємо отриману витрату Q_1 з заданою в задачі і задаємося глибиною h_2 :

$$Q_1 < Q_3 \Rightarrow h_2 > h_1;$$

$$Q_1 > Q_3 \Rightarrow h_2 < h_1;$$

при глибині h_2 також визначаємо витрату Q_2 , яку порівнюємо знову з Q_3 .

Таким чином, отримуємо декілька значень h_i і Q_i , за якими будуємо графік $Q = f(h)$ (рисунок 6.2) і за заданою витратою визначаємо шукану глибину.

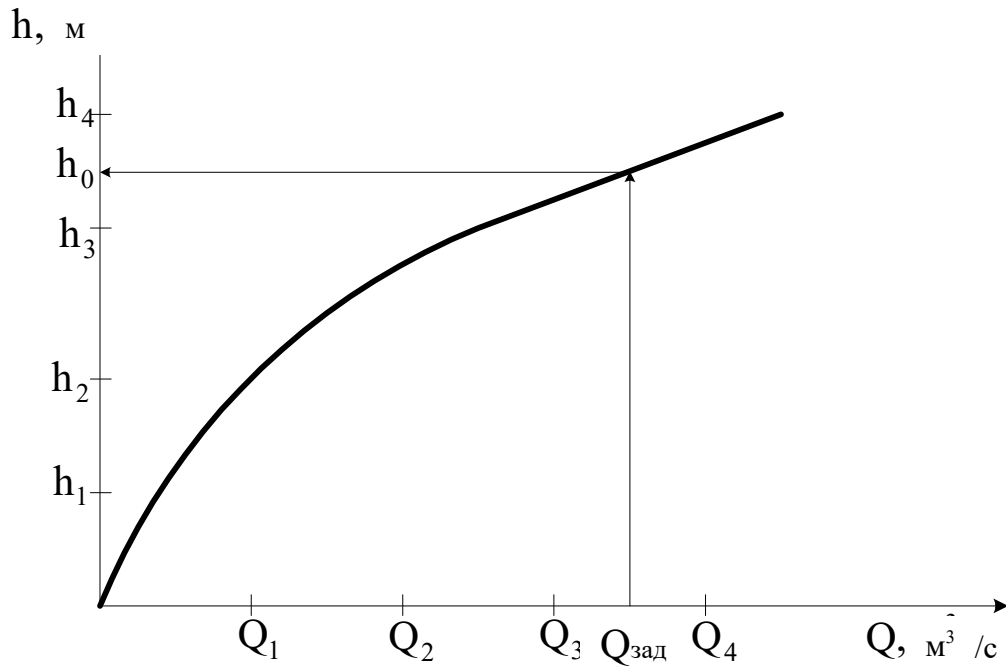


Рисунок 6.2

7 НЕРІВНОМІРНИЙ СТАЛИЙ РУХ ВОДИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ

Нерівномірний рух води виникає в непризматичних руслах або при побудові різноманітних споруд у потоці (мости, греблі, перепади тощо). При цьому русі параметри потоку змінюються по довжині.

Основна мета розрахунку русел з нерівномірним рухом води – це визначення координат вільної поверхні потоку та побудова відповідної кривої.

7.1 Основні поняття нерівномірного руху води

Питома енергія поперечного перерізу потоку – повна енергія живого перерізу потоку, обчислена відносно площини

порівняння, яка проходить через найнижчу точку дна даного перерізу (рисунок 7.1):

$$E = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2}. \quad (7.1)$$

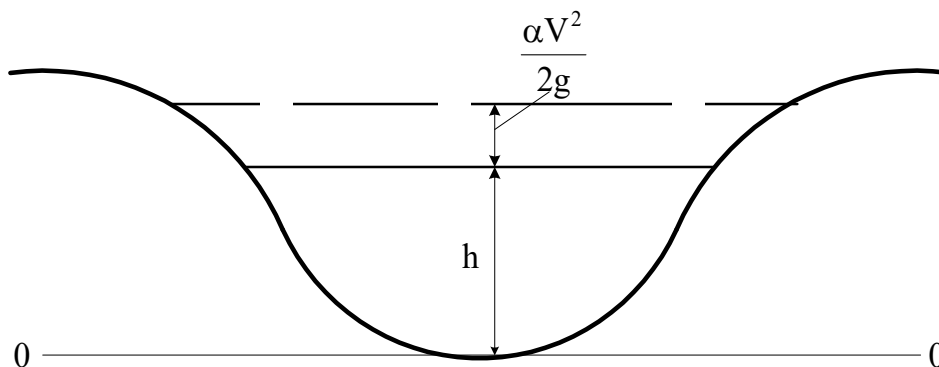


Рисунок 7.1

Критична глибина – глибина потоку, при якій питома енергія перерізу має мінімальне значення (E_{\min}). Поняття критичної глибини пояснимо аналізом формули (7.1):

при $h \rightarrow 0$ $V \rightarrow \infty$, отже, $E \rightarrow \infty$;

$h \rightarrow \infty$ $V \rightarrow 0$, отже, $E \rightarrow \infty$.

Ураховуючи безперервність функції $E = f(h)$, можна зробити висновок про наявність мінімуму – E_{\min} .

Покажемо це на графіку $E = f(h)$ (рисунок 7.2).

Величину критичної глибини визначаємо за рівнянням питомої енергії перерізу (рисунок 7.3), беручи до уваги, що

$$V_k = \frac{Q}{\omega_k}; \quad d\omega = B \cdot dh \quad \text{у} \quad \frac{d\omega}{dh} = B;$$

тоді

$$\frac{dE}{dh} = 1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^3}.$$

при $h = h_k$ функція $E = f(h)$ має мінімум і:

$$1 - \frac{\alpha Q^3}{g} \cdot \frac{B_k}{\omega_k^3} = 0$$

або

$$\frac{\omega_k^3}{B_k} = \frac{\alpha Q^2}{g}. \quad (7.2)$$

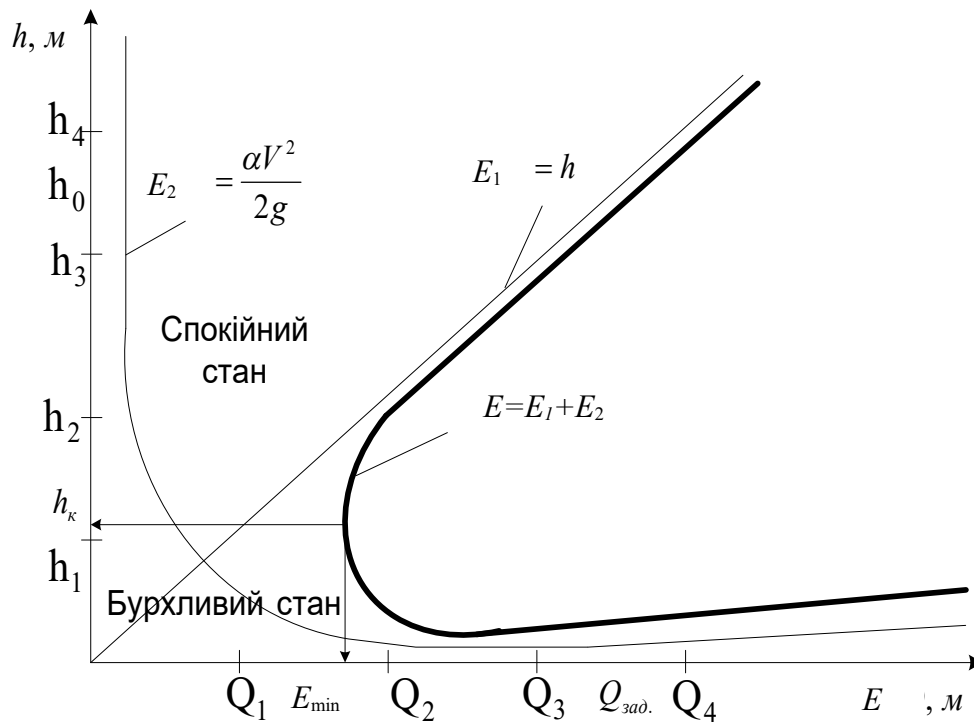


Рисунок 7.2

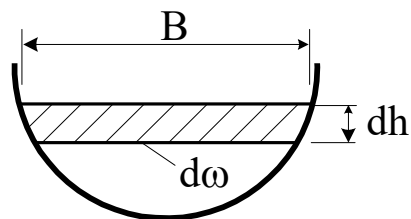


Рисунок 7.3

Критична глибина для будь-якої форми русла визначається методом послідовного наближення за формулою (7.2) при заданій витраті:

- задаємося будь-якою глибиною h_1 (краще 1,0 м);
- визначаємо величини $B_1, \omega_1, \omega_1^3$ і $\frac{\omega_1^3}{B_1}$;
- порівнюємо величину $\frac{\omega_1^3}{B_1}$ з відомою $\frac{\alpha Q^2}{g}$;
- задаємося глибиною h_2 ;

$$\frac{\omega_1^3}{B_1} > \frac{\alpha Q^2}{g} \Rightarrow h_2 < h_1;$$

$$\text{при } \frac{\omega_1^3}{B_1} < \frac{\alpha Q^2}{g} \Rightarrow h_2 > h_1;$$

- знову визначаємо величини $B_2, \omega_2, \omega_2^3$ і $\frac{\omega_2^3}{B_2}$ і порівнюємо величину $\frac{\omega_2^3}{B_2}$ з $\frac{\alpha Q^2}{g}$.

Таким чином, маємо координати для побудови кривої $\frac{\omega^3}{B} = f\left(\frac{\alpha Q^2}{g}\right)$, за якою при відомому значенні $\frac{\alpha Q^2}{g}$ визначаємо критичну глибину (рисунок 7.4).

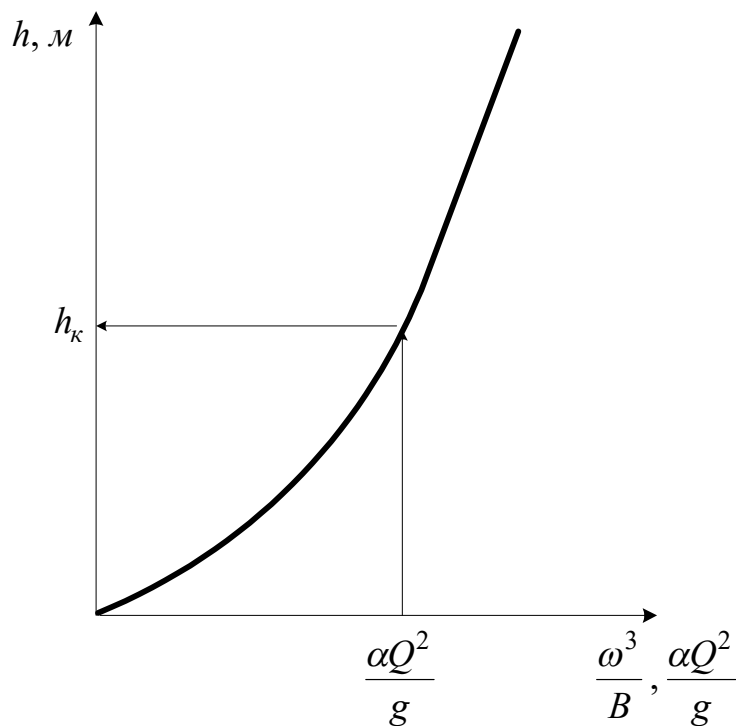


Рисунок 7.4

При прямокутній формі русла рівняння (1.2) відносно h_k має вигляд:

$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}. \quad (7.3)$$

Стан руху потоку – показник кінетичності потоку. Залежно від співвідношення глибини потоку і критичної глибини потоки бувають:

- у спокійному стані - $h > h_k$;
- у критичному стані - $h \cong h_k$;
- у бурхливому стані - $h < h_k$ (див. рисунок 7.5).

Бурхливі потоки мають малі глибини і великі швидкості і, як наслідок, велику розмиваючу спроможність.

Тип кривої вільної поверхні – характер зміни параметрів потоку по довжині:

- крива підпору – глибини зростають, а швидкості – зменшуються;
- крива спаду – навпаки.

Зони потоку – простір потоку, розташований між дном, нормальною і критичною глибинами. Вільна поверхня може розташовуватись у трьох зонах: а, б, с. Залежно від стану потоку можливі такі форми вільної поверхні, як на рисунку 7.5.

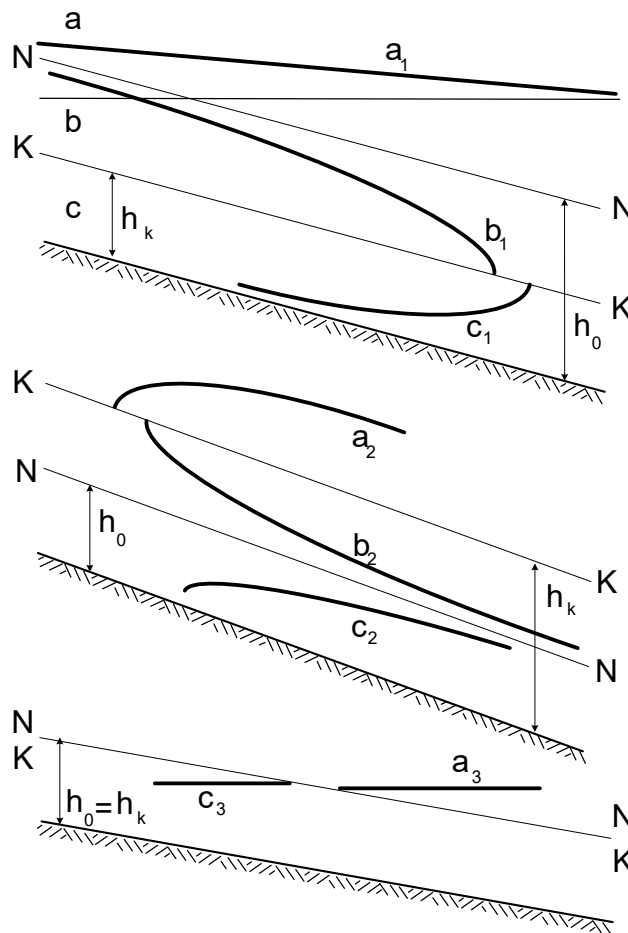


Рисунок 7.5

7.2 Визначення координат вільної поверхні

Координати вільної поверхні потоку визначають або методами приблизного інтегрування основного диференціального рівняння сталого нерівномірного руху (методи М.М. Павловського, Б.А. Бахметьєва, М.Д. Чортоусова та ін.), або з використанням рівнянь Д. Бернуллі і Шезі для коротких ланок потоку, виходячи з припущення рівномірного руху на них (метод В.І. Чарномського). Розглянемо останній метод.

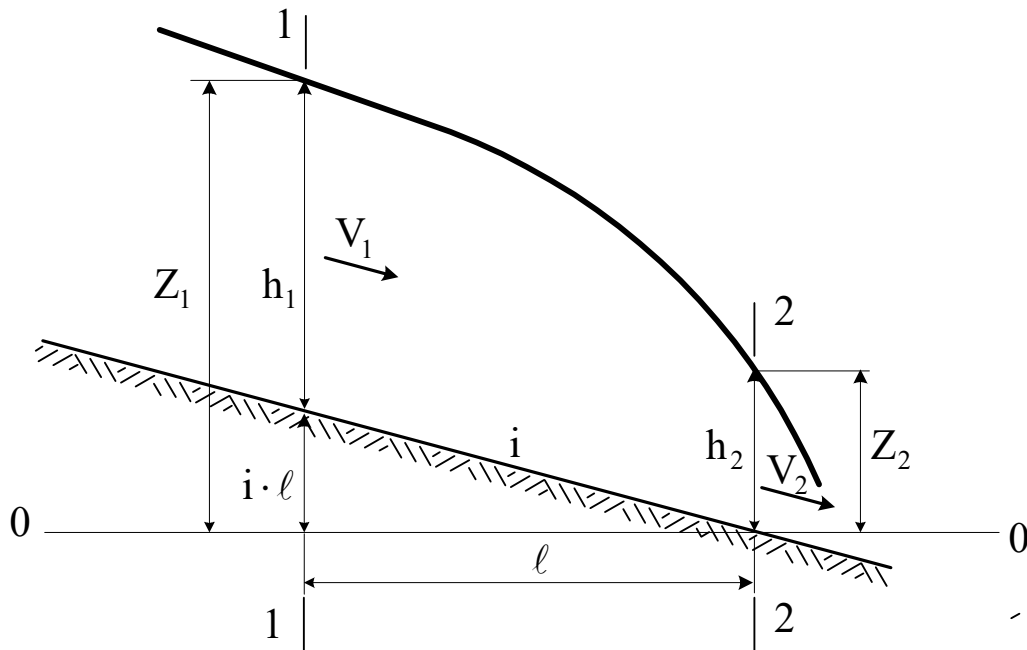


Рисунок 7.6

Запишемо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 (рисунок 7.6).

$$Z_1 + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = Z_2 + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_e,$$

де Z_1 і Z_2 – відмітки вільної поверхні в перерізах 1-1 і 2-2.

Враховуючи, що $\alpha_1 \approx \alpha_2 = 1$; $Z_1 = h_1 + i \cdot l$; та $Z_2 = h_2$, маємо

$$h_1 + i \cdot l + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + h_e.$$

Оскільки місцеві опори відсутні, запишемо

$$h_g = J \cdot \ell = i_f \cdot \ell,$$

де $J = i_f$ – гідравлічний уклон (уклон тертя) з рівняння Шезі,

$$i_f = \frac{Q_{сеп.}^2}{\omega_{сеп.}^2 \cdot C_{сеп.}^2 \cdot R_{сеп.}}.$$

Тоді маємо

$$h_1 + i \cdot \ell + \frac{V_1^2}{2g} = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} + i_f \cdot \ell,$$

або

$$(i - i_f) \cdot \ell = \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) - \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) = E_1 - E_2;$$

звідки

$$\ell = \frac{E_1 - E_2}{i - i_f}. \quad (7.4)$$

Порядок розрахунку координат кривої вільної поверхні:

- визначаємо нормальну глибину з рівняння Шезі (формула (6.2)) графоаналітичним методом;
- визначаємо критичну глибину за формулами (7.2), (7.3);
- встановлюємо стан потоку і форму кривої вільної поверхні (рисунок 7.5);
- визначаємо максимальну і мінімальну глибини кривої та розділяємо її на чотири ланки між цими глибинами (рисунок 7.7);

$$h_1 = \frac{h_{\max} + h_{\min}}{2}; h_2 = \frac{h_{\max} + h_1}{2}; h_3 = \frac{h_{\min} + h_1}{2};$$

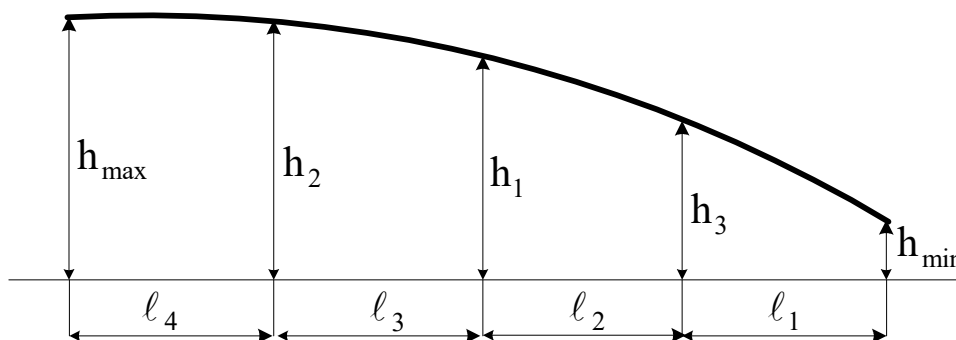


Рисунок 7.7

- визначаємо довжини ланок за формулою (7.4) у такій послідовності:

а) визначаємо середню глибину на ланці:

$$h_{\text{сер.}} = \frac{h_1 + h_2}{2};$$

б) визначаємо середні значення:

$$\begin{aligned}\omega_{\text{сер.}} &= (\nu + mh_{\text{сер.}})h_{\text{сер.}}; \\ \chi_{\text{сер.}} &= \nu + 2h_{\text{сер.}}\sqrt{1+m^2}; \\ R_{\text{сер.}} &= \frac{\omega_{\text{сер.}}}{\chi_{\text{сер.}}}; \quad c_{\text{сер.}} = \frac{1}{n}R_{\text{сер.}}^{1/6};\end{aligned}$$

в) визначаємо гідравлічний уклон:

$$i_f = \frac{Q^2}{\omega_{\text{сер.}}^2 \cdot c_{\text{сер.}}^2 \cdot R_{\text{сер.}}};$$

г) визначаємо питомі енергії перерізів:

$$E_1 = h_1 + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_1^2} \quad \text{та} \quad E_2 = h_2 + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega_2^2},$$

де $\omega_1 = (\nu + mh_1)h_1$; $\omega_2 = (\nu + mh_2)h_2$;

д) визначаємо довжину ланки за формулою (7.4);

- будуємо криву вільної поверхні за результатами розрахунків у такій послідовності:

а) визначаємо горизонтальний і вертикальний масштаби;

б) визначаємо перевищення між початком і кінцем кривої:

$$\Delta h = i \cdot L;$$

де L – загальна довжина кривої;

i – уклон дна;

в) будуємо лінію дна у вибраних масштабах (рисунок 7.8);

г) будемо криву вільної поверхні, відкладаючи довжини ланок і глибини, починаючи від загальної глибини, при цьому глибини відкладаються від лінії дна.

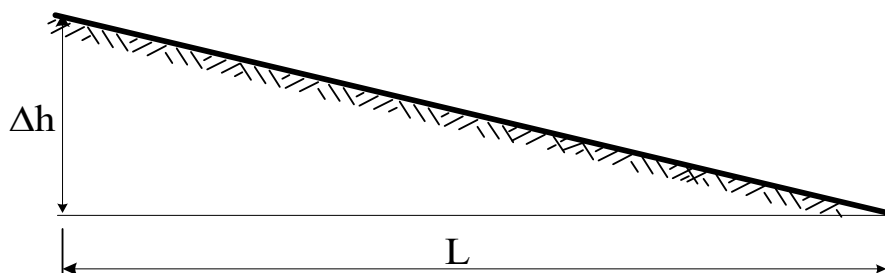


Рисунок 7.8

Крива вільної поверхні дозволяє розв'язувати ряд практичних задач:

- маючи відмітку берегів, визначати де потік виходить на пойму і яка територія буде при цьому затоплена;
- визначити глибини в будь-якому перерізі потоку та швидкості руху за формулою

$$v = \frac{Q}{\omega}; \quad (7.5)$$

- зробити висновок про розмив русла, порівняти швидкість руху і розмиваючу швидкість.

8 ВОДОЗЛИВИ

Водозливи, це споруди, які перегороджують потік, але пропускають крізь власну верхню грань воду.

Вони класифікуються за такими ознаками:

- форма вирізу в стінці (трикутні, чотирикутні, трапецеїдальні та овоїдальні);
- розташування стінки в плані (прямі, косі, ламані і криволінійні);
- співвідношення товщини стінки і напору над водозливом (з тонкою стінкою – $\delta \leq 0,67H$ (рисунок 8.1, а); практичного профілю –

$0,67H < \delta \leq (2 \div 3)H$ (рисунок 8.1, б); з широким порогом – $(2 \div 3)H < \delta < 8H$ (рисунок 8.1, в);

- співвідношення напору над водозливом і глибини нижче водозлива (незатоплені – $\frac{h_0}{H} < 0,8$; затоплені – $\frac{h_0}{H} \geq 0,8$).

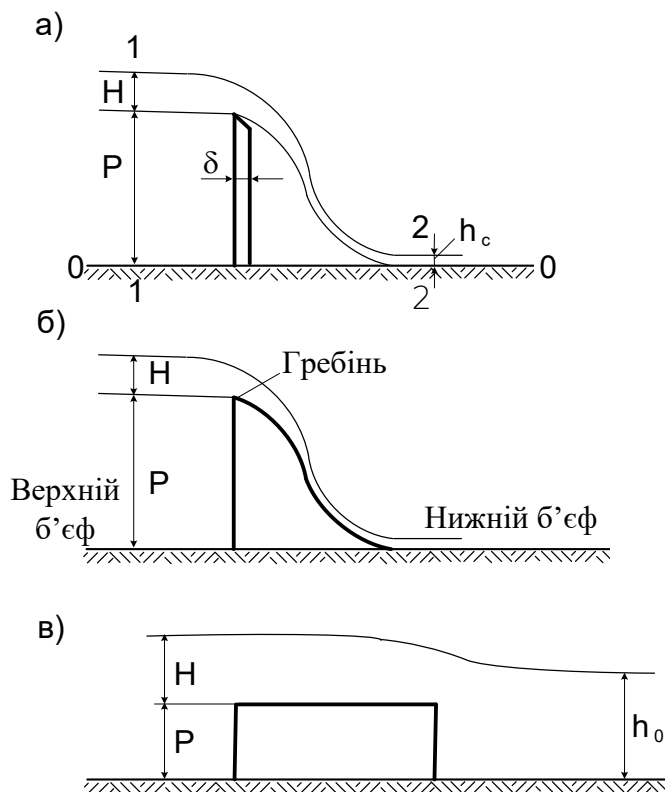


Рисунок 8.1

Теорія водозливу з широким порогом використовується під час розрахунку водопропускних труб і малих мостів на залізничному транспорті.

Розрахункову формулу для визначення витрати через водозлив можна отримати з рівняння Бернуллі, записаного для перерізів 1-1 і 2-2 (рисунок 8.1, а). Для прямокутного незатопленого водозливу вона має вигляд

$$Q = m\omega\sqrt{2gH_0} = m \cdot v \cdot H\sqrt{2gH_0} = m \cdot v\sqrt{2g}H^{2/3}; \quad (8.1)$$

де m – коефіцієнт витрати водозливу, який враховує зменшення витрати за рахунок втрат напору;

H_0 – повний напір.

Для прямокутного затопленого водозливу

$$Q = \sigma \cdot m \cdot \epsilon \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (8.2)$$

де σ – коефіцієнт затоплення, який ураховує зменшення витрати за рахунок затоплення.

8.1 Гідравлічний стрибок

Гідравлічний стрибок – це перехід від глибини меншої за критичну до глибини більшої за критичну і від швидкостей більших до менших на порівняно короткій відстані при переході від бурного стану потоку до спокійного. Такий перехід відбувається при переливанні рідини через водозливи, при витіканні з-під щита і при переході дна русла від уклонів понад критичних до менш критичних (рисунок 8.2).

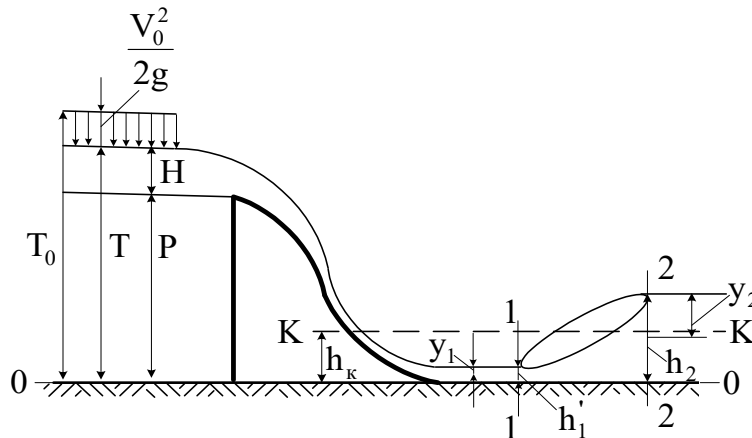


Рисунок 8.2

У стрибку відбувається гасіння кінетичної енергії, яке супроводжується утворенням на поверхні водовертних вальців.

Глибини до стрибка і після нього називають спряженими або взаємними. Вони визначаються за рівнянням гідравлічного стрибка, яке можна отримати, застосувавши для об'єму 1-1÷2-2 закон зміни кількості руху під дією імпульсу сил за час dt :

$$\frac{\gamma}{g} \alpha (QV_2 - QV_1) dt = (P_1 - P_2) dt = (\omega_1 \cdot \gamma \cdot y_1 - \omega_2 \cdot \gamma \cdot y_2) dt,$$

звідки

$$\frac{\alpha Q^2}{g\omega_1} + \omega_1 y_1 = \frac{\alpha Q^2}{g\omega_2} + \omega_2 y_2; \quad (8.3)$$

де y_1 та y_2 – глибина занурення центрів ваги перерізів у рідину.

Рівняння гідравлічного стрибка розв’язується підбором або за допомогою спеціальних графіків і таблиць.

Для прямокутного русла, де $\omega = v \cdot h$, $e = \frac{h}{2}$ і $Q = q \cdot v$, маємо

$$\left. \begin{aligned} h_1 &= \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8h_{np}^3}{h_2^3}} - 1 \right] \\ h_2 &= \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8h_{np}^3}{h_1^3}} - 1 \right] \end{aligned} \right\} \quad (8.4)$$

Довжина гідравлічного стрибка визначається за різноманітними наближеними формулами, наприклад за формулою М.Д. Чортоусова

$$\ell_n = 4,5h_2 \quad (8.5)$$

або М.М. Павловського

$$\ell_n = 2,5(1,9h_2 - h_1). \quad (8.6)$$

8.2 Спряження б’єфів

Спряження б’єфів – це спряження потоків при переливанні через водозлив з верхнього б’єфу в нижній б’єф за допомогою гідравлічного стрибка.

Можливі три види спряження:

- 1 – спряження з відігнаним стрибком - $h_2 > h_0$;
- 2 – спряження зі стрибком у стиснутому перерізі – $h_2 \approx h_0$;
- 3 – спряження з затопленим стрибком $h_2 < h_0$.

Перші два види спряження не бажані за спорудами, тому що між спорудою і стрибком є ланка бурхливого потоку з великою швидкістю та розвиваючою здатністю (рисунок 8.3).

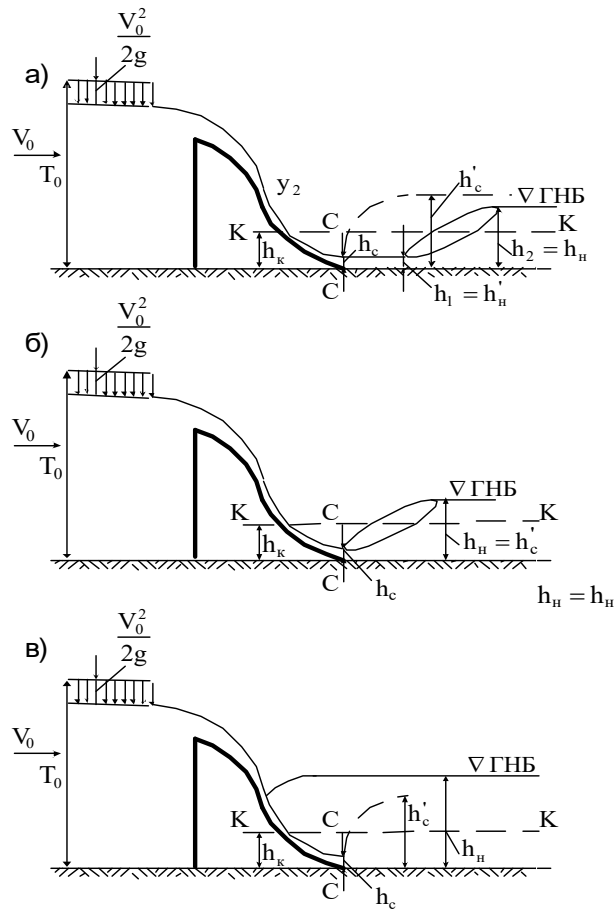


Рисунок 8.3

Вид спряження визначається в такій послідовності:

- визначаємо стисливу глибину h_c із рівняння Бернуллі, записаного для перерізів 1-1 та 2-2 (рисунок 8.4)

$$T_0 = h_c + \frac{q^2}{2gh_c^2 \cdot \varphi_c^2}, \quad (8.5)$$

де $T_0 = T + \frac{\alpha V_1^2}{2g}$ – повний напір у перерізі 1-1;

$T = P + H$ – статичний напір;

$q = \frac{Q}{B}$ – пересічна витрата;

φ – коефіцієнт швидкості.

Це рівняння розв'язується підбором;

- визначаємо нормальну глибину – h_0 (див. задачі другої групи с. 46);

- визначаємо глибину h_2 (формула (8.4)), прийнявши $h_1 = h_c$;

- визначаємо вид спряження.

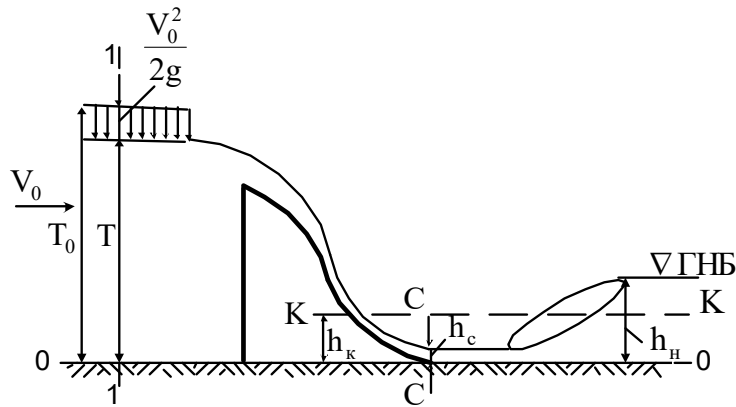


Рисунок 8.4

Якщо отримали перші два види спряження, то застосовуємо в нижньому б'єфі водобійні стінки, колодязі або підвищуємо шорсткість із каміння, залізобетонних відходів тощо.

8.3 Гідравліка малих мостів і труб

Малі мости і труби розраховуються як водозливи з широким порогом. Основною розрахунковою формулою для мостів є формула (8.2):

$$Q = \sigma \cdot m \cdot \epsilon_m \sqrt{2g} H^{3/2},$$

звідки

$$\epsilon_m = \frac{Q}{\sigma m \sqrt{2g} H^{3/2}}. \quad (8.6)$$

При розрахунку отвору моста вводяться коефіцієнти: затоплення σ , розрахункові коефіцієнти k та k_n , які залежать від співвідношення $n = \frac{h_0}{H}$.

Порядок розрахунку:

- визначаємо нормальну глибину h_0 за допомогою формули Шезі (6.2);

- визначаємо напір перед мостом:

$$H = \frac{V_{sp}^2 \cdot k^2}{\mu^2 \cdot 2g}; \quad (8.7)$$

- встановлюємо схему протікання води під мостом:

$$\frac{h_0}{H} < 0,8 \text{ – незатоплена; } \frac{h_0}{H} \geq 0,8 \text{ – затоплена;}$$

- визначаємо отвір моста ϵ_m .

Розрахунок труб виконується залежно від гідравлічного режиму роботи труби:

- безнапірний ($H < 1,2d$):

$$Q = \mu \cdot \epsilon \cdot k \sqrt{2g} H^{3/2}, \quad (8.8)$$

де μ – коефіцієнт втрати ($\mu = 0,335$);

ϵ_k – середня ширина потоку (визначається за графіками).

- напірний ($H = (1,2 \div 1,4)d$):

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H - (0,708 - 2i_T)d)}, \quad (8.9)$$

де $\mu = 0,7$;

i_T – уклон труби;

- напірний ($H > 1,2d$):

$$Q = \mu \omega \sqrt{2g(H + i_T \cdot \ell - 0,85d)}, \quad (8.10)$$

де

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{1 + \zeta_{ex} + \lambda \frac{\ell}{d}}}; \quad (8.11)$$

ℓ – довжина труби,

$$\ell = 2H_{nac}m + B \quad ; \quad (8.12)$$

H_{nac} – висота насипу;

m – коефіцієнт відкосу;

B – ширина насипу по верху.

Порядок розрахунку виходячи з напірного режиму:

- визначаємо діаметр труби:

$$d = \sqrt{\frac{4Q}{\pi V_{cp}}}; \quad (8.13)$$

- назначаемо стандартний діаметр (0,75; 1,0; 1,25; 1,50; 2,0) і визначаємо фактичну швидкість:

$$V_{\phi} = \frac{4Q}{\pi d_{cm}^2}; \quad (8.14)$$

- визначаємо довжину труби за формулою (8.12) і коефіцієнт витрати за формулою (8.11);

- визначаємо напір води з формули

$$H = \frac{Q^2}{\mu^2 \omega^2 2g} + 0,85d - i_T \cdot \ell; \quad (8.15)$$

- перевіряємо умови напірного режиму: $H > 1,4d$; $H \leq (H_{нас} - 0,5)$ та $i_T < i$, де i – гідравлічний уклон, за формулою Шезі

$$i = \frac{Q^2}{\omega^2 c^2 R}. \quad (8.16)$$

9 ФІЛЬТРАЦІЯ

Фільтрацією називається рух води в порах ґрунту. Ґрунти поділяються на водоносні та водотривкі. Якщо водотривкий ґрунт є тільки знизу потоку, маємо безнапірну фільтрацію, а якщо і знизу і зверху – напірну.

Швидкість руху фільтраційного потоку при ламінарній фільтрації визначається за формулою Дарсі

$$V = k \cdot J, \quad (9.1)$$

де k – коефіцієнт фільтрації;

J – гідравлічний уклон.

Коефіцієнт фільтрації ϵ швидкістю при одиничному уклоні і визначається для різних ґрунтів дослідними або натурними методами.

При турбулентній фільтрації формула має вигляд

$$V = k_T \sqrt{J}, \quad (9.2)$$

де k_T – коефіцієнт турбулентної фільтрації.

У будівельній практиці закономірності фільтрації застосовуються при розрахунках дренажних систем, фільтруючих насипів на заплавах річок, водовідводних галерей тощо.

Метою розрахунків фільтраційних потоків є визначення витрати води (дебет) і координат кривої вільної поверхні (крива депресії).

Розрахунки виконуються за напівемпіричними формулами і уточнюються дослідним відкачуванням води.

Для круглого колодезя:

- витрата

$$Q = 1,36 \cdot k \frac{H_0^2 - h_0^2}{\lg \frac{R}{r_0}} \quad (9.3)$$

- рівняння кривої депресії

$$h = \sqrt{h_0^2 + 0,73 \frac{Q}{k} \lg \frac{r}{r_0}}. \quad (9.4)$$

Позначення наведені на рисунку 9.1.

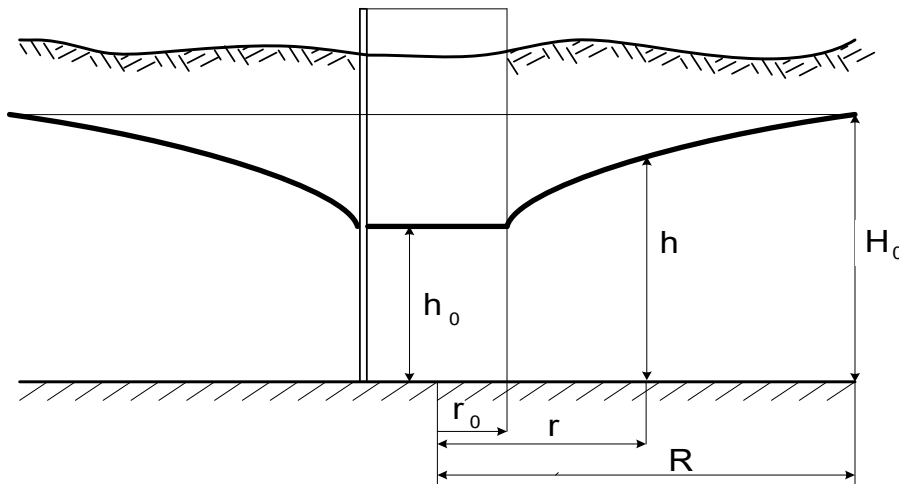


Рисунок 9.1

Для водозбірної галереї (рисунок 9.2):

- витрата на одиницю довжини галереї q :

$$q = k \frac{H_0^2 - h_0^2}{2L}; \quad (9.5)$$

- рівняння кривої депресії

$$h = \sqrt{2 \frac{q}{k} x + h_0^2}. \quad (9.6)$$

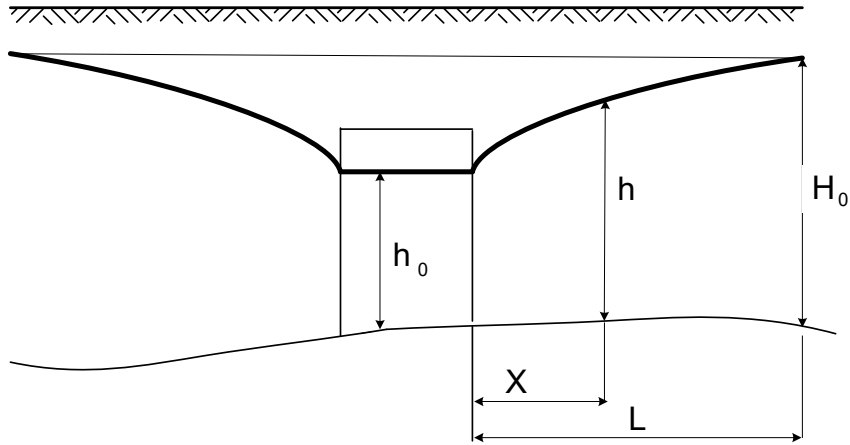


Рисунок 9.2

Для фільтруючого насипу (рисунок 9.3):

- витрата

$$q = k \frac{H}{2L_0}; \quad (9.7)$$

- рівняння кривої депресії

$$h = \sqrt{H^2 - 2 \frac{q}{k} x}. \quad (9.8)$$

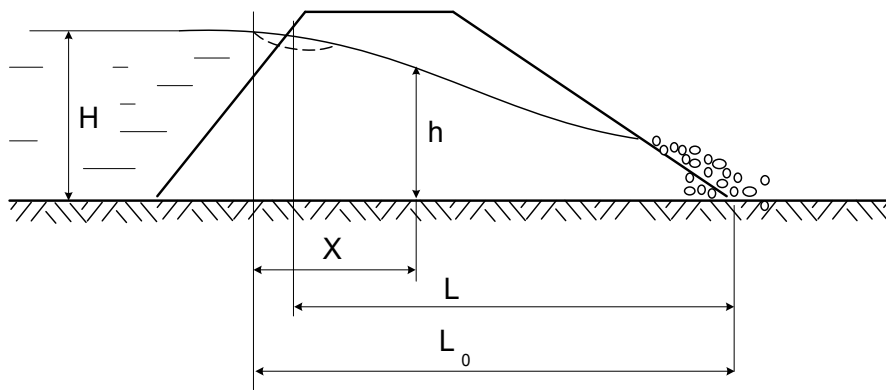


Рисунок 9.3

За кривою депресії можна визначити швидкість потоку і можливість розмиву нижнього укосу (суфозії).

10 ОСНОВИ ГІДРОЛОГІЇ І ГІДРОМЕТРІЇ

При проектуванні, будівництві та експлуатації штучних споруд на водостоках потрібно знати характеристики течії, параметри водного стоку, а також динаміку деформування русла в профілі і плані.

Вивченням цих питань, а також вимірюванням на водостоках займаються гідрологія і гідрометрія.

10.1 Гідрологія

Гідрологія вивчає закони формування і розвитку водостоків, їх водний баланс і закономірності взаємодії водного потоку з обмежувачими його гірськими породами.

Гідрологія поділяється на гідрометрію поверхневих вод суші, гідрологію океанів і морів (океанологію) і гідрологію підземних вод (гідрогеологію).

У залізничному проектуванні найбільш потрібною є гідрологія поверхневих вод, яка вивчає закони розвитку річкових систем.

Основним поняттям річкової гідрології є *річкова система* – сукупність головної річки з усіма притоками. Надходження води

в річкову систему та її витрата описуються рівнянням **водного балансу**. Прибуткова частка водного балансу:

$$P = X + C + q, \quad (10.1)$$

де X – кількість опадів;
 C – кількість конденсаційної води;
 q – кількість підземної води.

Витратна частка:

$$S = Y + Z + r \pm W; \quad (10.2)$$

де Y – кількість стікання води;
 Z – кількість випаровування води;
 r – відтікання підземної води;
 W – запас ґрунтової води.

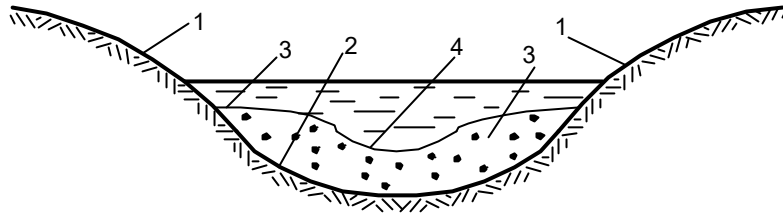
Прилегла територія річкової системи, з якої вода стікає в неї, називається водозбірним басейном. Основною геометричною характеристикою басейну є його площа, яка визначає водність річки. Залежно від площі басейну річки поділяють:

- на великі – площа більше 50 тис. км²;
- середні – площа 2 - 50 тис. км²;
- малі – площа менше 2 тис. км².

На кількість стікання води з басейну впливають його фізико-географічні характеристики, геологічна побудова, ґрунти, рослини (ліс), болота й озера.

При вивчанні річок їх поперечний переріз поділяють на такі частини (рисунок 10.1):

- **схили річкової долини** – знижена частина рельєфу, в якій протікає річка;
- **річище (дно)** – найнижча ділянка долини;
- **тальвег** – лінія найбільш глибоких точок річища;
- **заплати** – ділянки долини, на яких вода буває тільки в повінь;
- **головне русло** – частина річища з постійним водотоком.



1 – схили; 2 – річище; 3 – заплави; 4 – головне русло річки
Рисунок 10.1 – Поперечний переріз

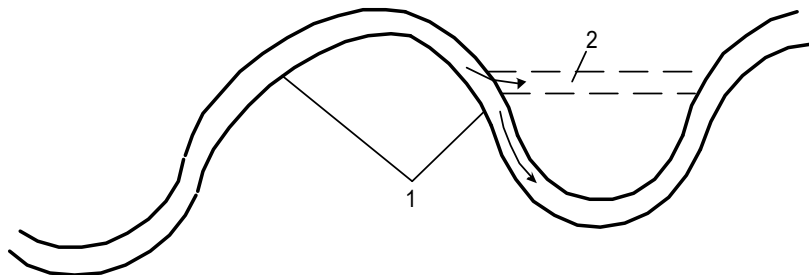
Уздовж річки є такі елементи:

- **витік** – ділянка зі сталим бігом води;
- **верхня течія річки** – ділянка після витіку з великими уклонами і швидкостями руху води;
- **середня течія** – ділянка з розвинутими заплавами, притоками, болотами й озерами;
- **нижня ділянка (дельта, лиман)** має малі уклони, поділяється на декілька рукавів, утворюючи острови;
- **гирло** – місце впадіння річки в море, озеро або другу річку (естуарій, губа).

На всіх ділянках річок внаслідок відкладання та розмивання намулу на заплавах і в головному руслі утворюються звивини річки, які називаються **меандрами**. Меандри в повільно пересуваються вздовж річки і в деяких випадках можуть спрямлятися (прорив меандра) (рисунок 10.2).

Поздовжній профіль річки характеризується уклоном як на окремих ділянках, так і середнім по всій річці.

Річні потоки мають складну кінематичну структуру в живому перерізі і вздовж потоку, обумовлену їх турбулентністю і рухомістю обмежуючих потік частинок гірських порід.



1 – меандр; 2 – спрямлення

Рисунок 10.2 – Спрямлення меандра

Внаслідок розмивання і відкладання часток гірських порід річки змінюють своє положення в профілі і плані (русловий процес). Русловий процес відбувається під впливом кінематики потоку на частки гірських порід, які при цьому пересуваються або по дну потоку (донний намул), або в потоці (зважений намул).

Прогнозування руслових деформацій є важливим при побудові на річках мостів, водозаборів тощо.

10.2 Гідрометрія

Гідрометрія вивчає теоретичні питання методів вимірювання параметрів потоків та їх практичне застосування.

Основними параметрами річкових потоків є витрати води, швидкості течії, глибини, рівні вільної поверхні, кількість замулу, а також пов'язані з ними деформації в профілі і плані річок.

При гідрологічних дослідженнях розробляються рекомендації для гідрометричних робіт, на базі яких виконується теоретичне обґрунтування методів вимірювання параметрів і розроблення конструкцій приладів і обладнання.

Гідрометричні роботи виконуються на постійних або тимчасових (оперативних) постах, на яких розбивають і закріплюють гідроствори, встановлюють перетяжки для вертушок і рейки для замірювання глибин тощо.

Рівні води вимірюються за допомогою:

- рейок зі шкалою, які встановлюються на заздалегідь забиті палі з цвяхами в середині;
- вимірювання відстані від рівня води до фіксованої точки (репера);
- поплавка з електроконтактом або радіоактивним випромінювачем.

Зараз широко застосовуються автоматичні пости з безперервною фіксацією рівня води.

Глибини вимірюють мірними рейками, жердинами, лотами (мотузка з вагою), ехолотами (ультразвуковий лот).

Вимірювання глибин виконують разом з рівнями води і за результатами промірів будують графік $\omega = f(h)$ і поперечний профіль річки.

Швидкості вимірюють поверхневими і затопленими поплавками; гідрометричними вертушками; ультразвуковими, електромагнітними і лазерними приладами.

Витрату вимірюють індикаторним методом (ступінь розбавлення барвника у воді), водозливами, а також непрямими методами за швидкістю руху води та площею живого перерізу.

Намули вимірюють батометрами, які являють собою літрову скляну пляшку на жердині, що опускається у воду на деякий час.

У сучасних методах вимірювань параметрів потоків широко застосовуються автоматичні пристрої з подальшою обробкою результатів на ЕОМ.

Застосовуються також методи аерокосмічної зйомки, яка дозволяє мати динаміку процесів у водоймах. Так, наприклад, результати спостережень за меандрами дають уявлення про тенденцію їх розвитку та можливість визначити швидкість руху меандра.

Взагалі гідрологія і гідрометрія забезпечують надійність роботи різноманітних споруд на річках.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

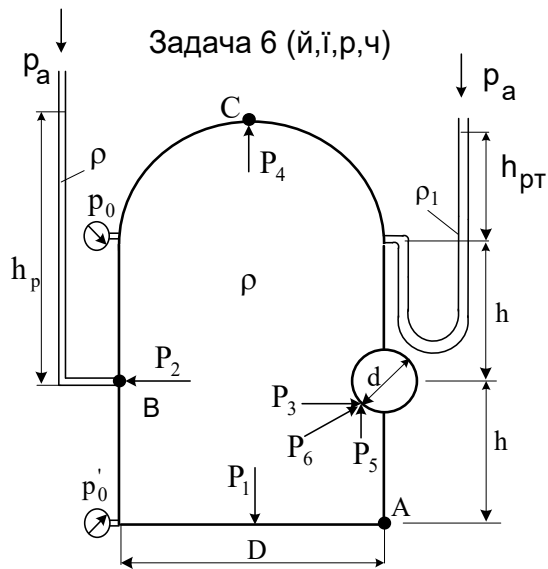
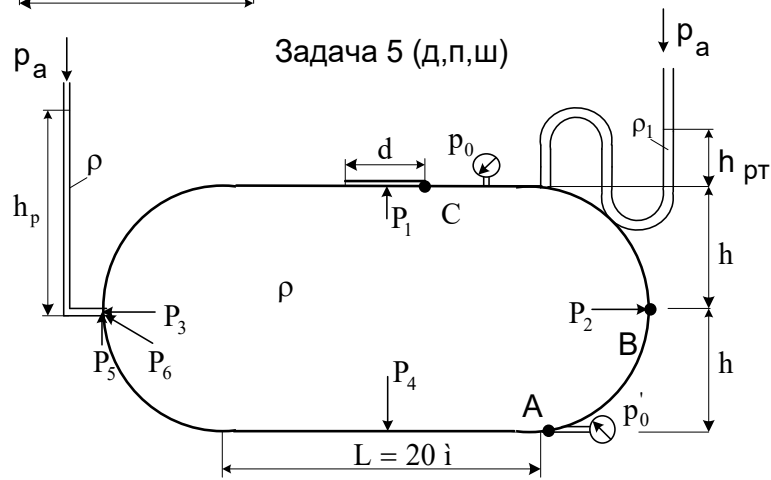
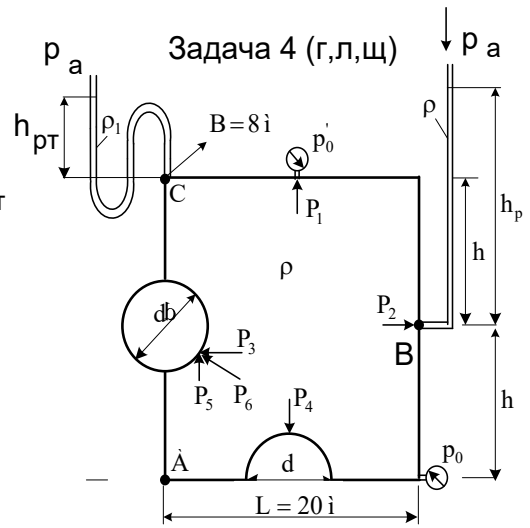
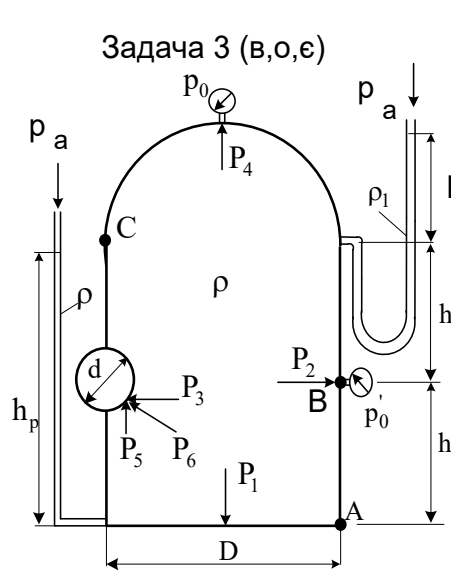
1. Константинов Н.М. и др. Гидравлика, гидрология, гидрометрия. – М.: Высшая школа, 1987. – Ч. 1, 2.
2. Киселев П.Г. Гидравлика. – М.: Энергия, 1980. – 350 с.
3. Угинчус А.А., Чугаева Е.А. Гидравлика. – Л.: Стройиздат, 1971. – 300 с.

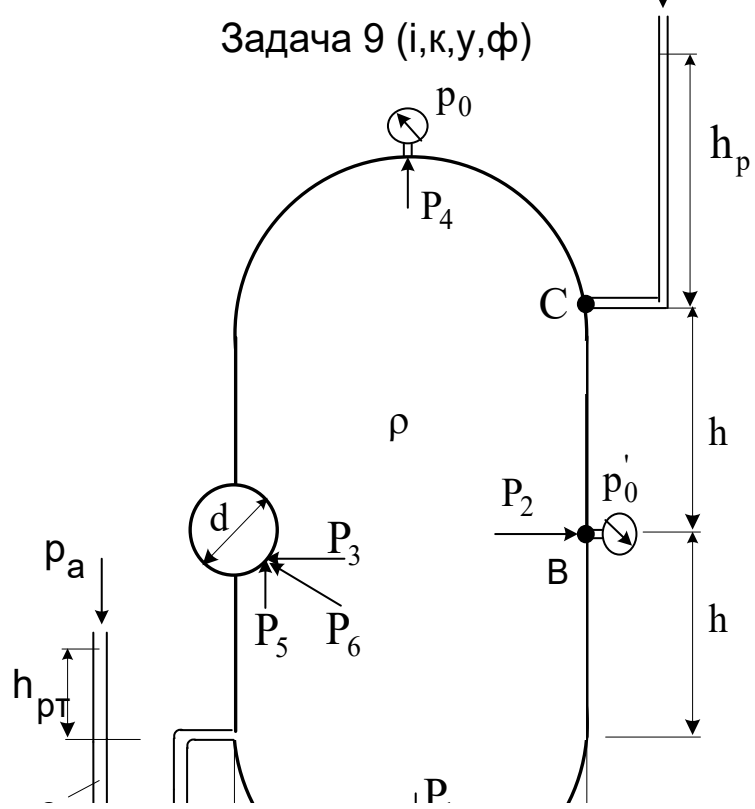
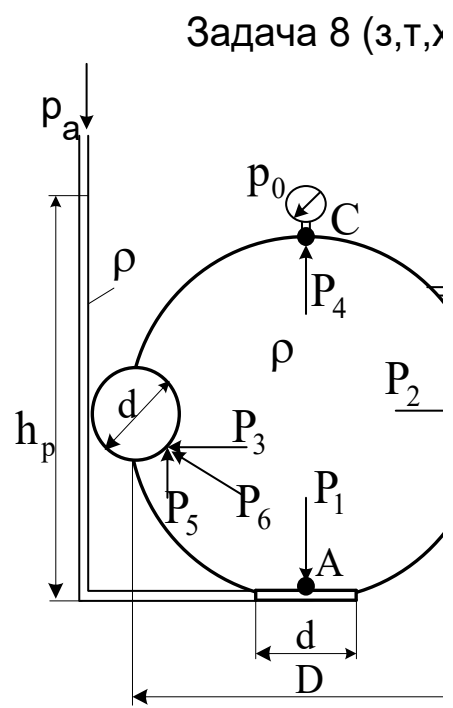
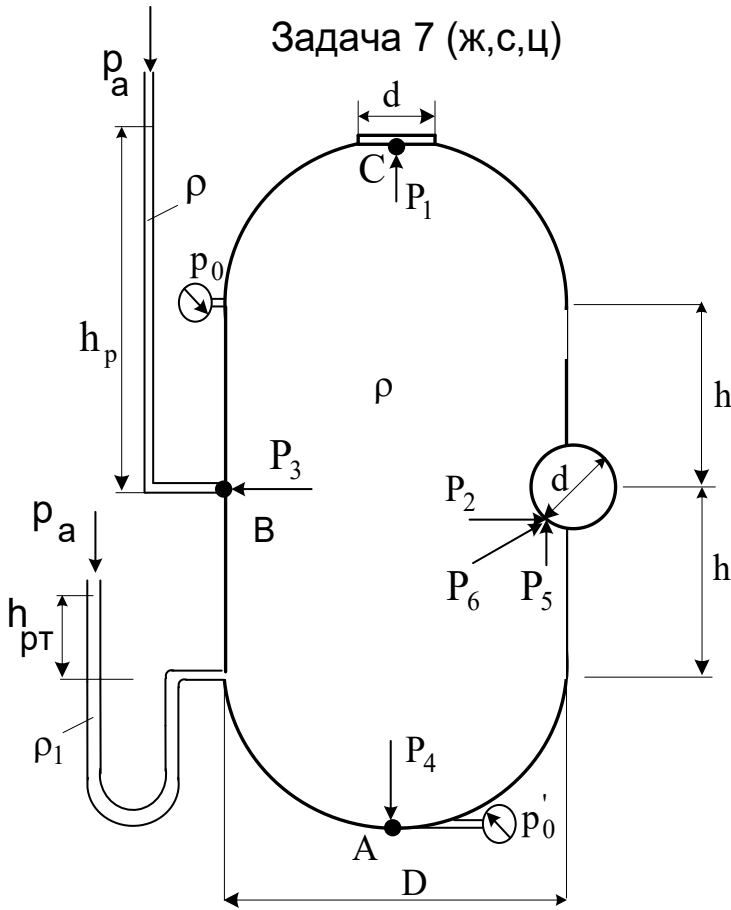
4. Железняков Г.В. Гидрология и гидрометрия. – М.: Высшая школа, 1981.
5. Чугаев Р.Р. Гидравлика. – Л.: Энергоиздат, 1982. – 672 с.
6. Большаков В.А. Сборник задач по гидравлике. – К.: Вища школа, 1979. – 336 с.
7. Большаков В.А. Справочник по гидравлике. – К.: Вища школа, 1985. – 343 с.
8. Яхно О.М., Желяк В.І. Гідравліка неньютонівських рідин. – К.: Вища школа, 1995.

ДОДАТОК А
Вихідні дані для розрахунків РГР № 1

За наведеними нижче схемами та вихідними даними виконати домашнє завдання № 1.

Задача 1 (а, н, я)





ДОДАТОК Б

Значення коефіцієнтів місцевого опору

Таблиця Б.1 – Миттєве розширення

$$\zeta_{м.р.} = k \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1 \right)$$

$\frac{\omega_1}{\omega_2}$	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1
$\zeta_{м.р.}$	81	64	49	36	25	16	9	4	1	0

Таблиця Б.2 – Миттєве звуження

$$\zeta_{м.з.} = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)$$

$\frac{\omega_2}{\omega_1}$	0,00	0,10	0,20	0,40	0,60	0,80	1,00
$\zeta_{м.з.}$	0,50	0,45	0,40	0,30	0,20	0,10	0,00

Вхід у трубу

1 Циліндрична труба відходить під кутом α (рисунок Б.1, а)

$$\zeta_{вх.} = 0,505 + 0,803 \cdot \sin \alpha + 0,226 \cdot \sin^2 \alpha$$

2 Труба відходить перпендикулярно (рисунок Б.1, б). При гострих вхідних кромках $\zeta_{вх.} = 0,50$, при закруглених кромках або плавному вході $\zeta_{вх.} = 0,20 \div 0,25$, при дуже плавному обертанні входу $\zeta_{вх.} = 0,05$.

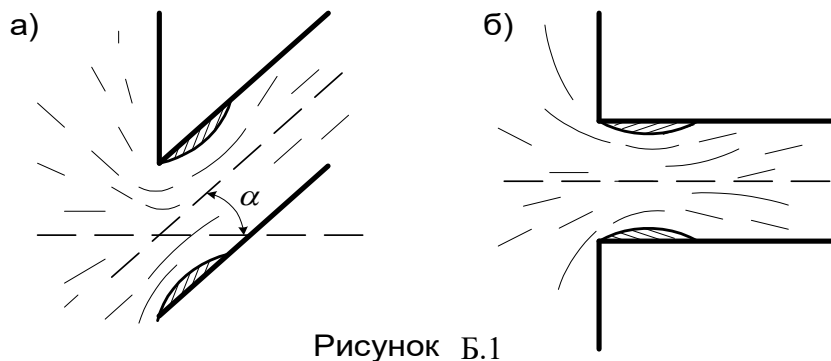


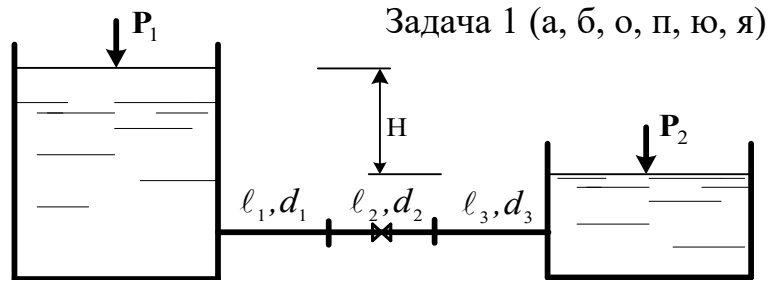
Рисунок Б.1

Вихід з труби в резервуар великих розмірів

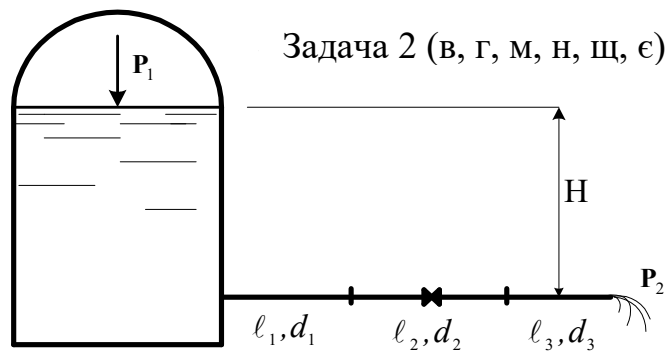
Розглядаючи явище як миттєве розширення потоку при ω_1 , значно більшим за ω_2 , приймаючи $k=1$, маємо $\zeta_{вих.} = 1$.

ДОДАТОК В

Вихідні дані для розрахунків коротких трубопроводів

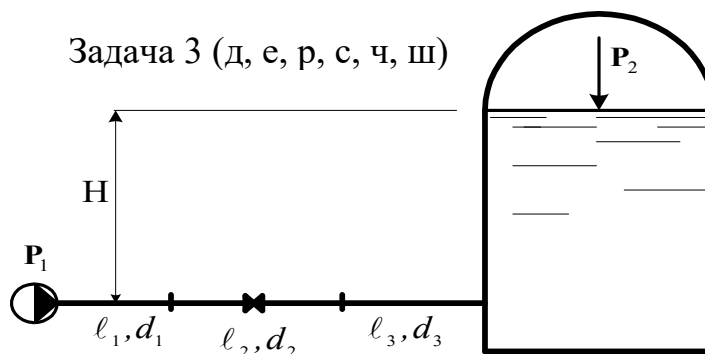


п/ п	Величина	Позна- чення	Роз- мірн.	Остання цифра шифру									
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Вихідні дані			Задача 1									
1	Витрата	Q	л/с	-	10	-	32	-	8	40	-	20	-
2	Напір	H	м	8	-	10	4	12	-	4	20	-	18
3	Надли- шковий тиск	p ₁	МПа	0	0,05	0,1	-	0,05	0	-	0	0,10	0
4		p ₂	МПа	0	0	0,05	0,05	0	0	0	0,10	0	0,05
5	Довжина	ℓ ₁	м	20	20	10	25	10	20	40	30	20	30
6		ℓ ₂	м	30	10	20	20	10	10	30	40	30	30
7		ℓ ₃	м	20	20	10	20	20	10	20	20	20	20
8	Діаметр	d ₁	мм	100	100	75	100	50	50	100	75	150	100
9		d ₂	мм	150	125	100	75	100	75	75	100	200	150
10		d ₃	мм	100	100	75	100	50	50	100	75	150	100
11	Коефіцієнт тертя	λ	-	0,022	-	0,025	-	0,023	-	-	0,020	-	0,019
12	Коефіцієнт місцевий	ζ	-	10	8	10	12	8	6	10	8	6	8
	Визначити												
1	Витрату	Q	л/с	Q	-	Q	-	Q	-	-	Q	-	Q
2	Напір	H	м	-	H	-	-	-	H	-	-	H	-
3	Надли- шковий тиск	p ₁	МПа	-	-	-	p ₁	-	-	p ₁	-	-	-
4		p ₂	МПа	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Побудувати лінії повного та п'єзометричного напорів												



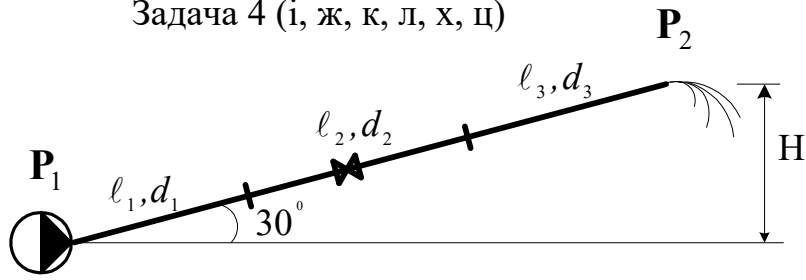
№ п/п	Позначення	Розмірн.	Остання цифра шифру									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Задача 2												
1	Q	л/с	10	-	12	20	-	14	3	-	16	40
2	H	м	-	10	-	4	16	-	6	20	-	10
3	p ₁	МПа	0	0	0,05	-	0,02	0,01	-	0	0,03	-
4	p ₂	МПа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	ℓ ₁	м	30	20	20	30	20	20	40	30	20	20
6	ℓ ₂	м	30	30	20	40	40	20	40	40	50	20
7	ℓ ₃	м	30	20	40	20	20	30	20	30	20	40
8	d ₁	мм	50	40	75	100	75	50	100	75	100	100
9	d ₂	мм	75	50	100	75	50	40	125	100	75	75
10	d ₃	мм	50	40	75	100	75	50	100	75	100	100
11	λ	-	-	0,020	0,025	-	0,023	-	-	0,020	-	0,019
12	ζ	-	6	8	6	8	6	10	8	12	10	6
1	Q	л/с	-	Q	-	-	Q	-	-	Q	-	-
2	H	м	H	-	H	-	-	H	-	-	H	-
3	p ₁	МПа	-	-	-	p ₁	-	-	p ₁	-	-	p ₁
4	p ₂	МПа	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Побудувати лінії повного та п'єзометричного напорів											

Задача 3 (д, е, р, с, ч, ш)



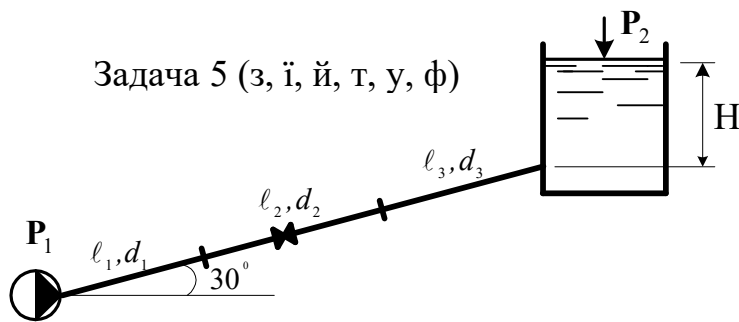
п/п	Позначення	Розмірн.	Остання цифра шифру									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Задача 3												
1	Q	л/с	10	-	20	15	-	30	20	-	25	20
2	H	м	10	8	-	4	6	10	8	4	-	10
3	p ₁	МПа	0	0,30	0,40	-	0,50	-	-	0,20	0,15	-
4	p ₂	МПа	0,02	0	0,01	0,05	0,10	0	0,10	0,05	0,05	0,04
5	ℓ ₁	м	20	30	30	20	30	40	50	30	20	30
6	ℓ ₂	м	40	20	20	30	30	40	40	40	30	30
7	ℓ ₃	м	30	30	40	50	40	30	30	50	60	30
8	d ₁	мм	100	50	100	75	100	150	100	75	100	100
9	d ₂	мм	50	75	75	100	125	100	150	100	125	75
10	d ₃	мм	100	50	100	75	100	150	100	75	100	100
11	λ	-	-	0,020	-	-	0,022	-	-	0,023	-	-
12	ζ	-	10	8	10	12	10	8	6	6	8	10
1	Q	л/с	-	Q	-	-	Q	-	-	Q	-	-
2	H	м	-	-	H	-	-	-	-	-	H	-
3	p ₁	МПа	p ₁	-	-	p ₁	-	p ₁	p ₁	-	-	p ₁
4	p ₂	МПа	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Побудувати лінії повного та п'єзометричного напорів											

Задача 4 (і, ж, к, л, х, ц)



п/п	Позначення	Розмірн.	Остання цифра шифру									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Задача 4												
1	Q	л/с	6	-	8	-	10	-	12	-	14	-
2	H	м	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	p ₁	МПа	-	0,8	-	0,6	-	0,7	-	0,9	-	0,5
4	p ₂	МПа	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	ℓ ₁	м	20	20	30	10	10	20	20	10	30	10
6	ℓ ₂	м	20	10	10	30	20	30	30	20	10	10
7	ℓ ₃	м	20	30	20	20	30	10	20	20	10	30
8	d ₁	мм	50	50	75	100	50	75	50	50	75	50
9	d ₂	мм	40	75	50	50	75	100	75	100	100	75
10	d ₃	мм	50	50	75	100	100	50	100	50	75	50
11	λ	-	-	0,020	-	0,022	-	0,023	-	0,024	-	0,025
12	ζ	-	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	Q	л/с	-	Q	-	Q	-	Q	-	Q	-	Q
2	H	м	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3	p ₁	МПа	p ₁	-	p ₁	-	p ₁	-	p ₁	-	p ₁	-
4	p ₂	МПа	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Побудувати лінії повного та п'єзометричного напорів											

Задача 5 (з, і, й, т, у, ф)



п/п	Позначення	Розмірність	Остання цифра шифру									
			0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Задача 5												
1	Q	л/с	-	20	10	12	-	15	14	-	16	18
2	H	м	4	2	-	5	8	3	-	6	0	2
3	p ₁	МПа	0,8	-	0,9	-	0,7	-	1,1	1,0	-	-
4	p ₂	МПа	0	0	0	0	0	0,05	0,04	0	0,06	0
5	ℓ ₁	м	20	10	10	30	20	40	30	30	10	20
6	ℓ ₂	м	10	10	20	10	20	10	20	30	30	30
7	ℓ ₃	м	40	30	20	20	20	10	10	10	30	10
8	d ₁	мм	75	100	50	50	75	100	100	75	75	125
9	d ₂	мм	100	75	40	75	100	125	75	50	125	100
10	d ₃	мм	75	100	50	100	50	75	125	125	75	75
11	λ	-	0,020	-	-	-	0,022	-	-	0,023	-	-
12	ζ	-	4	5	6	4	6	8	6	4	9	8
1	Q	л/с	Q	-	-	-	Q	-	-	Q	-	-
2	H	м	-	-	H	-	-	-	H	-	-	-
3	p ₁	МПа	-	p ₁	-	p ₁	-	p ₁	-	p ₁	-	p ₁
4	p ₂	МПа	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
5	Побудувати лінії повного та п'єзометричного напорів											

ДОДАТОК Г

Значення величин **C**, **λ**, **a**, **K** і **b** для круглих труб,
розрахованих за повною формулою М.М. Павловського
при **n = 0,012**
(для розмірів у метрах та секундах)

d , м	C	λ	a	K , м ³ /с	$b = \frac{a}{d^5} = \frac{h_i}{l \cdot Q^2}$
0,050	44,79	0,0391	0,00323	0,00987	10340,0
0,075	47,45	0,0349	0,00288	0,0287	1214,0
0,100	49,46	0,0321	0,00265	0,0614	265,0
0,125	51,07	0,0301	0,00249	0,111	81,60
0,150	52,42	0,0286	0,00236	0,179	31,18
0,200	54,62	0,0263	0,00217	0,384	6,78
0,250	56,40	0,0247	0,00204	0,692	2,11
0,300	57,90	0,0234	0,00193	1,121	0,794
0,350	59,18	0,0224	0,00185	1,684	0,354
0,400	60,31	0,0216	0,00178	2,397	0,174
0,450	61,35	0,0209	0,00172	4,259	0,0932
0,500	62,28	0,0202	0,00167	4,324	0,0532
0,600	63,91	0,0192	0,00159	6,999	0,0204
0,700	65,32	0,0184	0,00152	10,517	0,00904
0,800	66,58	0,0177	0,00146	14,965	0,00495
0,900	67,70	0,0171	0,00141	20,430	0,00239
1,000	68,72	0,0166	0,00137	26,485	0,00137

Таблиця А.1 – Вихідні дані

п/п	Найменування величин	Позначення	Одиниця вимірювання	Остання цифра шифру									
				0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
				5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Вихідні дані		Задача № 1										
1	Показання манометра	p_0	МПа	0,2	-	-	-	0,1	-	-	-	0,15	-
2		p_0'	МПа	-	0,3	-	-	-	-	0,4	-	-	0,2
3	Показання п'езометра	h_p	м	-	-	10	-	-	15	-	-	-	-
4	Показання ртутного манометра	$h_{рт}$	м	-	-	-	1,0	-	-	-	1,2	-	-
5	Діаметр	D	м	5	6	4	7	5	5	4	6	7	8
6		d	м	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
7	Висота	h	м	5	6	5	6	6	7	8	5	7	6
8	Густина	ρ	кГ/м ³	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9		ρ_1	кГ/м ³	-	1360	-	1360	-	-	1360	-	-	-
	Визначити:												
1	Надлишковий тиск у точці	$P_{надл}$	МПа	A	C	A	B	B	A	B	A	B	C
2	Абсолютний тиск у точці	$P_{абс}$	МПа	A	C	A	B	B	A	B	A	B	C
3	Показання манометра	p_0	МПа	-	-	p_0	-	-	p_0	-	p_0	-	-
4		p_0'	МПа	-	-	-	p_0'	-	-	-	-	p_0'	-
5	Показання п'езометра	h_p	м	h_p	-	-	-	h_p	-	-	-	-	h_p
6	Показання ртутного манометра	$h_{рт}$	м	-	$h_{рт}$	-	-	-	-	$h_{рт}$	-	-	-
7	Сили гідростатичного тиску	P_1	МН	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
		P_2	МН	P_2	-	-	P_2	-	-	P_2	-	P_2	-
		P_3	МН	-	P_3	P_3	-	-	-	-	P_3	-	-

		P ₄	МН	P ₄	-	P ₄	-	-	-	P ₄	-	P ₄	-
		P ₅	МН	-	P ₅	-	P ₅	-	-	-	P ₅	-	-
		P ₆	МН	-	-	-	-	P ₆	P ₆	-	-	-	P ₆

Продовження таблиці А.1

1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Задача № 2										Задача № 3									
1	0,3	-	-	-	0,4	-	-	-	-	-	0,1	-	-	-	0,12	-	-	-	-	0,15
2	-	0,1	-	-	-	0,2	-	-	0,15	-	-	0,2	-	-	-	0,15	-	-	-	-
3	-	-	20	-	-	-	25	-	-	-	-	-	20	-	-	-	25	-	30	-
4	-	-	-	1,0	-	-	-	0,6	-	0,8	-	-	-	1,0	-	-	-	0,8	-	-
5	8	6	5	7	4	8	6	5	4	7	3	4	5	6	7	8	4	5	6	7
6	1	2	1	1,2	1,4	1,6	1,8	1,5	1,7	1,3	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	2,0	1,0	1,6	1,8	1,0
7	5	6	4	7	5	6	4	5	7	6	5	6	7	8	4	5	6	7	8	5
8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	-	-	-	13600	-	-	-	13600	-	13600	-	-	13600	13600	-	-	13600	13600	-	-
1	В	А	С	А	В	А	С	В	А	В	А	С	В	В	А	С	В	А	С	В
2	В	А	С	А	В	А	С	В	А	В	А	С	В	В	А	С	В	А	С	В
3	-	-	-	p ₀	-	p ₀	-	-	p ₀	-	-	p ₀	-	-	-	p ₀	-	p ₀	-	-
4	p ₀ '	-	-	-	p ₀ '	-	-	-	-	-	-	-	-	p ₀ '	-	-	-	-	p ₀ '	-
5	-	h _p	-	-	-	-	-	h _p	-	h _p	h _p	-	-	-	h _p	-	-	-	-	h _p
6	-	-	h _{пр}	-	-	-	h _{пр}	-	-	-	-	-	h _{пр}	-	-	-	h _{пр}	-	-	-
7	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁
8	P ₂	-	P ₂	-	-	P ₂	-	-	P ₂	-	P ₂	-	-	P ₂	-	-	P ₂	-	-	P ₂
9	-	P ₃	-	-	P ₃	-	P ₃	-	-	-	-	P ₃	-	-	P ₃	-	-	P ₃	-	-
10	P ₄	-	P ₄	-	-	P ₄	-	-	P ₄	-	-	P ₄	-	-	P ₄	-	-	-	-	P ₄
11	-	P ₅	-	-	P ₅	-	P ₅	-	-	-	-	-	-	P ₅	-	-	P ₅	P ₅	-	P ₅
12	-	-	-	P ₆	-	-	-	P ₆	-	P ₆	-	-	P ₆	-	-	P ₆	-	-	P ₆	-

Продовження таблиці А.1

1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Задача № 4										Задача № 5									
1	0,4	-	-	-	0,3	-	-	-	-	0,35	0,1	-	-	-	0,15	-	-	-	0,20	-
2	-	0,1	-	-	-	0,12	-	-	-	-	-	0,3	-	-	-	0,25	-	-	-	0,20
3	-	-	15	-	-	-	20	-	25	-	-	-	15	-	-	-	20	-	-	-
4	-	-	-	0,6	-	-	-	0,8	-	-	-	-	-	0,8	-	-	-	1,0	-	-
5	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10	8	6	9	8	7	6	5	6	8
6	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	2,0	1,0	1,2	1,4	1,6	1,8	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2
7	4										5	4	3	4,5	4	3,5	3	2,5	3	4
8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	-	-	13600	13600	-	-	-	13600	13600	-	-	13600	-	13600	-	13600	-	13600	-	-
1	C	B	A	A	B	A	C	A	C	B	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
2	C	B	A	A	B	A	C	A	C	B	A	B	C	A	B	C	A	B	A	B
3	-	p_0	-	p_0	-	-	p_0	-	-	-	-	-	-	-	-	-	p_0	-	-	p_0
4	p_0'	-	-	-	-	-	-	-	-	p_0'	-	-	p_0'	-	p_0'	-	-	p_0'	-	-
5	-	-	-	-	h_p	h_p	-	h_p	-	-	h_p	-	-	h_p	-	-	-	-	h_p	-
6	-	-	h_{pr}	-	-	-	-	-	h_{pr}	-	-	h_{pr}	-	-	-	-	h_{pr}	-	-	-
7	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1	P_1
8	P_2	-	-	P_2	-	-	-	P_2	-	-	P_2	-	P_2	-	-	-	P_2	-	-	-
9	-	-	P_3	-	P_3	-	-	-	P_3	-	-	P_3	-	-	P_3	-	-	P_3	-	-
10	P_4	-	-	P_4	-	-	-	P_4	-	-	P_4	-	P_4	-	P_4	-	-	P_4	-	-
11	-	-	P_5	-	P_5	-	-	-	P_5	-	-	P_5	-	-	P_5	-	-	P_5	-	-
12	-	P_6	-	-	-	P_6	P_6	-	-	P_6	-	-	-	P_6	-	P_6	-	-	P_6	-

Продовження таблиці А.1

1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Задача № 6										Задача № 7									
1	-	0,2	-	-	0,15	-	-	-	0,10	-	0,1	-	-	-	0,15	-	-	-	0,20	-
2	0,4	-	-	-	-	0,3	-	-	-	0,35	-	0,3	-	-	-	0,25	-	-	-	-
3	-	-	10	-	-	-	20	-	-	-	-	-	15	-	-	-	20	-	-	25
4	-	-	-	1,0	-	-	-	0,8	-	-	-	-	-	1,4	-	-	-	1,8	-	-
5	4	5	6	7	4	3	5	6	4	3	6	7	8	5	6	7	10	9	8	6
6	1,0	0,9	0,8	0,7	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,0	1,0	0,8	1,0	0,8	0,8	1,0	1,0	0,8	1,0	0,8
7	5	4	6	5	7	4	5	6	5	5	4	5	6	4	5	5	4	5	5	6
8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	13600	-	-	13600	-	13600	-	13600	-	-	13600	-	-	13600	13600	-	-	13600	-	13600
	Задача № 6										Задача № 7									
1	B	A	C	A	B	C	A	B	C	C	A	B	C	C	B	A	C	B	A	C
2	B	A	C	A	B	C	A	B	C	C	A	B	C	C	B	A	C	B	A	C
3	-	-	p ₀₋	-	-	-	p ₀	-	-	p ₀₋	-	p ₀₋	-	-	-	p ₀₋	-	-	-	-
4	-	p _{0'}	-	-	p _{0'}	-	-	p _{0'}	-	-	-	-	p _{0'}	-	-	-	p _{0'}	-	-	-
5	-	-	-	h _p	-	-	-	-	h _p	-	-	-	-	h _p	-	-	-	h _p	h _p	-
6	h _{пр}	-	-	-	-	h _{пр}	-	-	-	-	h _{пр}	-	-	-	h _{пр}	-	-	-	-	h _{пр}
7	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁
8	P ₂	-	-	-	P ₂	-	-	-	-	P ₂	P ₂	-	P ₂	-	P ₂	-	-	P ₂	-	-
9	-	P ₃	-	P ₃	-	P ₃	-	P ₃	-	-	-	P ₃	-	-	-	P ₃	-	-	-	P ₃
10	P ₄	-	-	P ₄	-	P ₄	-	-	-	P ₄	-	P ₄	-	-	P ₄	-	-	P ₄	-	-
11	-	P ₅	-	-	P ₅	-	-	P ₅	-	-	P ₅	-	P ₅	-	-	P ₅	-	-	-	P ₅
12	-	-	P ₆	-	-	-	P ₆	-	P ₆	-	-	-	-	P ₆	-	-	P ₆	-	P ₆	-

Продовження таблиці А.1

1	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
	Задача № 8										Задача № 9									
1	0,2	-	-	-	0,15	-	-	-	0,10	-	-	0,10	-	-	-	0,15	-	-	-	0,20
2	-	0,25	-	-	-	0,20	-	-	-	-	-	-	0,20	-	-	-	0,25	-	-	-
3	-	-	20	-	-	-	30	-	-	25	10	-	-	-	15	-	-	-	20	-
4	-	-	-	1,0	-	-	-	1,2	-	-	-	-	-	1,6	-	-	-	1,4	-	-
5	8	9	10	8	12	11	14	13	10	8	10	8	9	6	8	10	8	10	8	10
6	1,0	1,1	1,2	0,8	1,0	0,8	1,0	0,8	1,4	1,2	2	1	1,5	1	1,2	1,4	1,0	1,2	1,3	1
7	2	1	3	2	3	2	3	1	4	2	5	4	6	5	6	7	6	5	5	4
8	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000
9	-	13600	-	13600	13600	-	-	13600	13600	-	13600	-	-	13600	13600	-	-	13600	-	13600
1	A	B	C	A	B	C	B	A	B	C	A	B	C	C	A	B	A	C	A	B
2	A	B	C	A	B	C	B	A	B	C	A	B	C	C	A	B	A	C	A	B
3	-	-	-	-	-	-	p ₀	-	-	p ₀	-	-	-	p ₀	-	-	-	p ₀	-	-
4	-	-	-	p ₀ '	-	-	-	p ₀ '	-	-	-	p ₀ '	-	-	-	-	-	-	p ₀ '	-
5	h _p	-	-	-	-	h _p	-	-	h _p	-	-	-	h _p	-	-	h _p	h _p	-	-	-
6	-	h _{пр}	-	-	h _{пр}	-	-	-	-	-	h _{пр}	-	-	-	h _{пр}	-	-	-	-	h _{пр}
7	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁	P ₁
8	P ₂	-	-	-	P ₂	-	-	-	P ₂	-	P ₂	-	-	P ₂	-	-	P ₂	-	-	-
9	-	P ₃	-	P ₃	-	-	P ₃	-	-	-	-	-	P ₃	-	-	P ₃	-	-	P ₃	-
10	P ₄	-	-	P ₄	-	-	-	-	P ₄	-	P ₄	-	-	P ₄	-	P ₄	-	-	-	-
11	-	P ₅	-	-	P ₅	-	P ₅	-	-	-	-	-	P ₅	-	-	-	P ₅	-	P ₅	-
12	-	-	P ₆	-	-	P ₆	-	P ₆	-	P ₆	-	P ₆	-	-	P ₆	-	-	P ₆	-	P ₆

