



Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

**Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій**

**Кафедра електропостачання та
енергетичного менеджменту**

О. М. Мороз, А. І. Серeda

ГІДРАВЛІКА ТА ГЕМОДИНАМІКА

Курс лекцій

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої
освіти денної та заочної форм навчання
спеціальності
163 Біомедична інженерія**

**Харків
2023**

Міністерство освіти і науки України

ДЕРЖАВНИЙ БІОТЕХНОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет енергетики, робототехніки та
комп'ютерних технологій

Кафедра електропостачання та енергетичного менеджменту

О. М. Мороз, А. І. Серeda

ГІДРАВЛІКА ТА ГЕМОДИНАМІКА

Курс лекцій

**для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої
освіти денної та заочної форм навчання
спеціальності
163 Біомедична інженерія**

Затверджено
рішенням науково-методичної ради
факультету енергетики,
робототехніки та
комп'ютерних технологій
Протокол № 3
від 22 лютого 2023 року

**Харків
2023**

УДК 621.221(072)

М-80

Схвалено на засіданні кафедри
електропостачання та енергетичного менеджменту
Протокол №7 від 8.02.2023 р.

Рецензенти:

Н. Г. Косуліна, д-р техн. наук, проф. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

Ю. М. Хандола, канд. техн. наук, зав. кафедри електромеханіки, робототехніки, біомедичної інженерії та електротехніки ДБТУ.

М-80 Гідравліка та гемодинаміка: курс лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти денної та заочної форм навчання за спеціальністю 163 «Біомедична інженерія» / О. М. Мороз, А. І. Середа / - Електрон. дані. – Х.: ДБТУ, 2023. – 96 с.

Курс лекцій з дисципліни «Гідравліка та гемодинаміка» складений відповідно до програми навчальної дисципліни. У курсі лекцій вивчаються основні фізичні властивості рідин та газів, закони гідростатики та гідродинаміки, основи гемодинаміки та біореології, конструкції та принципи роботи насосів та компресорів для медичної практики. Кожна лекція містить питання для самоконтролю.

Видання призначено для здобувачів технічних спеціальностей закладів вищої освіти.

УДК 621.221(072)

Відповідальний за випуск: О. О. Мірошник, д-р техн. наук, професор

© Мороз О.М.,
Середа А.І., 2023.
© ДБТУ, 2023

Рекомендована література

1. Гідравліка: Навчально-методичний комплекс. Навчально-методичний посібник. / В.І.Дуганець, І.М.Бендера, В.А. Дідур та ін. За ред. В.І. Дуганця, І.М.Бендери, В.А. Дідура. – Кам'янець-Подільський: ФОП Сисин О.В. 2013. – 566 с. URL: <https://cutt.us/tT4oV>.
2. Левицький Б. Ф. Гідравліка / Левицький Б. Ф., Лещій Н. П. – Львів: Світ, 1994. – 264 с.
3. П. Кросер, Ф. Эбель. Пневматика. Учебное пособие. Перевод с немецкого: Гнатюк Ю.Й., Четверкин А.А. – К., ДП «Фесто», 2002 – 228 с.
4. Палишкин Н. А. Гидравлика и сельскохозяйственное водоснабжение / Палишкин Н. А. – М.: Агропромиздат, 1990. – 351 с.
5. Рогалевич Ю. П. Гідравліка / Рогалевич Ю. П. – К.: Вища школа, 1993. – 255 с.
6. Корнющенко Г.С. Медична та біологічна фізика: практикум : навчальний посібник: у 2 ч. / Г. С. Корнющенко, У. С. Швець, Л. Ф. Суходуб. – Суми: Сумський державний університет, 2017. – Ч. 1. – 186 с.
7. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика: [учеб. для вузов] / А. Д. Альтшуль, Л. С. Животовский, Л. П. Иванов. – М.: Стройиздат, 1987. – 414 с.
8. Ємчик Л. Ф., Кміт Я. М. Медична біофізика. Інтегрований курс лекцій. Навч. посібник (За ред. проф. Гончаренка С. У.) – Львів: Місіонер, 1998. – 216 с

Лекція 1

Вступ

Гідравліка – технічна наука, яка вивчає закони рівноваги і руху рідин та способи використання цих законів для вирішення інженерних задач. Слово гідравліка походить від двох грецьких слів “*хюдор*” – вода та “*аулос*” – труба, що означало спочатку вчення про рух води в трубах. В теперішній час гідравліка вивчає рух усіх рідин, а не тільки води.

Гідравліка – одна з найдавніших наук. У стародавньому Єгипті, Індії та Китаї будувались зрошувальні та водопостачальні системи, греблі, застосовувались пристрої в яких використовувалась енергія води (млини). Так, наприклад, в Римі за шість віків до нашої ери побудували водопровід, залишки якого збереглися до наших часів.

На території Київської Русі велось будівництво різних споруд на ріках, створювались механізми, які використовували енергію водяного потоку. У X-XI віках будувались трубопроводи з гончарних та дерев'яних труб для водопостачання міст, у 1115 р. було побудовано наплавний міст через Дніпро біля Києва.

Першою науковою працею з гідравліки є трактат Архімеда “Про плаваючі тіла” (250 р. до н.е.). Розвиток гідравліки, як науки, розпочався в XV-XVIII сторіччях. Значний внесок в розвиток гідравліки зробили роботи таких вчених: Леонардо да Вінчі (1452-1519) “Про рух та вимірювання води”, Сімона Стевіна “Начала гідростатики” (1585 р.), Галілео Галілея “Про тіла, що знаходяться в воді, і про ті, що рухаються” (1612 р.). Е. Торрічеллі відкрив закон витікання рідини через отвори (1643 р.), Блез Паскаль відкрив закон про передачу тиску в рідині (1650 р.), Ісак Ньютон сформулював гіпотезу про внутрішнє тертя в рідині (1686 р.).

Розвиток гідравліки на міцній теоретичній основі став можливим завдяки роботам М.В. Ломоносова, Д. Бернуллі, Л. Ейлера. М.В. Ломоносов сформулював відкритий ним закон збереження речовини та енергії (1760 р.), Д. Бернуллі вивів рівняння (1738 р.), що є основою гідравлічних розрахунків руху ріди-

ни, Л. Ейлер отримав систему диференціальних рівнянь рівноваги та руху рідини (1755 р.) та запропонував поняття ідеальної (нев'язкої) рідини, що дозволило отримати багато математичних рішень в гідромеханіці.

Значний внесок у розвиток експериментальної гідравліки зробили інженери А. Шезі та А. Дарсі в питаннях вивчення опорів, при русі рідини в каналах та трубах. Поглибленим вивченням фізичних властивостей рідин займалися вчені Ж. Пуазейль, Д.І. Менделєєв, О. Рейнольдс. Російський вчений Н.П. Петров (1836-1920 рр.) теоретично обґрунтував гіпотезу Ньютона про внутрішнє тертя в рідині і розробив гідродинамічну теорію мащення. М.Є. Жуковський (1847-1921 рр.) створив теорію гідравлічного удару в водопровідних трубах. Значний внесок у розвиток гідравліки в ХХ сторіччі зробили такі вчені: Й.І. Агроскін, Л.С. Лейбензон, М.М. Павловський, А.О. Угінчус, С.О. Христіанович, Р.Р. Чугаєв, Д.В. Штеренліхт, А.Д. Альтшуль та багато інших.

Фізичні характеристики рідин та газів

Рідиною називають фізичне тіло яке має властивість текучості, завдяки чому рідина не має власної форми, а приймає форму посудини, яку вона заповнює. Рідини займають проміжне положення між твердими тілами та газами. Рідини характеризуються великою рухливістю своїх частинок внаслідок незначних сил міжмолекулярного зчеплення, великим опором стисненню і незначним опором на розрив. Основними фізичними характеристиками краплинних рідин є густина, питома вага, стисливість, об'ємне розширення і в'язкість.

Густина речовини – відношення маси m речовини до її об'єму W

$$\rho = m / W, \text{ кг} / \text{ м}^3 \quad (1.1)$$

Різні речовини характеризуються різними значеннями густин, так наприклад:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{прісної води при } t=4^{\circ}\text{C}} &= 1000 \text{ кг} / \text{ м}^3, \\ \rho_{\text{морської води}} &= 1020 \dots 1030 \text{ кг} / \text{ м}^3, \end{aligned}$$

$$\rho_{\text{спирту}} = 800 \text{ кг} / \text{м}^3 ,$$

$$\rho_{\text{крові}} = 1,045 \dots 1,055 \text{ г} / \text{мл} ,$$

$$\rho_{\text{сухого повітря при температурі } 0^{\circ}\text{C і тиску } 100 \text{ кПа}} = 1,2754 \text{ кг} / \text{м}^3 ,$$

$$\rho_{\text{ртуті}} = 13600 \text{ кг} / \text{м}^3 ,$$

$$\rho_{\text{золота}} = 19200 \text{ кг} / \text{м}^3 .$$

Питома вага – відношення ваги рідини G до її об'єму W

$$\gamma = G / W , H / \text{м}^3 . \quad (1.2)$$

Питома вага та густина зв'язані між собою наступною залежністю

$$\gamma = \rho g , \quad (1.3)$$

де $g = 9,81 \text{ м/с}^2$ – прискорення вільного падіння.

Стисливість – це здатність рідини змінювати свій об'єм при зміні тиску. *Стисливість рідини* характеризується коефіцієнтом об'ємного стиснення

$$\beta_c = -\frac{1}{W} \frac{dW}{dp} , \text{ м}^2 / \text{Н} . \quad (1.4)$$

Знак “–” показує, що при збільшенні тиску p об'єм рідини W зменшується.

Величина обернена коефіцієнту об'ємного стиснення називається *модулем об'ємної пружності рідини* – $E_p = 1 / \beta_c$.

Рідини характеризуються незначною стисливістю (так, наприклад, при збільшенні тиску на 10 атмосфер об'єм води зменшується на $1/20000$). Але стисливість води відіграє значну роль в житті Землі, якщо вода була б нестислива, то рівень світового океану був би вищим на 30 м.

Температурне розширення – властивість рідини змінювати свій об'єм при зміні температури. *Об'ємне температурне розширення* рідини характеризується коефіцієнтом температурного об'ємного розширення

$$\beta_t = \frac{1}{W} \frac{dW}{dt} , ^{\circ}\text{C}^{-1} . \quad (1.5)$$

Коефіцієнти температурного об'ємного розширення рідин різні: $\beta_{\text{води}} = 0,00015 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\beta_{\text{спирту}} = 0,0011 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$, $\beta_{\text{повітря}} = 0,003665 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

При русі рідин окремі її шари взаємодіють між собою із силами, які направлені по дотичній до шарів. Це явище називається *в'язкістю* – здатність рідини чинити опір відносному зсуву своїх частинок під дією зовнішніх сил.

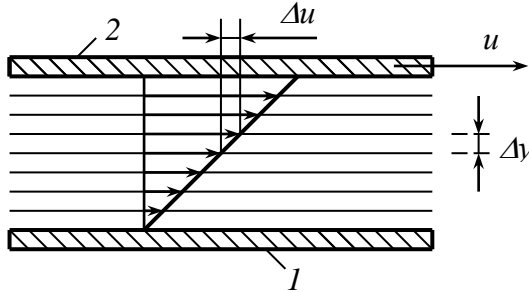


Рисунок 1.1 – Еюра швидкостей в рідині між нерухоною (1) та рухоною (2) пластинами

Сила внутрішнього тертя в рідині визначається за формулою Петрова

$$T = \pm \eta S \frac{\Delta u}{\Delta y}, \quad (1.6)$$

де η – динамічна в'язкість рідини, Па·с;

S – площа поверхні контактуючих шарів рідини;

$\frac{\Delta u}{\Delta y}$ – градієнт швидкості по нормалі до напрямку руху;

Δu – швидкість зсуву одного шару рідини відносно іншого (рис.1.1);

Δy – відстань між осями суміжних шарів рідини.

Напруження тертя, що виникає під час руху рідини, визначається за формулою

$$\tau = T / S = \pm \eta \frac{\Delta u}{\Delta y}. \quad (1.7)$$

Десята частина одиниці динамічної в'язкості η називається *пуазом* ($1\text{Пз} = 0,1\text{ Па}\cdot\text{с}$), в честь професора Ж. Пуазейля, який вивчав в'язкість рідин. Динамічна в'язкість η для більшості рі-

дин не залежить від градієнта швидкості і практично не залежить від тиску, але значно залежить від температури рідини.

Значення динамічної в'язкості деяких рідин приведено в таблиці 1.

Таблиця 1.1 – Динамічна в'язкість η деяких рідин

Рідина	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$	Рідина	$t, ^\circ\text{C}$	$\eta, \text{Па}\cdot\text{с}$
Вода	25	$8,94\cdot 10^{-4}$	Касторове	25	0,985
Кров	37	$3\text{-}4\cdot 10^{-4}$	масло		
Етиловий	25	$1,074\cdot 10^{-3}$	Оливкова	25	0,081
спирт			олія		
Ртуть	25	$1,526\cdot 10^{-3}$	Гліцерин	20	1,49

В'язкість повітря при температурі 0°C і тиску 100 кПа складає $17,4 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$, а при температурі 27°C – $18,6 \text{ мкПа}\cdot\text{с}$. Таким чином в'язкість повітря при збільшенні температури збільшується.

Відношення динамічної в'язкості до густини рідини називається кінематичною в'язкістю

$$\nu = \eta / \rho, \text{ м}^2 / \text{с}. \quad (1.8)$$

За одиницю кінематичної в'язкості приймають $\text{м}^2/\text{с}$ або стокс ($1\text{Ст} = 1\text{см}^2/\text{с}$), $1\text{м}^2/\text{с} = 10^4\text{Ст}$. В'язкість рідин вимірюється за допомогою віскозиметрів. Принцип дії віскозиметра базується на вимірюванні часу витікання 200 мл досліджуваної рідини, температура якої 20°C , через калібрований отвір. Частка від ділення часу витікання досліджуваної рідини на час витікання такої ж кількості дистильованої води температурою 20°C характеризує її в'язкість у градусах Енглера:

$$^\circ E = T_p / T_v. \quad (1.9)$$

Перерахунок в'язкості в градусах Енглера в кінематичну в'язкість, $\text{м}^2/\text{с}$, здійснюється за формулою

$$\nu = (0,0731 ^\circ E - 0,0631 / ^\circ E) \cdot 10^{-4}. \quad (1.10)$$

В'язкість краплинних рідин залежить від температури і зменшується при її збільшенні. В'язкість газів, навпаки, зі збільшенням температури збільшується. Це пояснюється різною природою в'язкості в рідинах та газах. В рідинах молекули розміщуються значно ближче ніж в газах і в'язкість обумовлюється силами міжмолекулярного зчеплення. Ці сили при збільшенні температури зменшуються і відповідно зменшується в'язкість. В газах в'язкість обумовлена головним чином хаотичним тепловим рухом молекул, інтенсивність якого збільшується зі збільшенням температури, що призводить до збільшення в'язкості.

Кавітація та кесонна хвороба

Зі зменшенням тиску, до тиску насичених парів, рідина починає виділяти газ, які в ній розчинені, при цьому утворюються бульбашки, наповнені, як газом, так і парами рідини. Якщо в рухомій рідині бульбашки попадають в зону, де тиск більший від того, де вони утворилися, то бульбашки миттєво захлопуються, що призводить до значного місцевого підвищення тиску (до 100 атмосфер). Таке явище називається *кавітацією*. Кавітація призводить до поступового руйнування поверхні твердих стінок, яких торкається потік рідини.

Аналогом кавітації в технічних пристроях в організмі людини є кесонна хвороба – захворювання, що виникає в організмі людини при швидкому переході з середовища з підвищеним атмосферним тиском повітря у середовище з нижчим тиском. Виникає в результаті того, що розчинений у крові азот у процесі зниження тиску бурхливо виділяється з неї і не встигає дифундувати через легені назовні. У легкій і помірній своїй формі проявляється у вигляді м'язового болю, свербіння шкіри, носових кровотеч; у важкій – може настати параліч ніг, ураження легень і серця. Ознаки з'являються незабаром після виходу з середовища підвищеного тиску.

Бульбашки газу в крові можуть з'явитись при пошкодженні великих вен, при звільненні газів крові в результаті швидкого зменшення зовнішнього тиску (зменшення розчинності газів у крові). Останнє можливо при швидкому підніманні водолазів з

глибини, у пілотів і космонавтів при розгерметизації кабін на значних висотах.

Рішенням усунення виникнення кесонної хвороби є поступове підймання з глибини, із зупинками за допомогою декомпресійної камери (барокамери). Це дозволяє бульбашкам азоту розсіятися без шкоди для організму.

Інколи при розв'язуванні практичних задач, для спрощення математичної моделі процесу, деякі фізичні властивості рідин не враховуються.

В гідравліці для полегшення вирішення теоретичних питань використовується модель *ідеальної* рідини, яка вважається нестисливою, не розширюється, і в ній відсутня в'язкість.

Питання для самоконтролю.

1. Що вивчає наука гідравліка?
2. Що таке рідина?
3. Що таке густина і в яких одиницях вона вимірюється?
4. Яка густина води, крові та повітря?
5. Що таке питома вага?
6. Що таке коефіцієнт об'ємного стиснення?
7. Що таке модуль об'ємної пружності рідини?
8. Що таке коефіцієнт об'ємного температурного розширення?
9. Що таке в'язкість?
10. За якою формулою розраховуються сили внутрішнього тертя рідини?
11. Що таке кінематична в'язкість? Які одиниці вимірювання динамічної та кінематичної в'язкості?
12. Як залежить в'язкість рідин та газів від їх температури?
13. Що таке кавітація?
14. Яка причина виникнення кесонної хвороби?
15. Що таке ідеальна рідина?

Лекція 2

Гідростатичний тиск та одиниці його вимірювання

Напруження, що виникає всередині об'єму рідини в стані рівноваги, називається *гідростатичним тиском*

$$p = \lim_{\omega \rightarrow 0} P / \omega, \text{ Н / м}^2, \quad (2.1)$$

де P – сила, ω – площа.

В системі одиниць СІ одиницею тиску є Паскаль (Па), що дорівнює тиску, який створюється силою в 1Н на 1м^2 ($1\text{Па} = 1\text{Н/м}^2$). Ця одиниця тиску мала, тому використовуються кратні величини ($1\text{кПа} = 1000\text{Па}$, $1\text{МПа} = 10^6\text{Па}$). Крім цих одиниць тиску використовуються інші одиниці вимірювання тиску, які зв'язані такими співвідношеннями:

$$1\text{техн. ат.} = 1\text{кгс/см}^2 = 10\text{ м.в.ст.} = 736\text{ мм.рт.ст.} = 98100\text{ Па} \approx 1\text{бар.}$$

$$1\text{фізична ат.} = 760\text{ мм.рт.ст.} \approx 101300\text{ Па} =$$

$$14,6959\text{ PSI (pound-force per square inch).}$$

$$1\text{бар} = 1,02\text{ кгс/см}^2 = 750,3\text{ мм.рт.ст.} = 10^5\text{ Па.}$$

Абсолютний та манометричний тиск

Абсолютний тиск – тиск, який відраховується від абсолютного нуля тиску – абсолютного вакууму (рис. 2.1).

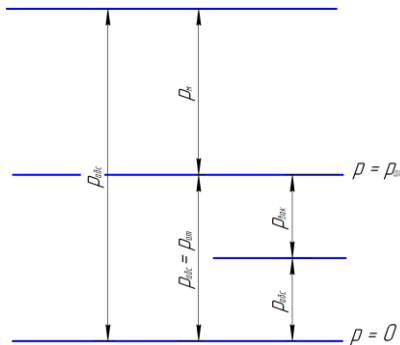


Рисунок 2.1 – Графічне зображення тиску

Манометричний тиск – тиск, який перевищує атмосферний тиск.

Вакууметричний тиск (вакуум) – різниця між абсолютним тиском, у випадку коли $p_{abc} < p_{am}$, і атмосферним тиском.

Повний або абсолютний тиск в будь-якій точці нерухомої рідини визначається за формулою

$$p_{abc} = p_o + \rho gh, \quad (2.2)$$

де p_o – тиск на вільній поверхні рідини;

ρgh – тиск, що створюється шаром рідини висотою h над цією точкою.

У випадку, якщо $p_o = p_{am}$, то

$$p_{abc} = p_{am} + \rho gh. \quad (2.3)$$

Надлишковий або **манометричний тиск** визначається як різниця

$$p_{abc} - p_{am} = \rho gh. \quad (2.4)$$

На практиці, як правило, мають справу з надлишковим тиском, тому його звичайно позначають без індексу

$$p = \rho gh \quad (2.5)$$

У випадку, коли $p_{abc} < p_{am}$ утворюється вакуум

$$p_{вак} = p_{am} - p_{abc}. \quad (2.6)$$

При $p_{abc} = 0$ значення вакууму має максимальне значення

$$(p_{вак})_{max} = p_{am} = 98,1 \text{ кПа}. \quad (2.7)$$

Прилади для вимірювання гідростатичного тиску

Для вимірювання тиску використовуються рідинні, механічні, електричні та комбіновані прилади. Найбільше застосування мають прилади, які вимірюють не абсолютний тиск, а різницю тисків, тобто є диференціальними приладами. Так *манометри* вимірюють різницю повного та атмосферного тисків (надлишок тиску над атмосферним); *вакуумметри* – різницю атмосферного та повного тисків (недостачу повного тиску до атмосферного). Прилади які вимірюють різницю тисків у двох точках називаються *диференціальними манометрами*.

До рідинних приладів відноситься п'єзометр, що являє собою прозору трубку з внутрішнім діаметром 10...15 мм, яка од-

ним кінцем під'єднується до посудини з рідиною, а другим – сполучається з атмосферою. Мінімальний діаметр трубки – 10 мм визначається для уникнення капілярного впливу. В якості робочих рідин можуть використовуватись вода, ртуть, бензин, оливи і т.п. Одному і тому ж тиску відповідають різні висоти стовпів рідини в залежності від їх густини. Чим більша густина, тим менша потрібна довжина п'єзометра. Якщо для вимірювання манометричного тиску $p_m = 98,1$ кПа висота п'єзометра з водою повинна бути не меншою 10 м, то мінімальна висота ртутного манометру – 736 мм. Використання ртутних манометрів звичайно обмежується тиском 300 кПа, а п'єзометрів з водою – 50 кПа. Рідинні прилади мають велику точність та чутливість, але їх використання обмежено областю невеликих тисків.

Принцип дії механічних приладів (рис. 1.2) будується на законі Гука, тобто деформація їх пружного елемента (пружини, силфони, мембрани) пропорційна тиску. Ці прилади невеликі, універсальні, прості, мають великий діапазон вимірювання тиску ($10^2 \dots 10^9$ Па), але пружні властивості деформуючого елемента з часом змінюються, тому для забезпечення необхідної точності потрібно періодично перевіряти прилади і визначати їх поправку.

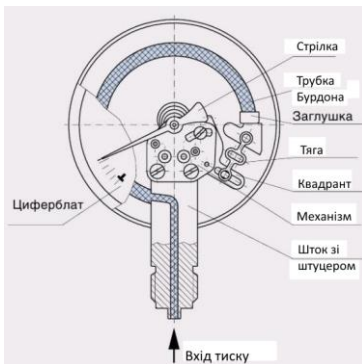


Рисунок 1.2 – Пружинний манометр



Рисунок 1.3 – Електричні датчики тиску

В електричних приладах використовується здатність деяких матеріалів змінювати свої електричні властивості при зміні

тиску. Деформація чутливого елемента (датчика) (рис. 1.3) перетворюється в електричний сигнал, який реєструється спеціальними приладами. Датчики мають малі розміри, масу і можуть вимірювати параметри, які швидко змінюються.

При вимірюванні артеріального тиску у тварин використовується непрямий метод, коли на кінцівку або корінь хвоста тварини одягають манжету, до якої під'єднаний тонометр і в яку подається стиснене повітря. У ВРХ та коней артеріальний тиск вимірюють на хвостовій артерії, а у свиней та собак – на стегновій артерії. Значення артеріального тиску у тварин приведено в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Артеріальний тиск тварин

Вид тварини	Артеріальний тиск, мм. рт. ст.		
	максимальний	мінімальний	пульсовий
Велика рогата худоба	110-140	30-50	80-90
Дрібна рогата худоба	100-120	50-65	50-55
Коні	110-120	35-55	65-75
Свині	135-155	45-55	90-100
Собаки	120-140	30-40	90-100
Птахи	160-200	100-130	60-70

Питання для самоконтролю.

16. Яке призначення манометрів та вакуумметрів?
17. Які переваги та недоліки п'єзометрів при вимірюванні тиску?
18. Які переваги та недоліки пружинних манометрів при вимірюванні тиску?
19. Які переваги та недоліки електричних приладів при вимірюванні тиску?
20. Які значення артеріального тиску у тварин?

What is a Pressure Sensor?

<https://www.youtube.com/watch?v=iru8tRwS7Yc>

Measuring Principle Pressure

<https://www.youtube.com/watch?v=QrT8VWxdxwk>

Лекція 3

Гідростатика

Гідростатика – розділ гідравліки, в якому розглядаються закони рівноваги рідини і розробляються методи використання цих законів для розв’язування практичних задач.

Рідина знаходиться в спокої, якщо її частинки не рухаються одна відносно другої. При цьому на рідину діють масові сили (сила інерції, сила тяжіння) і поверхневі сили, прикладені до поверхні, яка обмежує даний об’єм рідини (сила атмосферного тиску, сила тертя). Напруження, що виникає всередині об’єму рідини в стані рівноваги, називається *гідростатичним тиском*

$$p = \lim_{\omega \rightarrow 0} P / \omega, \text{ Н / м}^2, \quad (3.1)$$

де P – сила, ω – площа.

Властивості гідростатичного тиску

1. Гідростатичний тиск завжди направлений по внутрішній нормалі до поверхні дії;
2. Значення гідростатичного тиску не залежить від орієнтації поверхні дії в просторі;
3. Гідростатичний тиск в даній точці залежить від координат точки в об’ємі рідини та її густини $p = f(x, y, z, \rho)$.

Основне рівняння гідростатики

Виділимо в об’ємі нерухомої рідини елементарний циліндр з площею основи $\Delta\omega$ та висотою h , верхня основа циліндра співпадає з вільною поверхнею рідини (рис. 3.1). *Вільною поверхнею* рідини називається поверхня, що межує з газовим середовищем.

Тиск в центрі ваги нижньої основи циліндра (т.1) позначимо p_1 , а в центрі верхньої основи (т. 2) – p_2 , відповідно координати центрів ваги основ z_1 та z_2 , тиск на вільній поверхні рідин – p_0 . Для визначення тиску в т.1 розглянемо рівновагу виділеного циліндра нерухомої рідини. На циліндр діють такі сили:

1. сила тиску на верхню основу циліндра $P_0 = p_2 \Delta \omega$;
2. сила тиску на нижню основу циліндра $P_1 = p_1 \Delta \omega$;
3. масова сила ваги рідини в об'ємі циліндра $F = \rho g \Delta \omega h$;
4. сили тиску на бічну поверхню циліндра, які взаємно врівноважені і тому не розглядаються.

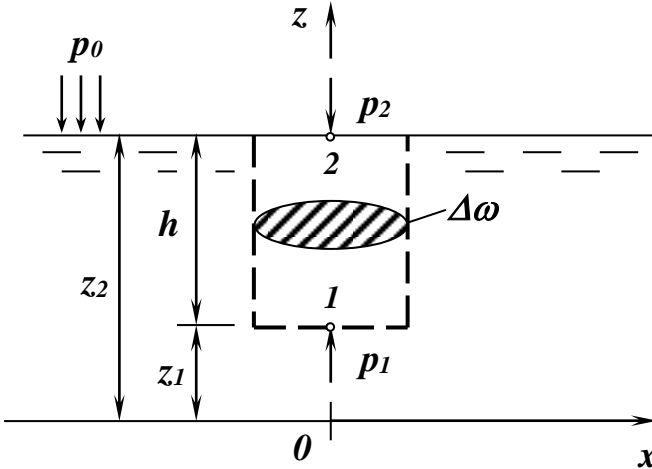


Рисунок 3.1 – До виведення основного рівняння гідростатики

Оскільки циліндр знаходиться в рівновазі, то сума проєкцій усіх сил на вісь Oz дорівнює нулю $\sum F_z = 0$:

$$-P_0 + P_1 - F = 0, \quad (3.2)$$

$$\text{або} \quad -p_2 \Delta \omega + p_1 \Delta \omega - \rho g \Delta \omega h = 0, \quad (3.3)$$

де $z_2 - z_1 = h$.

Скорочуючи рівняння (3.3) на $\rho g \Delta \omega$ та перегрупувавши члени, отримуємо *основне рівняння гідростатики*:

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \quad (3.4)$$

оскільки $p_2 = p_0$ і позначивши p_1 як p , то основне рівняння гідростатики можна записати у такій формі:

$$p = p_0 + \rho g h. \quad (3.5)$$

З рівняння (3.5) видно, що значення тиску в рідині лінійно залежить від глибини h занурення точки.

Поверхні рівня

Геометричне місце точок в об'ємі рідини, в яких тиск однаковий, називається *поверхнею рівня*.

З основного рівняння гідростатики (3.4) видно, що в рідині, яка знаходиться в стані спокою, $p = \text{const}$ при $z = \text{const}$. Тобто, якщо на рідину діє тільки сила тяжіння, то поверхні рівня будуть горизонтальними площинами.

У випадку, коли рідина знаходиться у відносній рівновазі в посудині, що рухається з постійним прискоренням a (рис.2.2), поверхні рівня є похилі площини з кутом нахилу до горизонту β , причому $\text{tg } \beta = a / g$.

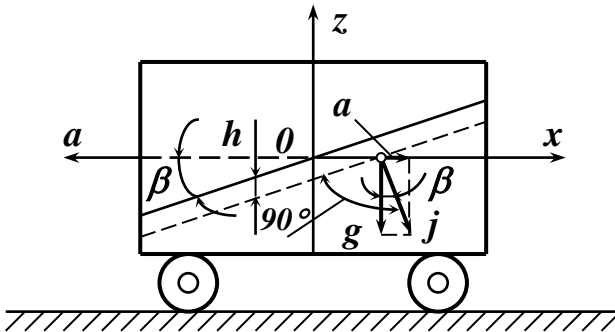


Рисунок 3.2 – Поверхні рівня рідини при відносній рівновазі в посудині, що рухається з постійним прискоренням

Тоді рівняння поверхні рівня має вид

$$z = a / gx - h, \quad (3.6)$$

де h – глибина занурення поверхні рівня під вільну поверхню вздовж осі Oz .

Рідина може знаходитися у відносній рівновазі в посудині, що обертається з постійною кутовою швидкістю ω (сепаратори, центрифуги і т. п.). В цьому випадку поверхня рівня буде параболоїдом обертання (рис. 3.3).

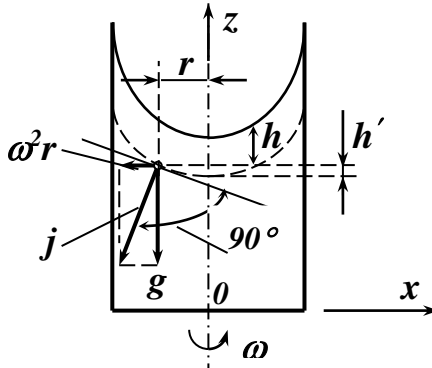


Рисунок 3.3. – Поверхні рівня рідини при відносній рівновазі в посудині, що обертається з постійною кутовою швидкістю

На кожен частинку рідини масою m , що знаходиться на відстані r від осі обертання, діє масова сила тяжіння mg та відцентрова сила $m\omega^2 r$, результуючий вектор j є сумою цих сил. Висота будь-якої точки поверхні рівня над вершиною параболоїду обертання визначається за формулою

$$h' = \frac{\omega^2 r^2}{2g}. \quad (3.7)$$

Геометричне та енергетичне тлумачення основного рівняння гідростатики

Повний гідростатичний тиск в т.А, що знаходиться на глибині h у відкритій посудині з рідиною і тиском $p_0 = p_{atm}$ на вільній поверхні, визначається за формулою

$$p_{abc} = p_0 + \rho gh, \quad (3.8)$$

а манометричний тиск – за формулою

$$p = \rho gh. \quad (3.9)$$

Якщо до резервуару на рівні т.А під'єднати п'єзометр (скляна трубка діаметром 10...15 мм) з відкритим кінцем, то рідина в ньому встановиться на рівні вільної поверхні рідини в резервуарі (рис. 3.4). Висота стовпа рідини в п'єзометрі залежить від манометричного тиску

$$h = \frac{p_m}{\rho g}. \quad (3.10)$$

Висота h називається *п'езометричною висотою*.

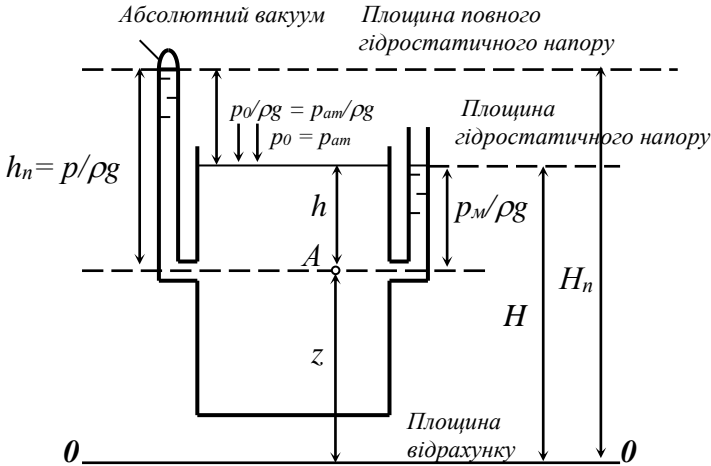


Рисунок 3.4 – До тлумачення основного рівняння гідростатики

Якщо до резервуару під'єднати п'езометр з запаяним кінцем і відкачати з нього повітря, тобто створити в ньому абсолютний вакуум ($p_0 = 0$), то рідина підніметься на висоту, що відповідає атмосферному тиску тобто висоті стовпа води $h = 10$ м.

Висота стовпа рідини в запаяному п'езометрі h_n називається *приведеною висотою*. Відповідно приведена висота відповідає величині повного гідростатичного тиску, а п'езометрична висота – манометричному тиску.

Якщо тиск на вільній поверхні рідини в посудині більший від атмосферного, то у відкритому п'езометрі вода підійметься вище рівня води в посудині (рис. 3.5) на висоту стовпа рідини, що зрівноважує різницю тисків $(p_0 - p_{atm})/\rho g$. Відповідно висота цього стовпчика води відповідає манометричному тиску на вільній поверхні в резервуарі, а п'езометрична висота $p_m/\rho g$ – манометричному тиску в т.А.

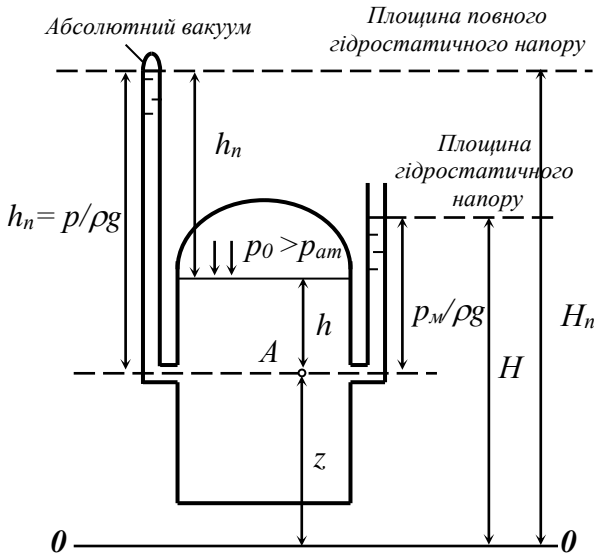


Рисунок 3.5 – До тлумачення основного рівняння гідростатики

Якщо тиск на вільній поверхні рідини менший від атмосферного (вакуум), то у відкритому п'езометрі рівень встановиться нижчим ніж у резервуарі.

Основне рівняння гідростатики можна записати у такому вигляді

$$gz + \frac{p}{\rho} = const, \quad (3.11)$$

де величина gz виражає потенціальну енергію рідини масою 1 кг, що піднята на висоту z від площини 0-0 (т.А). Крім цього в т.А на рідину діє повний гідростатичний тиск, під дією якого рідина масою 1 кг може підійнятися ще на висоту $p/\rho g$. Тобто повна потенціальна енергія одиниці маси рідини складається з двох величин: gz – питома потенціальна енергія положення та $p/\rho g$ – питома потенціальна енергія тиску. Одиницею енергії є Джоуль, тому питома енергія вимірюється в Дж/кг.

З основного рівняння гідростатики випливає, що з фізичної точки зору повна потенціальна енергія для всіх частинок рідини, що знаходиться в стані спокою, є постійною величиною.

Рівняння (3.11) також можна записати у вигляді

$$z + \frac{p}{\rho g} = \text{const}, \quad (3.12)$$

де кожний член виразу є одиницею вимірювання напору.

Величина $H_n = z + p / \rho g$ називається *повним гідростатичним напором*. Величина $H = z + p_m / \rho g$ називається *п'езометричним (гідростатичним) напором*, а величина $p_m / \rho g$ називається *п'езометричною висотою*.

З геометричної точки зору основне рівняння гідростатики можна інтерпретувати так: *для всіх частинок рідини, що перебувають в стані спокою, сума висот положення z та п'езометричних висот $p_m / \rho g$ є сталою величиною*.

Закон сполучених посудин

Розглянемо рівновагу рідини в сполучених посудинах (рис. 3.6), в яких на вільній поверхні рідин тиск однаковий. В посудинах знаходяться рідини з різною густиною, причому $\rho_2 > \rho_1$. Поверхня розділу рідин 0-0 є поверхнею рівного тиску. Оскільки густина рідин різна, то висота стовпчиків рідин теж різна, відносно поверхні розділу 0-0. Рівняння рівноваги рідин відносно поверхні 0-0 має вид

$$p_o + \rho_1 g h_1 = p_o + \rho_2 g h_2. \quad (3.13)$$

Звідки
$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{\rho_2}{\rho_1}. \quad (3.14)$$

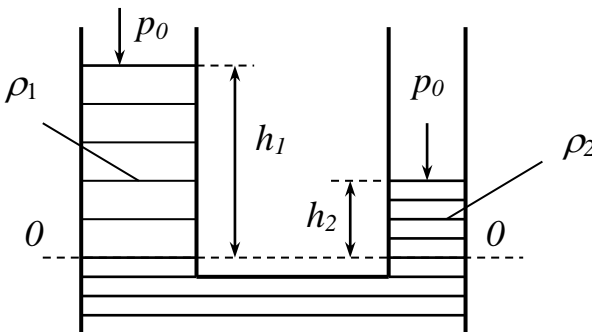


Рисунок 3.6 – Сполучені посудини

Таким чином в сполучених посудинах, наповнених рідинами, які не змішуються, висоти стовпчиків рідин над поверхнею розділу обернено пропорційні густинам цих рідин, якщо тиски на вільних поверхнях однакові.

Закон Паскаля. Прості гідравлічні машини

Закон Паскаля формулюється так: *всяка зміна тиску в будь-якій точці нерухомої рідини, яка не порушує її рівноваги, передається в усі точки рідини без змін.*

З основного рівняння гідростатики маємо

$$z_1 + \frac{p_1 + \Delta p_1}{\rho g} = z_2 + \frac{p_2 + \Delta p_2}{\rho g}. \quad (3.15)$$

У відповідності з законом Паскаля $\Delta p_1 = \Delta p_2$. Закон Паскаля використовується при побудові простих гідравлічних машин. *Гідравлічний прес* – машина для створення зусиль, необхідних для штампування виробів, або їх пресування (рис. 3.7). *Гідравлічний домкрат* призначений для створення зусиль для підймання вантажів. Ці машини складаються з двох сполучених циліндрів з плунжерами малого та великого діаметрів.

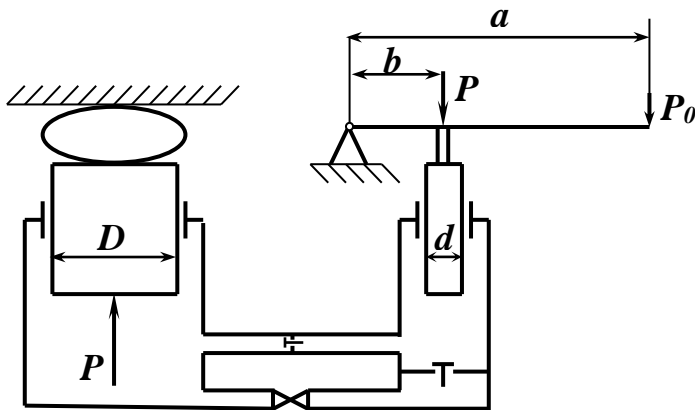


Рисунок 3.7 – Гідравлічний прес

Якщо до кінця важеля прикласти зусилля P_0 , то на малий плунжер буде діяти сила P_1

$$P_1 = P_0 \frac{a}{b}. \quad (3.16)$$

Внаслідок чого в рідині під плунжером виникне зміна тиску

$$\Delta p = \frac{P_1}{\omega} = \frac{P_0 \frac{a}{b}}{\omega}, \quad (3.17)$$

де ω – площа поперечного перерізу малого плунжера.

Зміна тиску, у відповідності з законом Паскаля, передається в усі точки об'єму, заповненого рідиною, без змін. Тоді сила тиску рідини на великий плунжер буде визначатися за формулою

$$P = \Delta p \Omega = P_0 \frac{a}{b} \frac{\Omega}{\omega}, \quad (3.18)$$

де Ω – площа поперечного перерізу великого плунжера.

Відношення Ω/ω називається *передаточним числом*. Очевидно, що для циліндрів $\Omega/\omega = (D^2/d^2)$.

Враховуючи втрати напору на тертя в рухомих частинах, введенням ККД η , отримаємо розрахункову формулу

$$P = P_0 \frac{a}{b} \left(\frac{D}{d} \right)^2 \eta. \quad (3.19)$$

Звичайно ККД має значення $\eta = 0,8 \dots 0,85$.

Гідравлічний мультиплікатор – пристрій для збільшення тиску. Він складається з поршня діаметром D , який з'єднаний з плунжером діаметром d (рис. 3.8).

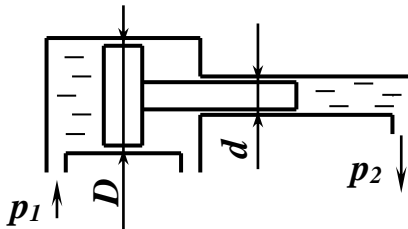


Рисунок 3.8 – Гідравлічний мультиплікатор

При подачі в циліндр робочої рідини з тиском p_1 , на поршень буде діяти сила $P = p_1 \pi D^2 / 4$. Ця сила створює тиск під плунжером

$$p_2 = \frac{4P}{\pi d^2}. \quad (3.20)$$

З урахуванням ККД, тиск p_2 визначається за формулою

$$p_2 = p_1 \left(\frac{D}{d} \right)^2 \eta. \quad (3.21)$$

Визначення сили тиску на горизонтальну поверхню

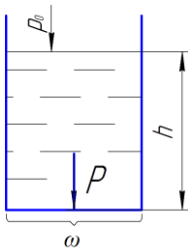
Повна сила тиску на горизонтальну плоску поверхню визначається за формулою

$$P_{\text{повн}} = (p_o + \rho gh) \omega \quad (3.22)$$

де p_o – тиск на вільній поверхні рідини;

h – висота стовпа рідини над плоскою поверхнею;

ω – площа плоскої поверхні.



Сила манометричного тиску рідини на горизонтальну плоску поверхню (рис. 3.9), при $p_o = p_{\text{ат}}$ визначається за формулою

$$P = \rho gh \omega. \quad (3.23)$$

Рисунок 3.9 – До визначення сили манометричного тиску

Закон Архімеда

Закон Архімеда формулюється так: *на занурене в рідину тіло діє сила, направлена вертикально вгору і яка дорівнює вазі об'єму витісненої тілом рідини*. Цю силу називають архімедовою

$$P_z = \rho g W, \quad (3.24)$$

де W – об'єм витісненої тілом рідини.

Закон Архімеда є фундаментом теорії плавання.

Здатність тіла плавати залежить від різниці сил, що діють на нього, тобто різниці сили тяжіння G та архімедової сили P_z .

Якщо $G > P_z$ то тіло тоне, при $G < P_z$ тіло спливає, а при $G = P_z$ тіло плаває.

Визначення нормального напруження в матеріалі труби круглого поперечного перерізу

Труба знаходиться під постійним тиском p (рис. 3.10). Горизонтальна сила P_x намагається розірвати трубу по вертикальному діаметральному перерізу.

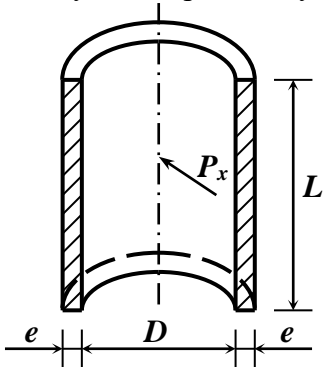


Рисунок 3.10 – До визначення нормального напруження в стінках труби

Якщо це нормальне напруження перевищить допустиме, яке залежить від матеріалу стінок труби, то це призведе до руйнування труби.

$$P_x = p \omega_x = pLD \quad (3.25)$$

Ця сила діє як розтягуюча і вона врівноважується силами опору які виникають в матеріалі, з якого виготовлена труба по площі осевого перерізу труби $2eL$, де e – товщина стінки труби.

Нормальне напруження в матеріалі стінок труби визначається за формулою Маріотта

$$\sigma = pD/2e. \quad (3.26)$$

Питання для самоконтролю.

1. Що вивчає гідростатика?
2. Які властивості гідростатичного тиску?
3. Які форми запису має основне рівняння гідростатики?
4. Що таке поверхня рівня?

5. Що таке вільна поверхня?
6. Як розраховуються поверхні рівня рідини, що рухається разом з посудиною з постійним прискоренням?
7. Як розраховуються поверхні рівня рідини, що обертається разом з посудиною з постійною кутовою швидкістю?
8. Як інтерпретується основне рівняння гідростатики з фізичної та енергетичної точок зору?
9. Як формулюється закон сполучених посудин?
10. Як формулюється та записується закон Паскаля?
11. Як розраховується зусилля гідравлічного преса?
12. Як розраховується гідравлічний мультиплікатор?
13. Як визначається сила тиску на горизонтальну плоску поверхню?
14. Як формулюється закон Архімеда?
15. Як розраховується нормальне напруження в матеріалі стінок труби?

Hydraulic Jack how it works

<https://www.youtube.com/watch?v=Ykgi09b8BiI>

Механогидравлический операционный стол Фаура 6ЭГ-4

<https://ema.su/catalog/operatsionnye-stoly/stoly-operatsionnye-gidravlicheskie/mehanogidravlicheskiy-operatsionnyj-stol-faura-6eg-4/>

Лекція 4

Гідродинаміка

Гідродинаміка – розділ гідравліки, в якому вивчаються закони руху рідини.

У гідравліці розглядають рух рідини як суцільного середовища, тобто середовища без розривів і пустот, в якому місцева швидкість u і гідродинамічний тиск p є безперервними функціями координат. Визначення цих величин – головна задача гідродинаміки.

Існують два види руху рідини: усталений та неусталений.

Неусталений рух – це такий рух, коли в кожній точці рідини u і p залежить не тільки від координат але й від часу:

$$\left. \begin{aligned} u &= f_1(x, y, z, t) \\ p &= f_2(x, y, z, t) \end{aligned} \right\}. \quad (4.1)$$

Прикладом неусталеного руху є рух рідини при витіканні через отвір в резервуарі, рівень рідини в якому змінюється.

Усталеним називають такий рух рідини, при якому u і p залежить лише від координат точки

$$\left. \begin{aligned} u &= \varphi_1(x, y, z) \\ p &= \varphi_2(x, y, z) \end{aligned} \right\}. \quad (4.2)$$

Усталений рух ділиться на рівномірний та нерівномірний.

Рівномірним є такий усталений рух, при якому всі елементи потоку не змінюються по його довжині (рух рідини в круглій трубі постійного діаметру).

Нерівномірним усталеним є такий рух, при якому елементи потоку змінюються по його довжині (рух рідини в трубах змінного перерізу).

В залежності від наявності вільної поверхні у потоках рідини розрізняють напірний і безнапірний рухи. У випадках, коли весь поперечний переріз труби заповнено рідиною, рух називається *напірним*. Рух потоків у відкритих руслах і трубах при наявності вільної поверхні називається *безнапірним*.

При вивченні руху рідини, найбільшого поширення здобула *струминкова модель*, яка базується на таких визначеннях.

Лінією течії називається така лінія в рухомій рідині, у кожній точці якої, в даний момент часу, вектор швидкості є дотичною. Лінія течії – миттєва характеристика руху.

Траєкторія – шлях, який проходить частинка рідини за певний проміжок часу.

Для усталеного руху лінії течії збігаються з траєкторією руху частинок уздовж потоку. Якщо в потоці рідини виділити елементарний замкнений контур, усі точки якого належать різним лініям течії, то ці лінії утворюють елементарну замкнену поверхню, яка утворює *трубку течії* (рис. 4.1).

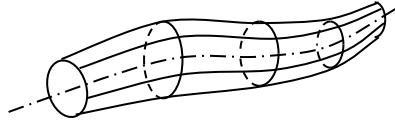


Рисунок 4.1 – Трубка течії

Усі лінії течії, що проходять всередині трубки течії, утворюють *елементарну струминку*.

Сукупність елементарних струминок, які рухаються з різними швидкостями, називається *поток*ом рідини.

Гідравлічні характеристики потоку рідини

До гідравлічних характеристик потоку рідини належать такі терміни як живий переріз, змочений периметр, гідравлічний радіус, об'ємна витрата та середня швидкість.

Живим перерізом ω називається площа поперечного перетину потоку, яка перпендикулярна до усіх ліній течії.

Змоченим периметром χ називається частина периметру живого перерізу потоку, по якому рідина стикається з внутрішньою поверхнею русла.

Гідравлічним радіусом R називається відношення площі живого перерізу до змоченого периметру $R = \frac{\omega}{\chi}$ (для круглої труби яка працює повним перерізом $R = \frac{d}{4}$).

Об'єм рідини, що протікає за одиницю часу через поперечний переріз площею ω , називається *об'ємною витратою* – Q . Одиницями об'ємної витрати є $\text{м}^3/\text{с}$, $\text{м}^3/\text{год}$, $\text{л}/\text{с}$, $\text{мл}/\text{хв}$. і т.п.

Середня швидкість потоку V – це така умовна швидкість, однакова для всіх точок живого перерізу, з якою через живий переріз проходила б витрата, що дорівнює фактичній (рис. 4.2). $V = Q / \omega$.

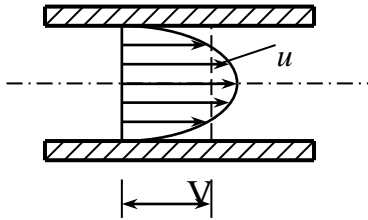


Рисунок 4.2 – Епюра місцевої u та середньої швидкості V руху рідини в трубі.

Рівняння нерозривності для елементарної струминки рідини.

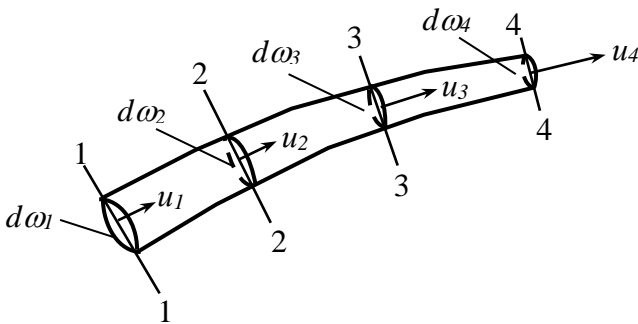


Рисунок 4.3 – Елементарна струминка

Розглянемо елементарну струминку ідеальної рідини при усталеному русі. Виділимо відсік рідини між перерізами 1-1 і 2-2 елементарної струминки (рис. 4.3). За час dt через переріз $d\omega_1$ у виділений відсік втікає рідина в об'ємі $d\omega_1 u_1 dt$. За той же час dt через переріз $d\omega_2$ з відсіку витече об'єм рідини $d\omega_2 u_2 dt$.

Так як форма відсіку з часом не змінюється, поверхня струминки непроникна, а сама рідина не стискувана, то

$$d\omega_1 u_1 dt = d\omega_2 u_2 dt \quad (4.3)$$

або

$$d\omega_1 u_1 = d\omega_2 u_2. \quad (4.4)$$

Аналогічно для інших перерізів і таким чином *рівняння нерозривності елементарної струминки* має вид

$$d\omega_1 u_1 = d\omega_2 u_2 = d\omega_i u_i = \dots = d\omega_n u_n = const \quad (4.5)$$

або

$$dQ_1 = dQ_2 = dQ_i = \dots = dQ_n = const. \quad (4.6)$$

Якщо в потоці рідини виділити два перерізи, які знаходяться на деякій відстані один від іншого, то

$$\sum_{\omega_1} d\omega_1 u_1 = \sum_{\omega_2} d\omega_2 u_2. \quad (4.7)$$

Таким чином *рівняння нерозривності для потоку рідини* (рис. 4.4) при усталеному русі має вид

$$Q_1 = Q_2 = Q = const \quad (4.8)$$

або
$$V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2 = \dots = V_n \omega_n = Q = const. \quad (4.9)$$

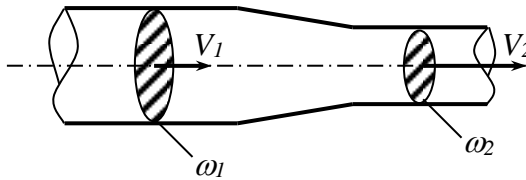


Рисунок 4.4 – До рівняння нерозривності потоку рідини

З рівняння 4.9 маємо

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (4.10)$$

Таким чином середні швидкості руху рідини в живих перерізах обернено пропорційні площам цих перерізів.

Питання для самоперевірки.

1. Що таке усталений та неусталений рух рідини?
2. Що таке рівномірний та нерівномірний усталений рух рідини?
3. Що таке напірний та безнапірний рух рідини?
4. На яких визначення базується струминкова модель?
5. Які є гідравлічні характеристики потоку?
6. Як виводиться рівняння нерозривності для елементарної струминки?
7. Як формулюється рівняння нерозривності для потоку рідини?

Лекція 5

Режими руху рідини

Існують два режими руху рідини – ламінарний та турбулентний. Режим руху, при якому відсутні пульсації швидкості та тиску, внаслідок чого частинки рідини не перемішуються, називається *ламінарним* (від латинського слова *lamina* – шар) режимом руху рідини. Режим руху, при якому відбуваються пульсації швидкості та тиску, внаслідок чого частинки рідини інтенсивно перемішуються, називається *турбулентним* (від латинського слова *turbulentus* – хаотичний) режимом руху рідини.

Ламінарний режим руху рідини зустрічається при русі в трубопроводах рідин з великою в'язкістю (кров, нафта і т.п.), а також при русі води в капілярних трубках. Турбулентний режим зустрічається у більшості випадків (рух води в трубах, каналах, ріках і т.п.).

Існування двох режимів руху рідини було встановлено експериментальним шляхом англійським фізиком Рейнольдсом у 1883 році. Досліди проводились на спеціальній установці (рис. 5.1).

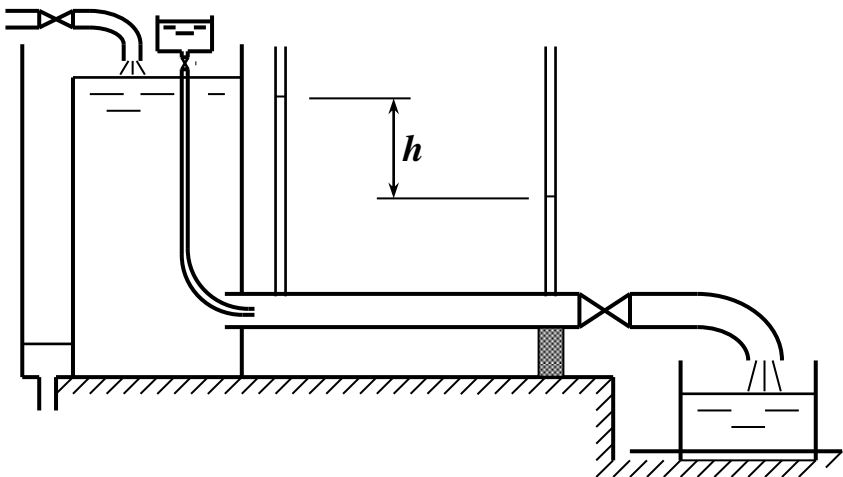


Рисунок 5.1 – Схема експериментальної установки Рейнольдса

При дослідах рівень рідини в резервуарі підтримувався постійним, а в прозору скляну трубку, по якій рухалась рідина, підводилась зафарбована рідина. Коли зафарбована рідина рухалась окремою струминкою, то це був ламінарний режим руху рідини, а коли вона інтенсивно перемішувалась з рідиною в трубці, то це був турбулентний режим руху. За результатами дослідів встановлено, що режим руху рідини залежить від динамічної в'язкості рідини η , середньої швидкості руху V , густини рідини ρ та діаметру трубопроводу d . Рейнольдсом була запропонована безрозмірна величина, яка враховувала вплив всіх факторів. Цю величину пізніше почали називати *числом Рейнольдса*.

$$Re = \frac{Vd\rho}{\eta} \quad (5.1)$$

Так як $\eta / \rho = \nu$ (ν – кінематична в'язкість рідини), то число Рейнольдса може записуватись так

$$Re = \frac{Vd}{\nu} \quad (5.2)$$

Число Рейнольда, з фізичної точки зору, є відношенням сил інерції до сил тертя.

В результаті дослідів встановлено, що режим руху буде ламінарним коли число Рейнольдса, в даних умовах, менше деякого граничного значення, що називається *критичним числом Рейнольдса* і позначається $Re_{кр}$. Для круглих труб $Re_{кр} = 2320$.

Якщо $Re < Re_{кр}$, то режим руху рідини ламінарний.

Якщо $Re > Re_{кр}$ – режим руху рідини турбулентний.

Також встановлено, що втрати напору при різних режимах описуються загальною формулою

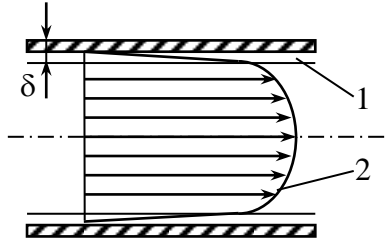
$$h_w = bV^m, \quad (5.3)$$

де b – коефіцієнт, що враховує розміри труби, властивості її стінок та вид рідини.

При ламінарному режимі руху рідини $m = 1$, а при турбулентному $m = 1,75 \dots 2$.

Структура турбулентного потоку в трубі та гідравлічно гладкі і шорсткі труби

На основі дослідних даних турбулентний потік в трубі зображується у вигляді 2^х шарової моделі (рис. 5.2).



1 – ламінарна плівка, 2 – турбулентне ядро

Рисунок 5.2 – Структура турбулентного потоку

Характер втрат напору при турбулентному режимі визначається співвідношенням між товщиною ламінарної плівки δ та абсолютною шорсткістю стінок трубопроводу Δ . В залежності від цього співвідношення стінки русел бувають гідравлічно гладкими ($\delta > \Delta$) та гідравлічно шорсткими ($\Delta > \delta$). Коефіцієнт гідравлічного опору при турбулентному режимі визначається в залежності від числа Рейнольдса і при цьому можливі такі три випадки:

1) $\delta > \Delta$ – гідравлічно гладкі труби

$$\lambda = \frac{0,3164}{\text{Re}^{0,25}} \quad \text{при } 4000 < \text{Re} < 10^5; \quad (5.4)$$

2) $\Delta > \delta$ – гідравлічно шорсткі труби (квадратична область опору)

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_e}{d} \right)^{0,25} \quad \text{при } \text{Re} > 500 \frac{d}{\Delta_e}; \quad (5.5)$$

3) $\Delta \approx \delta$ – перехідна зона

$$\lambda = 0,11 \left(\frac{\Delta_e}{d} + \frac{68}{\text{Re}} \right)^{0,25} \quad \text{при } 20 \frac{d}{\Delta_e} < \text{Re} < \frac{500d}{\Delta_e}. \quad (5.6)$$

Питання для самоперевірки.

8. Які існують режими руху рідини та які їх відмінності?
9. Що визначає число Рейнольдса?
10. Що визначає критичне число Рейнольдса?
11. Яка залежність між втратами напору та середньою швидкістю руху рідини при різних режимах руху?
12. Яка структура турбулентного потоку в трубі?
13. Які труби є гідравлічно гладкими?
14. Які труби є гідравлічно шорсткими?
15. Що таке перехідна зона?

Лекція 6

**Геометрична та енергетична інтерпретації
рівняння Бернуллі**

Рівняння Бернуллі має геометричне та енергетичне пояснення. При геометричній інтерпретації всі члени рівняння Бернуллі мають лінійну розмірність і можуть бути представлені відрізками відповідної довжини: z – висота положення; $p/\rho g$ – п'єзометрична висота; $u^2/2g$ – швидкісна висота (напір).

Сума висот положення, п'єзометричного та швидкісного напорів називається повним напором, який для елементарної струминки ідеальної рідини, є постійним по довжині, при установленому русі

$$z + \frac{p}{\rho g} + \frac{u^2}{2g} = H = \text{const.} \quad (6.1)$$

Сума $z + p/\rho g$ називається п'єзометричним напором.

При енергетичній інтерпретації рівняння Бернуллі є законом збереження енергії, кожний член якого виражає певну питому енергію: z – питома потенціальна енергія положення; $p/\rho g$ – питома потенціальна енергія тиску; $u^2/2g$ – питома кінетична енергія.

Сума потенціальних та кінетичної енергії вдовж елементарної струминки нев'язкої рідини є сталою величиною.

Рівняння Бернуллі для потоку в'язкої рідини

Рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини аналогічне рівнянню для елементарної струминки ідеальної рідини, але завдяки в'язкості реальної рідини, енергія потоку не лишається постійною, а зменшується за напрямком руху. Тому в рівняння Бернуллі для потоку в'язкої рідини вводиться додатковий член h_w , що враховує втрати енергії (напору)

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w \quad (6.2)$$

В рівнянні Бернуллі для потоку реальної рідини використовується середня швидкість V руху потоку рідини, а також враховується нерівномірність розподілення швидкостей по живому перерізу, введенням коефіцієнта кінетичної енергії (коефіцієнта Кориюліса) α , який має значення $1,05 \dots 1,1$. Коефіцієнт Кориюліса є відношенням дійсної кінетичної енергії потоку в даному живому перерізі до кінетичної енергії, визначеною за середньою швидкістю потоку.

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w \quad (6.3)$$

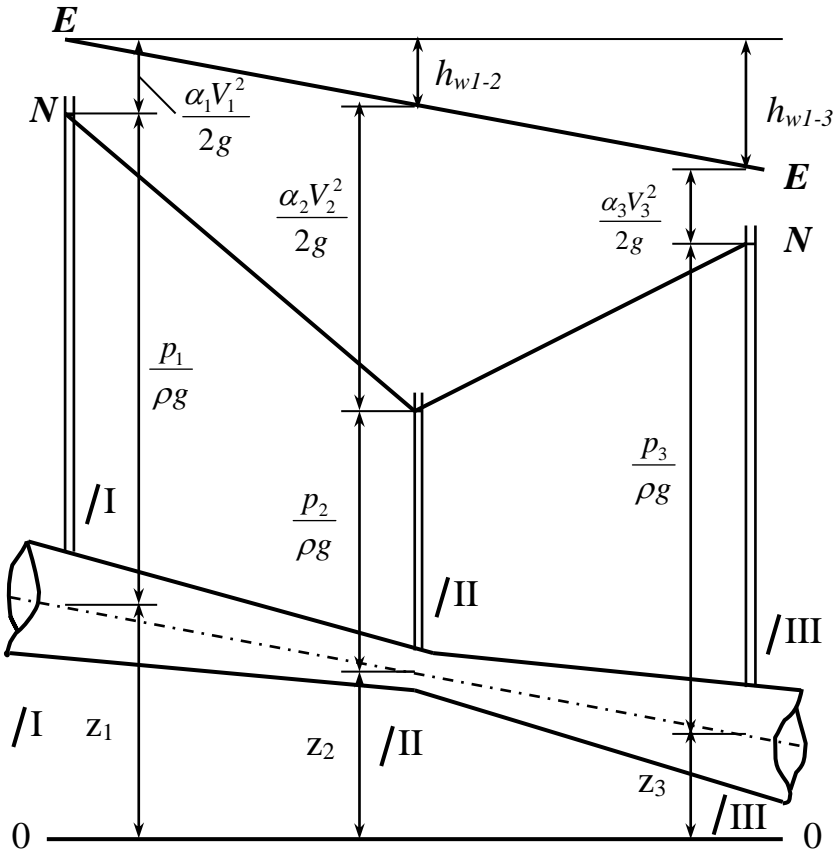


Рисунок 6.2 – Ілюстрація рівняння Бернуллі для потоку рідини

Напірна лінія $E-E$ (рис. 6.2) має нахил у напрямку руху рідини, що пояснюється втратами напору на тертя. Падіння цієї лінії в напрямі руху потоку характеризується *гідравлічним нахилом*

$$I = \frac{h_w}{l} = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} \right)}{l}, \quad (6.4)$$

де l – відстань між перерізами.

Лінія п'єзометричного напору $N-N$ будується за показаннями п'єзометрів, показує зміну п'єзометричного напору по довжині потоку і характеризується п'єзометричним нахилом

$$I_n = \frac{\left(z_1 + \frac{p_1}{\rho g} \right) - \left(z_2 + \frac{p_2}{\rho g} \right)}{l}. \quad (6.5)$$

П'єзометричний нахил може бути як додатнім так і від'ємним, гідравлічний нахил – тільки додатнім. При русі рідини від перерізу I-I до перерізу II-II діаметр труби зменшується, а середня швидкість руху рідини збільшується і відповідно збільшується швидкісний напір за рахунок зменшення п'єзометричного напору. Таким чином відбувається перетворення потенціальної енергії тиску в кінетичну енергію руху рідини. При русі рідини від перерізу II-II до перерізу III-III діаметр труби збільшується, середня швидкість руху рідини зменшується і відповідно зменшується швидкісний напір але збільшується п'єзометричний напір. Таким чином на цій ділянці відбувається перетворення кінетичної енергії в потенціальну.

Питання для самоперевірки.

16. Як виводиться рівняння Бернуллі для елементарної струминки ідеальної рідини?
17. Яка геометрична інтерпретація рівняння Бернуллі?
18. Яка енергетична інтерпретація рівняння Бернуллі?
19. Чим відрізняється рівняння Бернуллі для потоку реальної рідини від рівняння Бернуллі для елементарної струминки ідеальної рідини?
20. Яке числове значення коефіцієнта Коріоліса і що він враховує?
21. Що таке гідравлічний нахил?
22. Що таке п'єзометричний нахил?

Експериментальне дослідження р. Бернуллі

<https://www.youtube.com/watch?v=8CF7FwyKGE4>

Bernoulli's principle | Air | Physics

<https://www.youtube.com/watch?v=3fWSTXDQ8eE>

<https://www.instructables.com/id/Bernoullis-Principle/>

Заправочний пістолет

<https://sfw.so/1149058212-kak-pistolet-na-zpravke-uznaet-cto-benzobak-polon.html>

<https://www.youtube.com/watch?v=ItAuXOFavFA>

Лекція 7

Розрахунок втрат напору в місцевих опорах

Місцеві втрати напору обумовлені різними конструктивними елементами в потоці (поворот, звуження або розширення, кран, засувка і т.п.) і визначаються за формулою Вейсбаха

$$h_w = \zeta_1 \frac{V_1^2}{2g} = \zeta_2 \frac{V_2^2}{2g}, \quad (7.1)$$

де ζ_1, ζ_2 – коефіцієнти місцевого опору віднесені відповідно до швидкостей перед та за місцевим опором.

При раптовому розширенні потоку в трубопроводі від площі ω_1 до площі ω_2 в трубі більшого діаметра утворюється транзитний потік та кругова водоворотна зона (рис. 7.1).

Втрати напору при *раптовому розширенні* можуть бути розрахованими як через швидкість до розширення, так і через швидкість після розширення

$$h_{p.p.} = \left(1 - \frac{\omega_1}{\omega_2}\right)^2 \frac{V_1^2}{2g}, \quad (7.2)$$

$$h_{p.p.} = \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} - 1\right)^2 \frac{V_2^2}{2g}. \quad (7.3)$$

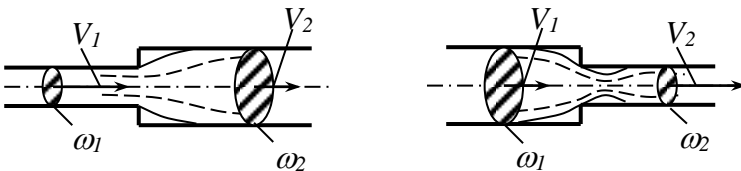


Рисунок 7.1 – Раптове розширення Рисунок 7.2 – Раптове звуження

При раптовому звуженні трубопроводу відбувається стиснення потоку і утворення водоворотних зон (рис. 7.2). Втрати напору при *раптовому звуженні* можуть розраховуватись за експериментальною формулою

$$h_{p.з.} = 0,5 \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right) \frac{V_2^2}{2g}. \quad (7.4)$$

При *плавному повороті* труби (рис. 7.3) коефіцієнт місцевого опору $\zeta_{пл.п.}$ залежить від співвідношення між радіусом труби r та радіусом повороту R :

$2r/R$	0,2	0,4	0,6	0,8	1	1,2	1,4	1,6	1,8	2
$\zeta_{пл.п.}$	0,131	0,138	0,158	0,206	0,294	0,44	0,66	0,977	1,408	1,978

При *різкому повороті* труби (рис. 7.4) коефіцієнт місцевого опору $\zeta_{пов.}$ залежить від кута α :

$\alpha, ^\circ$	30	40	50	60	70	80	90
$\zeta_{пов.}$	0,2	0,3	0,4	0,55	0,7	0,9	1,1

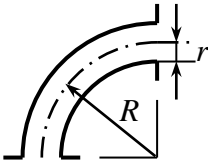


Рисунок 7.3 – Плавний поворот трубопроводу

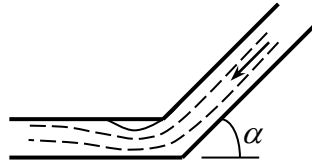


Рисунок 7.4 – Різкий поворот трубопроводу

Коефіцієнт опору засувки $\zeta_{зас.}$ (рис. 7.5) залежить від ступеня відкриття, тобто від відношення a/d

a/d	0	1/8	1/4	3/8	1/2	5/8	3/4	7/8	1
$\zeta_{зас.}$	0,05	0,07	0,26	0,81	2,06	5,52	17	97,8	∞

Коефіцієнт опору пробкового крана $\zeta_{кр}$ (рис. 7.6) залежить від кута відкривання крана

$\alpha, ^\circ$	5	10	20	30	40	50	60	65	82,5
$\zeta_{кр}$	0,05	0,29	1,56	5,47	17,3	52,6	206	486	∞

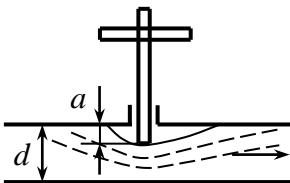


Рисунок 7.5 – Засувка

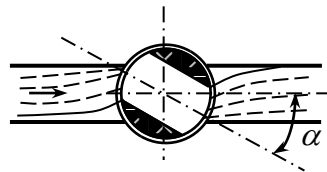


Рисунок 7.6 – Пробковий кран

Питання для самоперевірки:

1. Як розраховуються втрати напору у місцевих опорах?
2. Як розраховуються втрати напору на раптовому розширенні та раптовому звуженні?
3. Як визначаються коефіцієнти місцевих опорів поворотів?
4. Як визначаються коефіцієнти місцевих опорів засувки?
5. Як визначаються коефіцієнти місцевих опорів кранів?

Лекція 8

Розрахунок втрат напору

Втрати напору обумовлені силами внутрішнього тертя в рідині та силами тертя рідини об стінки русла. Втрати напору поділяються на втрати по довжині h_δ і втрати в місцевих опорах h_m .

$$h_w = \sum_{i=1}^n h_{\delta_i} + \sum_{j=1}^m h_{m_j}. \quad (8.1)$$

Розрахунок втрат напору по довжині та коефіцієнта гідравлічного тертя

Втрати напору по довжині визначаються за формулою Дарсі-Вейсбаха

$$h_\delta = \lambda \frac{l V^2}{d 2g}, \quad (8.2)$$

де λ – коефіцієнт гідравлічного тертя (коефіцієнт Дарсі);

l, d – відповідно довжина та діаметр трубопроводу;

V – середня швидкість руху рідини в трубі.

При ламінарному режимі руху рідини втрати напору по довжині обумовлені силами внутрішнього тертя рідини і коефіцієнт гідравлічного тертя залежить від в'язкості рідини

$$\lambda = 64 / Re. \quad (8.3)$$

При турбулентному режимі руху коефіцієнт λ залежить від числа Рейнольдса Re і шорсткості стінок трубопроводу Δ . Розрізняють відносну та еквівалентну шорсткість.

Відносною шорсткістю називається відношення середньої висоти виступів шорсткості до одного з лінійних параметрів русла (радіуса або діаметра труби чи гідравлічного радіуса), тобто $\Delta/r, \Delta/d, \Delta/R$.

Еквівалентна шорсткість Δ_e – це така рівнозерниста шорсткість при якій втрати напору дорівнюють реальним втратам напору в трубопроводі з натуральною шорсткістю.

Класифікація трубопроводів

В залежності від співвідношення втрат напору по довжині та у місцевих опорах трубопроводи діляться на короткі та довгі.

До *довгих* відносяться трубопроводи у яких визначальними є втрати по довжині, а місцеві втрати не перевищують 10-15% загальних втрат.

Короткими називаються трубопроводи у яких визначальними є втрати у місцевих опорах.

Умовно можна вважати, що якщо довжина трубопроводу більша ніж 100 м, то це довгий трубопровід.

Трубопроводи також діляться на прості та складні.

Простим вважається такий трубопровід, який складається з труб одного діаметру і не має відгалуджень. *Складний* трубопровід складається з окремих елементів простих коротких або довгих трубопроводів.

Гідралічний розрахунок короткого трубопроводу

Для розрахунку короткого трубопроводу використаємо рівняння Бернуллі для перерізів 1-1 (на вільній поверхні води в резервуарі) та 2-2 (на кінці трубопроводу) відносно площини порівняння 0-0, яка проходить через центр вихідного отвору трубопроводу (рис. 7.1):

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w, \quad (8.4)$$

де $z_1 = H + z$; $p_1 = p_{am}$; $V_1 \approx 0$;

$z_2 = 0$; $p_2 = p_{am}$.

Тоді рівняння 8.4 буде мати вид

$$H = \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + h_w. \quad (8.5)$$

Втрати напору в трубопроводі складаються з втрат напору на вході в трубу, по довжині першої ділянки, на раптовому зуженні, на крані та по довжині другої ділянки

$$h_w = \zeta_{\text{ex}} \frac{V_1^2}{2g} + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{V_1^2}{2g} + \zeta_{\text{p.з.}} \frac{V_2^2}{2g} + \zeta_{\text{кр}} \frac{V_2^2}{2g} + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \frac{V_2^2}{2g}. \quad (8.6)$$

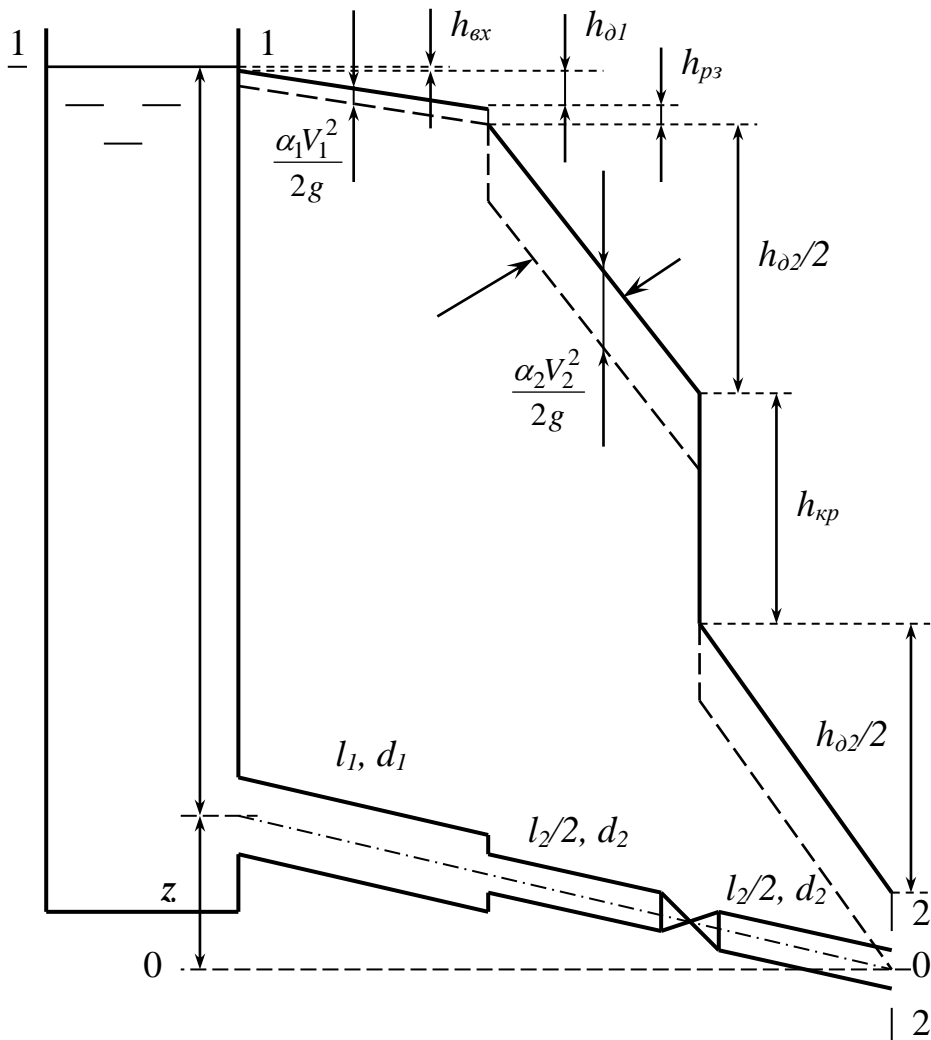


Рисунок 8.1 – Розрахункова схема короткого трубопроводу

Використавши рівняння нерозривності потоку рідини

$$Q = V_1 \omega_1 = V_2 \omega_2 \quad (8.7)$$

визначимо швидкість V_1 через V_2

$$V_1 = V_2 \frac{\omega_2}{\omega_1}. \quad (8.8)$$

Після підстановки рівняння 7.8 в рівняння 7.6, а останнього в рівняння 7.5 маємо

$$H = \frac{V_2^2}{2g} \left(\alpha_2 + \zeta_{ex} \frac{d_2^4}{d_1^4} + \lambda_1 \frac{l_1}{d_1} \frac{d_2^4}{d_1^4} + \zeta_{p.z.} + \zeta_{кр} + \lambda_2 \frac{l_2}{d_2} \right). \quad (8.9)$$

З цього рівняння при відомому напорі H та геометричних параметрах трубопроводу можна визначити швидкість V_2 , а потім витрату Q .

Якщо відома витрата Q , то спочатку визначається швидкості V_1 , V_2 , а потім напір H .

Для побудови лінії повного напору I (рис. 8.1) визначаються втрати напору в місцевих опорах та по довжині ділянок трубопроводу і ці втрати, у відповідному масштабі, послідовно відкладаються від рівня рідини в резервуарі. Лінія п'єзометричного напору II проходить паралельно лінії повного напору але нижче на величину швидкісного напору $V^2/2g$.

Розрахунок сифонного трубопроводу

Сифонний трубопровід – пристрій (рис. 8.2), який працює в умовах вакууму.

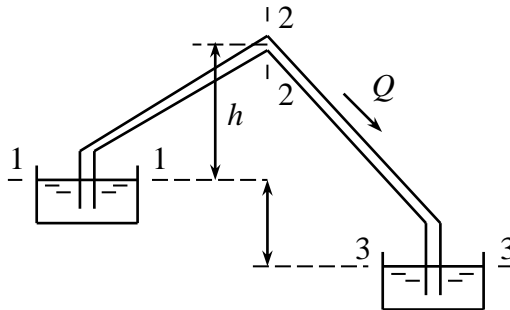


Рисунок 8.2 – Сифонний трубопровід

Для того, щоб сифон почав працювати потрібно попередньо заповнити його рідиною або створити вакуум в ньому за допомогою вакуумного насоса.

Розрахунок сифону складається з визначення витрати Q та граничної висоти підймання рідини h .

Для визначення витрати рідини через сифонний трубопровід використовується рівняння Бернуллі, яке записується для перерізів 1-1 та 3-3 відносно рівня рідини в нижньому резервуарі. Після відповідних перетворень рівняння Бернуллі витрата визначається за формулою

$$Q = \frac{1}{\sqrt{\lambda \frac{l_{1-3}}{d} + \sum \zeta}} \omega \sqrt{2gH} = \mu_c \omega \sqrt{2gH}, \quad (8.10)$$

де l_{1-3} – довжина труби між перерізами;

d – діаметр труби;

λ – коефіцієнт Дарсі;

$\sum \zeta$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів між перерізами;

ω – площа поперечного перерізу труби;

μ_c – коефіцієнт опору сифона.

Для визначення висоти підймання рідини сифонним трубопроводом використовується рівняння Бернуллі, яке записується для перерізів 1-1 та 2-2 відносно рівня рідини у верхньому резервуарі. Після відповідних перетворень рівняння Бернуллі висота підймання рідини сифоном визначається за формулою

$$h = h_{\text{вак}} - \left(\alpha + \sum \zeta + \lambda \frac{l_{1-2}}{d} \right) \frac{V_2^2}{2g}, \quad (8.11)$$

де $h_{\text{вак}}$ – вакуум у перерізі 2-2;

α – коефіцієнт Коріоліса;

l_{1-2} – довжина труби між перерізами 1-1 та 2-2;

$\sum \zeta$ – сума коефіцієнтів місцевих опорів між перерізами;

V_2 – швидкість руху рідини у перерізі 2-2.

Так як максимальне значення вакууму 10 м, то враховуючи втрати напору в сифоні, висоту підймання звичайно приймають не більше 7...8 м.

Питання для самоперевірки:

6. Чим обумовлені втрати напору?
7. Як розраховуються втрати напору по довжині?
8. Як розраховується коефіцієнт гідравлічного опору при ламінарному режимі руху рідини?
9. Що таке відносна та еквівалентна шорсткість?
10. Як класифікуються трубопроводи?
11. Який порядок розрахунку короткого трубопроводу?
12. Як будуються лінії п'єзометричного та повного напорів?
13. Як розраховується витрата сифонного трубопроводу?
14. Як розраховується висота підймання рідини сифонним трубопроводом?

Лекція 9

Витікання рідини через малий отвір у тонкій стінці

Отвір вважається *малим*, коли його діаметр або вертикальний розмір (для отворів форма яких відрізняється від круглої) менший 0,1 діючого напору H_0 ($d < 0,1 H_0$). Отвором у тонкій стінці називається отвір з гострими краями, зроблений у стінці товщина якої не більше $3d$ ($e < 3d$). Струмина, що витікає з отвору, внаслідок дії доцентрових сил стискається по всьому периметру, це спричиняє утворенню стисненого перерізу струмини $c-c$, розміщеного приблизно на відстані $0,5d$ від змоченої поверхні стінки (рис. 9.1).

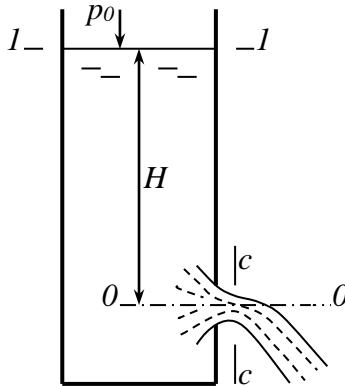


Рисунок 9.1 – Витікання рідини через малий отвір в тонкій стінці

Для визначення швидкості витікання рідини з отвору при сталому напорі використовується рівняння Бернуллі, для перерізів $1-1$ (на вільній поверхні рідини) та $c-c$ відносно площини порівняння $0-0$, що проходить через центр отвору (рис. 9.1).

$$z_1 + \frac{p_0}{\rho g} + \frac{\alpha_1 V_1^2}{2g} = z_c + \frac{p_c}{\rho g} + \frac{\alpha_c V_c^2}{2g} + h_w \quad (9.1)$$

Для перерізу $1-1$ $z_1 = H$ і $V_1 = V_0$.

Для перерізу $c-c$ $z_c = 0$, $p_c = p_{am}$ і $h_w = \zeta_{oms} \frac{V_c^2}{2g}$.

Підставивши ці значення у рівняння 9.1 отримаємо рівняння Бернуллі у такому виді

$$H + \frac{p_o - p_{am}}{\rho g} + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = \frac{\alpha_c V_c^2}{2g} + \zeta_{oms} \frac{V_c^2}{2g}. \quad (9.2)$$

Позначимо вираз $H + \frac{p_o - p_{am}}{\rho g} + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g}$ через H_0 ,

де H_0 – діючий напір.

Тоді рівняння Бернуллі матиме вид

$$H_0 = (\alpha_c + \zeta_{oms}) \frac{V_c^2}{2g}. \quad (9.3)$$

З рівняння (9.3) визначимо швидкість V_c

$$V_c = \frac{1}{\sqrt{\alpha_c + \zeta_{oms}}} \sqrt{2gH_0} = \varphi \sqrt{2gH_0}, \quad (9.4)$$

де φ – коефіцієнт швидкості.

Витрата рідини через отвір визначається за формулою

$$Q = \omega_c V_c. \quad (9.5)$$

Відношення площі стисненого перерізу струмини ω_c до площі отвору називається *коефіцієнтом стиснення*

$$\varepsilon = \omega_c / \omega. \quad (9.6)$$

Тоді витрата буде визначатися за формулою

$$Q = \omega \varepsilon V_c = \omega \varepsilon \varphi \sqrt{2gH_0} = \mu \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (9.7)$$

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

Якщо $p_0 = p_{am}$ і знехтувати швидкісним напором $\alpha_0 V_0^2 / 2g$ на вільній поверхні, то $H_0 \approx H$ і

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH}. \quad (9.8)$$

При витіканні води з малого отвору в тонкій стінці коефіцієнти витрати, стиснення та швидкості мають такі значення: $\mu = 0,6...0,62$; $\varepsilon = 0,62...0,64$; $\varphi = 0,97$.

При витіканні рідини через отвори спостерігається явище, яке називається *інверсією* струмини, тобто зміною форми поперечного перерізу струмини відносно форми отвору (рис. 9.2). Інверсія обумовлена різними швидкостями витікання окремих струминок та силами поверхневого натягу.

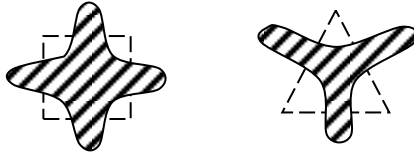


Рисунок 9.2 – Інверсія струмин рідини

Витікання під рівень

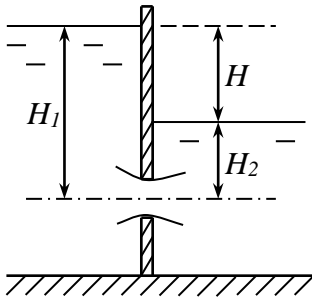


Рисунок 9.3 – Витікання рідини через затоплений отвір

Якщо тиск на вільних поверхнях рідини однаковий, то витрата рідини через затоплений отвір (рис. 9.3) визначається за формулою

$$Q = \mu \omega \sqrt{2gH} \quad (9.9)$$

Значення μ для затопленого отвору майже не відрізняються від значень μ при витіканні рідини в атмосферу.

Витікання рідини через насадки

Насадкою називається коротка трубка довжиною $l=(3\dots 5)d$, щільно приєднана до отвору в тонкій стінці, де d – внутрішній діаметр трубки. Якщо $l < 3d$, то струмина на виході насадки не заповнює весь переріз і насадка працює як отвір. Якщо $l > 5d$, то це призводить до додаткових втрат напору по довжині, а відповідно до зменшення витрати рідини.

На практиці використовуються такі типи насадок (рис. 9.4):

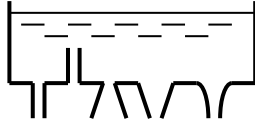


Рисунок 9.4 – Типи насадок

- циліндричні (зовнішні та внутрішні);
- конічні (розбіжні та збіжні);
- коноїдальні.

Розрахункові формули для швидкості та витрат при витіканні через насадки можливо отримати за допомогою рівняння Бернуллі складеного для перерізу 1-1, що співпадає з вільною поверхнею рідини, та перерізу на виході з насадки 2-2 (рис. 9.5).

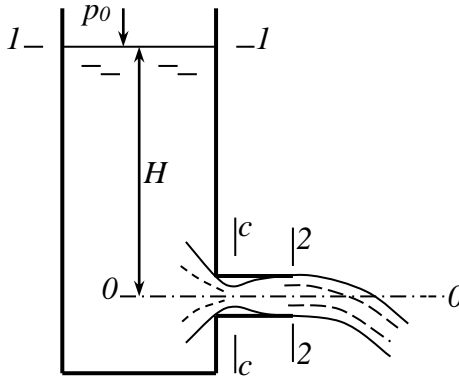


Рисунок 9.5 – Витікання рідини через насадку

$$H + \frac{P_o}{\rho g} + \frac{\alpha_0 V_0^2}{2g} = 0 + \frac{P_{am}}{\rho g} + \frac{\alpha_2 V_2^2}{2g} + \zeta_n \frac{V_2^2}{2g}. \quad (9.10)$$

Тоді середню швидкість на виході з насадки можна визначити за формулою

$$V_2 = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_n}} \sqrt{2gH_o} = \varphi_n \sqrt{2gH_o}, \quad (9.11)$$

де $\varphi_n = \frac{1}{\sqrt{\alpha + \zeta_{ex} + \lambda \frac{l}{d}}}$ – коефіцієнт швидкості насадки.

Оскільки насадка на виході повністю заповнена рідиною, то коефіцієнт стиснення $\varepsilon = 1$, тоді витрата при витіканні через насадку буде визначатися за формулою

$$Q = \omega V_2 = \mu_n \omega \sqrt{2gH_0}, \quad (9.12)$$

де $\mu_n = \varepsilon \varphi_n = \varphi_n$ – коефіцієнт витрати насадки.

При витіканні через насадку рідина утворює стиснений переріз всередині насадки. Навколо стисненого перерізу утворюється водоворотна зона, в якій тиск менший від атмосферного (тобто утворюється вакуум), завдяки чому відбувається підсмоктування рідини з резервуару і витрата збільшується у порівнянні з витратою через отвір такого ж перерізу.

Так для зовнішньої циліндричної насадки (насадки Вентурі) коефіцієнт витрати $\mu_n = 0,82$. Таким чином витрата через насадку Вентурі буде на 32% більшою ніж витрата через отвір

$$\frac{Q_n}{Q} = \frac{\mu_n}{\mu} = \frac{0,82}{0,62} = 1,32. \quad (9.13)$$

Значення вакууму в насадці залежить від діючого напору. Так для зовнішньої циліндричної насадки при витіканні рідин в атмосферу вакуум дорівнює

$$h_{вак} \approx 0,74H_0. \quad (9.14)$$

Щоб забезпечити сталу роботу насадки, потрібно щоб значення $h_{вак}$ було не більшим 8 м, тому граничне значення напору

$$H_{zp} \approx 10,8 \text{ м}.$$

При напорі більшому H_{zp} струмінь відірветься від внутрішньої стінки насадки і витрата зменшиться.

Внутрішня циліндрична насадка характеризується такими коефіцієнтами $\mu = \varphi = 0,71$.

Відповідно витрата через заповнену внутрішню насадку менше від витрати через зовнішню циліндричну насадку на

13,5%, але більша від витрати, при витіканні з малого отвору в тонкій стінці, приблизно на 14%.

Конічно-збіжна насадка має максимальне значення коефіцієнта витрати ($\mu = 0,95$; $\varphi = 0,96$) при куті конусності $\theta \approx 13^\circ$. Коефіцієнти витрати та швидкості цієї насадки не дорівнюють один одному за рахунок додаткового стиснення струменю на виході. Такі насадки використовуються у тих випадках, коли необхідно отримати струмину зі значною кінетичною енергією, наприклад в гідромоніторах, брандспойтах, дощувальних установках.

Конічно-розбіжна насадка має максимальну витрату струмینی ($\mu > 1$, $h_{\text{вак}} = 1,5H_0$) але з малою кінетичною енергією і використовується в вогнегасниках, відсмоктувальних трубах гідротурбін, ежекторах. Оптимальний кут конусності $\alpha = 5 \dots 7^\circ$.

Коноїдальна насадка має внутрішню поверхню близьку до форми струменя, що витікає з отвору, тому гідравлічний опір такої насадки малий, а $\mu = \varphi = 0,96 \dots 0,98$. Такі насадки використовуються в лабораторній практиці як тарувальні.

Витікання рідини при змінному напорі

Витікання рідини при змінному напорі є прикладом неусталеного руху рідини, коли всі параметри витікання залежать від часу. Вид формул для розрахунку зміни напорів в резервуарі залежить від форми резервуару. Якщо площа перерізу резервуара в межах зміни рівнів рідини в ньому незмінна по вертикалі, то такий резервуар називається *призматичним*.

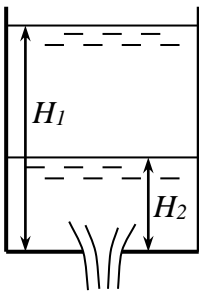


Рисунок 9.6 – Витікання без притоку

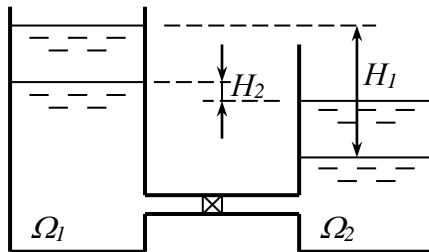


Рисунок 9.7 – Витікання при змінних рівнях

Час зміни рівнів води у призматичному резервуарі, без притоку води (рис. 9.6), визначається за формулою

$$t = \frac{2\Omega}{\mu\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} \right), \quad (9.15)$$

де Ω – площа поперечного перерізу резервуару;

ω – площа отвору.

Якщо $H_2=0$, тобто випадок спорожнення резервуару, час спорожнення визначається за формулою

$$T = \frac{2\Omega\sqrt{H_1}}{\mu\omega\sqrt{2g}} = \frac{2\Omega H_1}{\mu\omega\sqrt{2gH_1}} = \frac{2W}{Q_1}, \quad (9.16)$$

де W – початковий об'єм рідини в резервуарі;

Q_1 – витрата рідини при напорі H_1 .

Порівнюючи T та t , за який об'єм W витече з резервуару при постійному напорі H_1

$$t = \frac{W}{Q_1} = \frac{W}{\mu\omega\sqrt{2gH_1}} \quad (9.17)$$

маємо, що $T=2t$, тобто час спорожнення призматичних резервуарів при змінному напорі відбувається в два рази довше ніж при витіканні такого ж об'єму рідини при постійному напорі.

При витіканні рідини при обох змінних рівнях (рис. 9.7) час зміни рівнів визначається за формулою

$$t = \frac{2\Omega_1\Omega_2}{(\Omega_1 + \Omega_2)\mu_{\text{сист}}\omega\sqrt{2g}} \left(\sqrt{H_1} - \sqrt{H_2} \right), \quad (9.18)$$

де $\mu_{\text{сист}}$ – коефіцієнт витрат короткого трубопроводу (системи), що враховує коефіцієнти втрат по довжині труби та місцеві втрати напору;

Ω_1 та Ω_2 – площі поперечного перерізу резервуарів.

Час вирівнювання рівнів в резервуарах визначається за формулою

$$T = \frac{2\Omega_1\Omega_2\sqrt{H_1}}{(\Omega_1 + \Omega_2)\mu_{\text{сист}}\omega\sqrt{2g}} = \frac{2\Omega_1\Omega_2}{(\Omega_1 + \Omega_2)} \frac{\sqrt{H_1}}{\mu_{\text{сист}}\omega\sqrt{2g}}. \quad (9.19)$$

При витіканні рідини з непризматичного резервуару (рис. 9.10), площа дзеркала рідини якого визначається за формулою

$$\Omega = 2l\sqrt{H(2r - H)}, \quad (9.20)$$

а час повного її спорожнення

$$T = \frac{8lr\sqrt{r}}{3\omega\omega\sqrt{g}}, \quad (9.21)$$

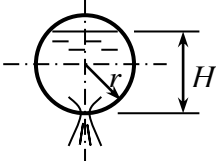


Рисунок 9.10 – Витікання рідини з цистерни

де l – довжина цистерни; r – радіус цистерни; ω – площа отвору.

Питання для самоконтролю.

1. Який отвір вважається малим?
2. Як виводяться формули для розрахунку швидкості витікання та витрати рідини через отвір в тонкій стінці?
3. Які числові значення коефіцієнтів витрати, стиснення та швидкості при витіканні рідини через малий отвір в тонкій стінці?
4. Що таке інверсія струмини та які причини її виникнення?
5. За якою формулою розраховується витрата рідини через затоплений отвір?
6. Що таке насадка та які бувають типи насадок?
7. За якою формулою розраховується витрата рідини через насадки?
8. Чим обумовлюється збільшення витрати рідини через насадки?
9. Яке максимальне значення вакууму в насадках?
10. Які числові значення коефіцієнтів витрати для різних типів насадок?
11. Як розраховується час зміни рівнів води в призматичному резервуарі без притоку рідини?
12. Як розраховується час спорожнення призматичного резервуару?
13. Як розраховується час зміни рівнів рідини в сполучених резервуарах?
14. Від яких параметрів залежить час спорожнення цистерни?

Лекція 10

Гемодинаміка

Гемодинаміка – розділ біомеханіки, який вивчає закони руху крові в судинах.

Рідкі середовища складають понад 90% організму людини. Переміщення рідин в організмі забезпечує обмін речовин та постачання до клітин кисню.

У якості моделі серцево-судинної системи розглядають замкнуту систему, яка складається з безлічі розгалужених трубок з еластичними стінками (рис. 10.1), рух рідини в якій відбувається під дією насоса у вигляді гумової груші. При стисненні гумової груші деяка кількість рідини надходить в трубку. Стінки трубки, завдяки еластичності розтягуються і трубка вміщує надлишок рідини. Потім стінки трубки поступово скорочуються і проганяють надлишок рідини в наступну ланку системи, стінки якого також спочатку розтягуються і трубка вміщує надлишок рідини.

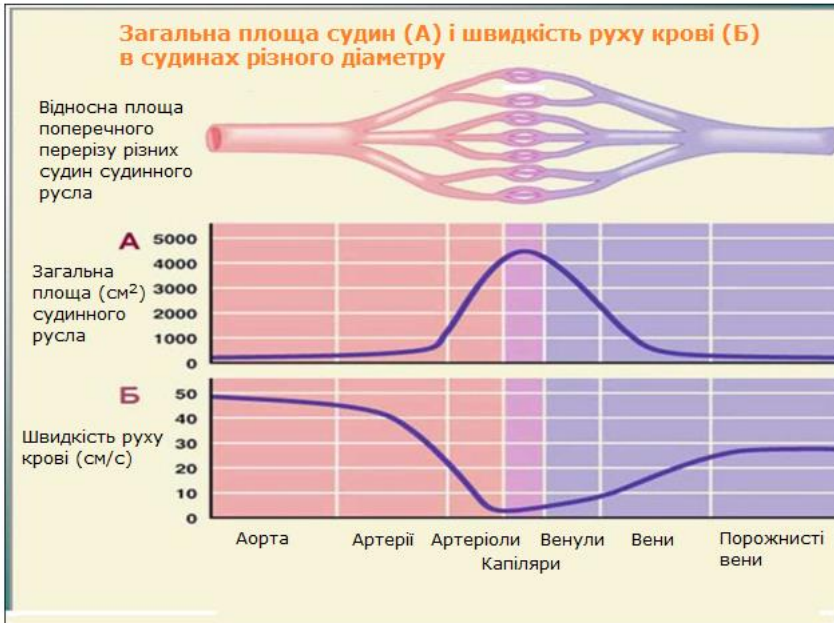


Рисунок 10.1 – Площі судин та швидкості руху крові у них

По мірі розгалуження загальний перетин трубок зростає і швидкість руху рідини зменшується. Однак внаслідок того, що розгалуження складається з безлічі трубок, втрати на внутрішнє тертя в пристінкових шарах значні і загальний опір руху рідини в найбільш розгалуженій частині сильно зростає. Аналогічна умова має місце в судинній системі.

В кінці системи надлишок рідини збирається в іншій трубці і рухаючись назад в насос, викликає його розширення.

АРТЕРІЇ (від грец. *aer* [аер] – повітря; *tereo* [терео] – містити) – кровоносні судини, по яких кров рухається від серця до органів і тканин (рис. 10.2).

ВЕНИ (від лат. *vena* [вена] – судина, жила) – кровоносні судини, по яких кров рухається від органів і тканин до серця (рис. 10.2).

КАПІЛЯРИ (від лат. *capillaris* [капіляріс] – волосяний) – найдрібніші кровоносні судини в тканинах та органах.

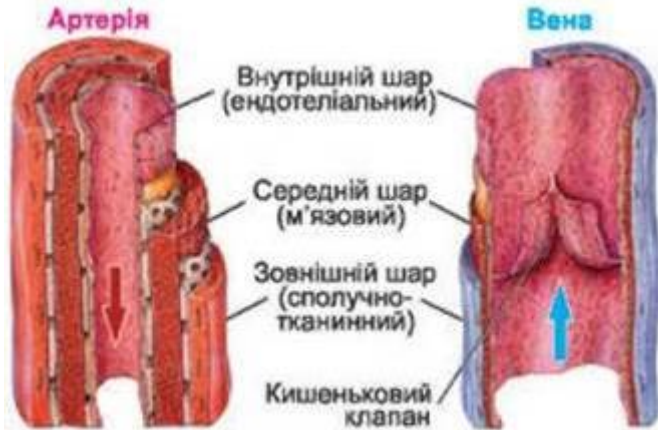


Рисунок 10.2 – Будова кровоносних судин

На відміну від артеріальних стінок, стінки вен містять мало м'язових волокон, тому менш пружні, але більш еластичні. Крім того, вени (за винятком порожнистих) мають кишенькові клапани, що перешкоджають зворотному рухові крові.

У людини, як і в наземних хордових, кров рухається по двох колах кровообігу: великому і малому.

Великі судини є елементами узгодження між серцем і дрібними судинами. При цьому аорта і артерії виконують роль провідників, які підводять кров до різних частин організму. Венами кров повертається до серця.

Початковий тиск, необхідний для переміщення крові по всій судинній системі, створюється роботою серця. В цьому відношенні серце являє собою ритмічно діючий насос, у якого робоча фаза (скорочення м'язів – систола) чергується з холостою фазою (розслаблення м'язи – діастола).

Систола (від *грец.* – стискання, скорочення, зменшення) – скорочення шлуночків і передсердь під час серцевого циклу. При цьому відбувається викидання крові в аорту з лівого шлуночка та легеневу артерію – з правого (рис. 10.3).

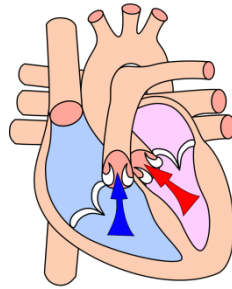


Рисунок 10.3 – Стан серця у фазі систоли

При кожному скороченні лівого шлуночка серця в аорту, вже заповнену кров'ю під відповідним тиском, виштовхується об'єм крові в середньому 60-70 мл. Потім клапани закриваються, тобто додатковий обсяг крові підвищує тиск в ній і викликає розтягнення стінок, збільшуючи обсяг судини. Цей тиск в аорті називається систолічним. Хвиля підвищеного тиску крові швидко поширюється уздовж артеріальної частини судинної системи і викликає коливання стінок. Ці хвилі тиску називаються пульсовими хвилями, швидкість їх розповсюдження залежить від пружності і щільності судинних стінок (звичайно біля 6-8 м/с).

У період діастоли стінки аорти поступово скорочуються до вихідного стану і при цьому проштовхують об'єм крові, що надійшов, в прилеглі великі артерії. Стінка останніх в свою чергу розтягуються, потім скорочуються і проштовхують кров в наступні ланки судинної системи. В результаті потік крові прий-

має безперервний характер, швидкість руху якого складає $v = 0,3 - 0,5$ м/с.

Швидкість руху крові у судинах наведена в таблиці 10.1.

Таблиця 10.1 – Швидкість руху крові у судинах.

Судини	Діаметр, мм	Швидкість, см/с	Тиск, мм. рт. ст.
Аорта	20	50	150-50
Артерії	10-5	50-20	80-20
Артеріоли	0,1-0,5	20-1	50-20
Капіляри	0,5-0,01	0,05-0,1	20-10
Венули	0,1-0,2	0,1-1	10-5
Вени	10-30	10-20	5-0

Ньютоновські та неньютоновські рідини

Ньютоновськими рідинами називаються рідини в'язкість яких залежить тільки від їх природи та температури. Такими рідинами є однорідні рідини, вода, ртуть, гліцерин, лімфа, плазма крові, сироватка (рис. 10.4).

Неньютоновськими рідинами називаються рідини в'язкість яких залежить не тільки від їх природи речовини і температури, а також від умов руху рідини, зокрема від градієнта швидкості. Такими рідинами є наоднорідні рідини, суспензії, кров, емульсії, креми (рис. 10.4).

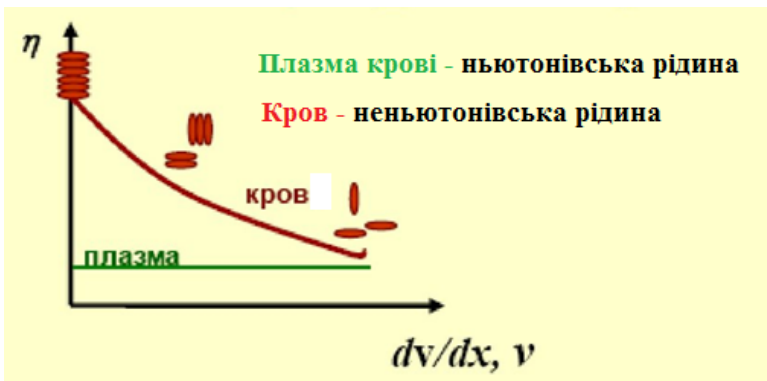


Рисунок 10.4 – Залежність в'язкості крові та її плазми від швидкості руху

Реологія та реологічні властивості крові, плазми та сироватки.

Реологія (від грец. *течу* і *вчення*) – наука про текучість і деформацію суцільних середовищ (наприклад, звичайних в'язких рідин і рідин аномальної в'язкості, суспензій, гідросумішей).

В основі реології лежать основні закони гідромеханіки та теорії пружності і пластичності (у т. ч. закон Ньютонна для в'язкого тертя у рідинах, рівняння Нав'є-Стокса для руху нестисливої в'язкої рідини, закон Гука про опір деформуванню пружного тіла та ін.).

Реологія може розглядатися як частина механіки суцільних середовищ. Основне завдання реології – встановити залежність між механічними напруженнями, що виникають у тілі, і викликаними ними деформаціями та їх змінами в часі. Основна увага звертається на складну реологічну поведінку речовини (наприклад, коли одночасно виявляються властивості в'язкості і пружності або в'язкості та пластичності і т.п.).

Реологія охоплює коло питань, що знаходяться у проміжку між питаннями, які розглядає теорія пружності ідеально пружних тіл і питаннями механіки ньютонівських рідин і до яких відносяться задачі, пов'язані з деформацією і потоками реальних матеріалів, що зустрічаються на практиці.

Кров є неньютонівською рідиною, вона являє собою суспензію формених елементів (еритроцитів, лейкоцитів і т.п.) в плазмі. В'язкість крові в нормі складає 4-5 мПа·с. В той час, як в'язкість води при температурі 20°C дорівнює 1 мПа·с. При різних патологіях значення в'язкості крові коливається у межах від 1,7 до 22,9 мПа·с. Неньютонівському характеру крові надає наявність формених елементів крові, в основному, еритроцитів.

Плазма поводить себе як лінійно-в'язка ньютонівська рідина з відносною в'язкістю 1,2. При русі в артеріальних судинах плазма вважається нестискуваною з кінематичною в'язкістю 0,04 см²/с.

Відносна в'язкість крові, плазми і сироватки крові наведена в таблиці 10.2. Відносною в'язкістю біологічної рідини називається відношення її в'язкості до в'язкості води.

Таблиця 10.2 – Відносна в'язкість крові, плазми і сироватки крові

Рідина		Відносна в'язкість, від. од.
Цільна кров	Чоловіки	4,3-5,3
	Жінки	3,9-4,9
Плазма		1,5-1,8
Сироватка крові		1,4-1,7

Реологічні властивості крові залежать від швидкості зсуву, властивостей плазми, відносного об'єму еритроцитів і їх механічних властивостей.

Швидкістю зсуву називається величина градієнту швидкості руху паралельних шарів рідини. В'язкість крові залежить від швидкості зсуву у діапазоні $0,1-120 \text{ c}^{-1}$.

При швидкості зсуву $>100 \text{ c}^{-1}$ в'язкість крові досягає значення асимптоматичної в'язкості і при подальшому збільшенні швидкості зсуву ($>200 \text{ c}^{-1}$) не змінюється (рисунок 10.5).

Одним із основних факторів, які визначають в'язкість крові, є об'ємна концентрація еритроцитів. Відношення сумарного об'єму еритроцитів до об'єму плазми крові називається гематокритом ($V_{\text{ер}}/V_{\text{пл}}$). В нормі гематокрит дорівнює $0,4-0,5$ від. од. З підвищенням гематокриту в'язкість крові збільшується (рисунок 10.6).

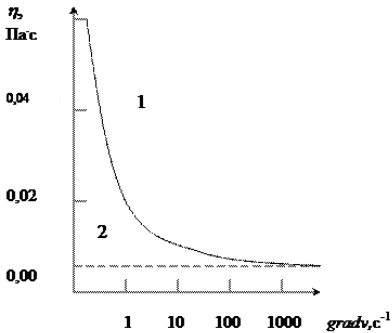


Рисунок 10.5 – Залежність в'язкості крові і ньютонівської рідини від швидкості зсуву

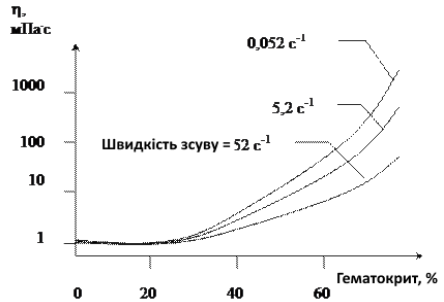


Рисунок 10.6 – Залежність в'язкості крові від показника гематокриту

Питання для самоконтролю.

1. Що вивчає гемодинаміка?
2. Що таке артерія?
3. Що таке вена?
4. Що таке капіляри?
5. Яке призначення кишенькових клапанів у венах?
6. Що таке систола?
7. Що таке діастола?
8. Який об'єм крові виштовхується при скороченні лівого шлуночка серця?
9. Яка швидкість розповсюдження хвилі тиску в судинах?
10. Який діаметр аорти та вени?
11. Яка швидкість руху крові в аортах та венах?
12. Що таке ньютонівська рідина?
13. Що таке неньютонівська рідина?
14. Що вивчає реологія?
15. Яка в'язкість крові в нормі?
16. Яке значення в'язкості крові може бути при паталогіях?
17. У кого відносна в'язкість більша, у чоловіків чи жінок?
18. Від чого залежить в'язкість крові?
19. Що таке гемокрит?
20. Як змінюється в'язкість крові при підвищенні гемокриту?

Лекція 11

Фактори, що впливають на в'язкість крові в організмі

В'язкість крові залежить від режиму течії, чим повільніше рухається кров, тим більша в'язкість.

При малих швидкостях зсуву еритроцити утворюють «монетні стовпчики» (рис. 11.1.). Це визначає високу в'язкість крові, яка у цьому випадку не може розглядатися як чиста рідина. При збільшенні швидкості руху крові «монетні стовпчики» руйнуються і в'язкість крові зменшується, наближаючись поступово до деякої межі, а при зупинці руху вони швидко (за 1 с) збираються.



Рисунок 11.1 – Розміщення еритроцитів в крові в залежності від швидкості течії

Особливості руху крові у великих та малих судинах

При значних швидкостях зсуву в'язкість крові визначається концентрацією еритроцитів та їх фізичними властивостями, наприклад, у великих артеріях, кров може розглядатись як ньютонівська рідина.

У кровоносних судинах відбувається орієнтація і агрегація еритроцитів в монетні стовпчики, а в капілярах деформація еритроцитів. Умови утворення агрегатів у великих і дрібних судинах різні. Це пов'язано із співвідношенням розмірів судини, еритроцита ($d_{ep} \approx 8$ мкм) і агрегату ($d_{agr} = 10 d_{ep}$) (таблиця 11.1).

Таблиця 11.1 – Особливості структури потоку крові в судинах

Судини	Співвідношення розмірів об'єктів	Особливості структури потоку рідини
Великі судини (аорти, артерії)	$d_{суд} > d_{agr}$ $d_{суд} \gg d_{ep}$	Гradient швидкості незначний. Еритроцити збираються в агрегати у вигляді монетних стовпчиків. В'язкість крові = 0,005 Па·с.
Дрібні судини (дрібні артерії, артеріоли)	$d_{суд} \approx d_{agr}$ $d_{суд} = (5-20) d_{ep}$	Gradient швидкості збільшується. Агрегати розпадаються на окремі еритроцити. В'язкість зменшується.
Капіляри	$d_{суд} < d_{ep}$	Еритроцити деформуючись проходять через капіляри навіть діаметром 3 мкм

Щільність еритроцитів зростає при переміщенні до осі кровоносної судини, що призводить до сплюснення профілю швидкості, що є параболічним у разі ньютонівської рідини. У прилеглих до стінки судини областях кров є менш щільною. Цей збіднений еритроцитами шар крові (≈ 1 мкм) є найменш в'язким ($\eta_{vid} = 2$, замість 3,3). Кров тут рухається швидше. У дрібних судинах товщина пристінного шару становить істотну частину поперечного перерізу, і, отже, гематокрит (об'єм червоних кров'яних клітин в крові) в капілярах помітно менший, ніж у великих судинах.

При мікроциркуляції еритроцити і плазма розглядаються окремо. Капіляри – найдрібніші судини діаметром від 5 до 10 мкм. При русі крові в капілярах еритроцити можуть проходити тільки по одному, а в більш вузьких вони навіть деформуються.

Еритроцити протискуються через капіляри, діаметр яких менше діаметра еритроцита (діскоцитів). Еритроцити це мікроскопічні двоввігнуті диски діаметром близько 8 мкм, товщиною в центрі близько 1,4 і на периферії – близько 2 мкм. В 1 см³ крові знаходиться близько 5 мільйонів еритроцитів. Основний вміст еритроцита це білок, який переносить кисень – гемоглобін. Мембрана еритроцита (товщина 7-10 нм) з внутрішньої сторони укріплена цитоскелетом. Наявність цитоскелета робить еритроцит жорстким. Місця угнутості на еритроцитарній мембрані не прив'язані до конкретних місць мембрани, а можуть переміщатися. Еластичність мембрани еритроцита важлива для течії крові по капілярах. Еластичність еритроцитарної мембрани зменшується зі старінням еритроцита, а також при деяких патологіях.

Біореологія

Біореологія – наука про деформації та текучість рідних середовищ організму.

При русі рідин окремі її шари взаємодіють між собою із силами, які направлені по дотичній до шарів. Це явище називається в'язкістю.

В'язкість залежить від стану та молекулярних властивостей рідини (температури, густини середовища). В'язкість деяких речовин наведена в таблиці 11.2.

Таблиця 11.2 – В'язкість речовин

Речовина	Повітря	Вода		Кров (норма)	Плазма крові	Кров (діабет)	Кров (туберкульоз)
Температура, °С	20	0	20	37	37	37	37
В'язкість, мПа·с	$1,2 \cdot 10^{-2}$	1,8	1	~ 4	~ 1,5	~ 23	~ 1

В'язкість крові (або мокроти) – діагностичні критерії при виявленні патології.

В капілярах dv зменшується і динамічна в'язкість η збільшується ($\eta = 800$ мПа·с). В артеріях dv збільшується і динамічна в'язкість η зменшується ($\eta = 4-5$ мПа·с).

Прилади для вимірювання в'язкості рідин

Прилади для вимірювання в'язкості рідини називаються віскозиметрами. В залежності від методу вимірювання в'язкості використовують такі типи віскозиметрів.

Віскозиметр на основі метода Стокса (метод кульки, що падає).

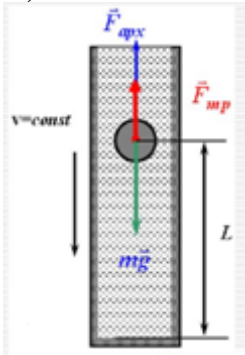


Рисунок 11.2 – Віскозиметр на основі метода Стокса

Для дослідження використовується довгий циліндр (рис. 11.2), заповнений рідиною густиною ρ_p , в'язкість якої необхідно визначити. В рідині падає кулька радіусом r , масою m та густиною ρ .

Рух кульки залежить від 3 сил, які діють на неї:

- сила тяжіння $F_m = mg = \rho g V_\kappa = \rho g (4\pi r^3/3)$;
- сила Архімеда $F_a = \rho_p V_\kappa g = \rho_p g (4\pi r^3/3)$;
- сила тертя $F_{тп} = 6\pi\eta r v$.

У відповідності із законом Стокса сила опору руху кульки (сила тертя) зменшує швидкість v руху кульки і через певний час після початку руху кульки в рідині швидкість стає постійною ($v=const$).

Кидаючи у циліндр кульку відмічають час проходження відстані L . Визначивши швидкість руху кульки як $v=L/t$ та замінивши радіус кульки на діаметр маємо

$$\eta = \frac{(\rho_p - \rho)gd^2t}{18L} \quad (11.1)$$

Ротаційні віскозиметри (рис. 11.3) вимірюють динамічну в'язкість рідини, яка заповнює простір між одним або двома коаксіально (на одній вісі) розміщеними тілами обертання (циліндри, диск, конус, напівсфера). При обертанні одного із тіл (двох відносно один іншого) виникає момент опору деформації рідини.

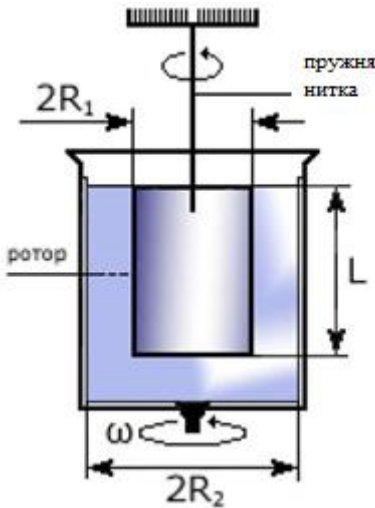


Рисунок 11.3 – Схема ротaційного вiскозиметру

Дiапазон дослідження в'язкостi вiд 1 мПа·с до сотень тисяч Па·с. Такий широкий дiапазон вимiрювань досягається за рахунок змiни швидкостi обертання валу вiд 0,01 до 1500 обертiв за хвилину, а також використання рiзних дiаметрiв тiл обертання для рiзних дiапазонiв в'язкостi.

Вiскозиметр Гесса (вiскозиметр ВК-4) (рис. 11.4) складається з 2-х капiлярiв a_1b_1 i a_2b_2 сполученi трубками 1 i 2. За допомогою гумової грушi повiтря втягується через наконечник 3, почергово завдяки трiйнику з краном 4, заповнюючи капiляр a_1b_1 i трубочку 1 до позначки 0 дистильованою водою, а капiляр a_2b_2 i трубочку 2 до позначки 0 кров'ю, яка досліджується. Пiсля чого за допомогою гумової грушi обидвi рiдини перемiщуються до тих пiр, поки кров не досягне цифри 1, вода – iншої позначки у своїй трубцi. Оскiльки умови протiкання води та кровi однаковi, то об'єми заповнення трубок 1 i 2 будуть рiзними, внаслiдок рiзних в'язкостей води та кровi.

Вiдносна в'язкiсть кровi визначається з формули $\frac{V_B}{V_K} = \frac{\eta_K}{\eta_B}$,

iснують два основних методи вимiрювання: вимiрювання моменту опору деформацiї при заданiй швидкостi обертання та вимiрювання швидкостi обертання тiла вiд прикладеного фiксованого крутного моменту. Бiльшiсть приладiв побудована на використаннi першого методу. Тiльки ротaцiйнi вiскозиметри дозволяють вимiряти дiйсну або абсолютну в'язкiсть, як ньютонiвських, так i неньютонiвських (структурованих або реологiчних) середовищ.

V_k – об'єм крові в трубці 2 від позначки 0 до позначки 1, V_v – об'єм води в трубці 1 від позначки 0 до позначки, отриманої з вимірювань.

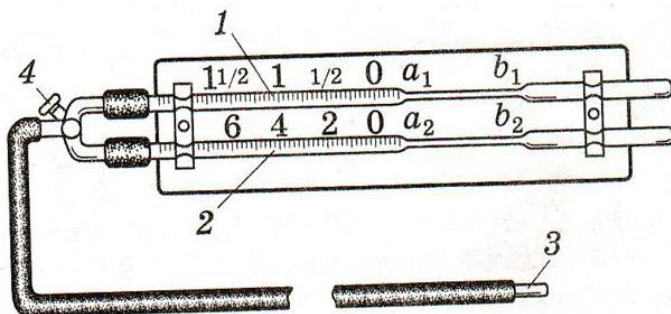
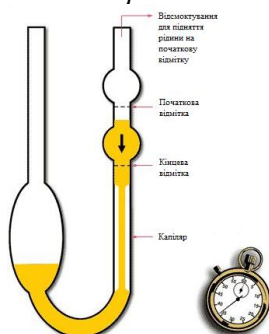


Рисунок 11.4 – Схема віскозиметра Гесса

В'язкість крові людини в нормі 4-5 мПа·с, при паталогіях значення коливається від 1,7 до 22,9 мПа·с, що позначається на швидкості осадження еритроцитів (ШОЕ, або СОЕ – *рос.*). Венозна кров має дещо більшу в'язкість ніж артеріальна. Тяжка фізична робота збільшує в'язкість крові. Деякі інфекційні захворювання збільшують в'язкість, інші, такі як черевний тиф і туберкульоз, навпаки – зменшують.

Течія крові в артеріях в нормі є ламінарною, незначна турбулентність виникає поблизу клапанів серця. При паталогіях, коли в'язкість буває меншою норми, число Рейнольдса може перевищувати критичне значення і рух стає турбулентним.

Віскозиметр Освальда



Капілярний віскозиметр Освальда (рис. 11.5) працює на основі формули Пуазейля. В'язкість визначається за результатом вимірювання часу перетікання через капіляр рідини відомої маси під дією сили тяжіння при певному перепаді тиску.

Рисунок 11.5 – Віскозиметр Освальда

Ламінарний та турбулентний рух в судинах

Ламінарним рухом є такий рух рідини при якому шари рідини не перемішуються, ковзаючи один відносно іншого (рис. 11.6). Зустрічається при повільному русі (малі швидкості), в судинах з гладкими стінками, в артеріях та венах при нормальному режимі роботи організму.

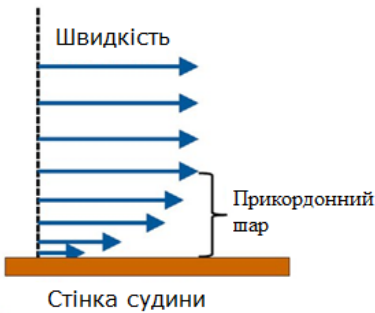


Рисунок 11.6 – Схема ламінарного руху крові в судинах

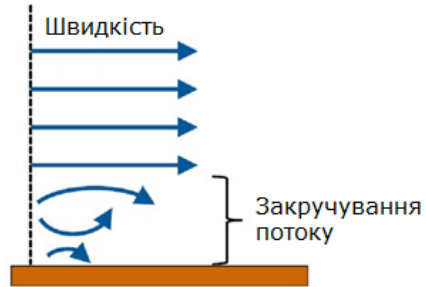


Рисунок 11.7 – Схема турбулентного руху крові в судинах

Турбулентним рухом є таким рух при якому в рідині утворюються закручування потоку (рис. 11.7) внаслідок постійної зміни швидкості руху частинок рідини і частинки рідини постійно перемішуються.

Профіль швидкостей руху крові в судинах показано на рис. 11.8.

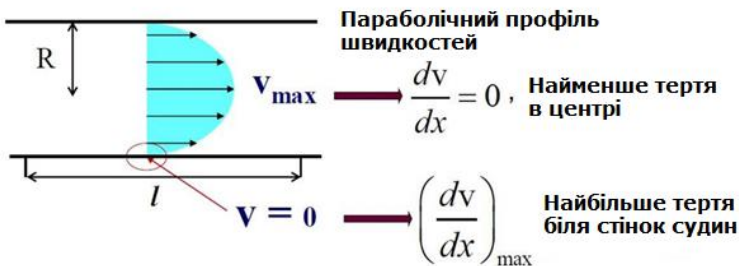


Рисунок 11.8 – Профіль швидкостей в судинах

Турбулентний режим руху зустрічається при високих швидкостях руху рідини, при нормальному режимі в аорті та в плечовій артерії при вимірюванні тиску крові.

Течія крові в артеріях в нормі є ламінарною, незначна турбулентність виникає поблизу клапанів серця. При паталогіях, коли в'язкість буває меншою норми, число Рейнольдса може перевищувати критичне значення і рух стає турбулентним.

Кровоносна системи – циліндричні судини різного діаметру, рух крові в яких відбувається внаслідок різниці тисків на кінцях судин. Рух крові при ламінарному режимі описується формулою Пуазейля

$$Q = \frac{\pi R^4 (p_1 - p_2)}{8\eta l} \quad (11.2)$$

де R – радіус труби;

η – в'язкість;

l – довжина труби;

$\Delta p = p_1 - p_2$ – різниця тисків.

Q – об'ємна швидкість (об'єм рідини, що протікає за одиницю часу через поперечний переріз труби).

Об'ємна швидкість залежить різниці тисків та від гідравлічного опору $X = \frac{8\eta l}{\pi R^4}$ при русі крові

$$Q = \frac{\pi R^4 (p_1 - p_2)}{8\eta l} = \frac{(p_1 - p_2)}{X} \quad (11.3)$$

Аналогія між електричним та гідравлічним опором дозволяє використати правило знаходження послідовно або паралельно з'єднаних судин. Загальний гідравлічний опір X послідовно та паралельно з'єднаних судин знаходиться за формулами, відповідно 11.4 і 11.5:

$$X = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_N \quad (11.4)$$

$$1/X = (1/X_1 + 1/X_2 + 1/X_3 + \dots + 1/X_N) \quad (11.5)$$

Одним із основних гемодинамічних показників є артеріальний тиск. Величина кров'яного тиску вимірюється в мм ртутного стовпчика (рис. 11.9), при цьому систолічний тиск указується першим, а діастолічний – другим, наприклад «120/80».

Клінічний метод вимірювання артеріального тиску (АТ) базується на реєстрації систолічного тиску при появі звуку, який викликається турбулентним потоком крові через здавлену артерію і діастолічного тиску при зникненні шуму, внаслідок переходу режиму течії крові від турбулентного до ламінарного.

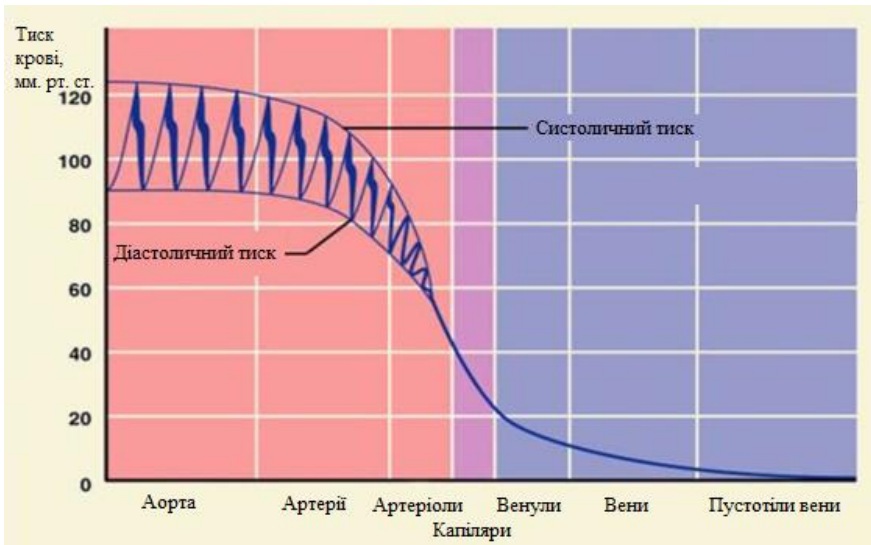


Рисунок 11.9 – Тиск крові в судинах різного діаметру

Питання для самоконтролю.

1. Яким чином в'язкість крові залежить від режиму течії?
2. Що таке «монетні стовпчики»?
3. В якій частині судини кров рухається швидше?
4. Який діаметр капілярів?
5. Яка кількість еритроцитів знаходиться в 1 см^3 крові?
6. Що вивчає біореологія?
7. Який принцип роботи віскозиметра на основі метода Стокса?
8. Який принцип роботи ротаційного віскозиметра?

9. Який принцип роботи віскозиметра Гесса?
10. Який принцип роботи віскозиметра Освальда?
11. В яких судинах рух крові відповідає турбулентному режиму?
12. Як визначається загальний гідравлічний опір судин при послідовному з'єднанні?
13. Як визначається загальний гідравлічний опір судин при паралельному з'єднанні?

Лекція 12

Фізичні функції елементів серцево-судинної системи

Джерелом енергії, яке забезпечує рух крові у судинній системі, є серце, енергія функціонування якого забезпечується АТФ (аденозинтрифосфат - універсальне джерело енергії для всіх біохімічних процесів, які протікають в живих системах), що утворюється в процесі гліколізу та окисного фосфорилування у серцевому м'язі. З енергетичної точки зору серце – система, яка виконує механічну роботу за рахунок хімічної енергії.

Робота, яку здійснює серце, витрачається на подолання сил тертя та надання крові кінетичної енергії.

Робота, яку виконує шлуночок серця при виштовхуванні крові при одному скороченні

$$A = p\Delta V, \quad (12.1)$$

де p – середній тиск в шлуночку при скороченні;

ΔV – зміна об'єму шлуночка.

Об'єм крові, що виштовхується при одному скороченні лівого шлуночка в аорту називається ударним об'ємом (V_y). В нормі ця величина у людини складає 60 мл. Середній тиск в нормі $13 \cdot 10^{-6}$ Па, середня швидкість руху крові в аорті складає 0,5 м/с. При ЧСС = 60 уд/хв за одне скорочення серце виконує роботу в 1 Дж, а потужність серця дорівнює 3,3 Вт.

Кінетична енергія крові

$$K = \frac{mv^2}{2} = \frac{\rho V_y v^2}{2} \quad (12.2)$$

Робота правого шлуночка приймається рівною 0,2 від роботи лівого, то робота всього серця при одноразовому скороченні дорівнює:

$$A = 1,2V_y \left(p + \frac{\rho v^2}{2} \right) \quad (12.3)$$

Основна функція серцево-судинної системи – забезпечення безперервного руху крові по капілярах, де відбувається обмін речовин між кров'ю та тканинами. Артеріоли – резистивні

судини, які легко змінюють свій переріз і таким чином регулюють гемодинамічні показники кровотоку в капілярах. Артеріоли – «крани» серцево-судинної системи.

Механічні властивості судин та їх деформація

Під час систоли серце виштовхує значний об'єм крові, яка не стискується. Проходження крові по судинах призводить до їх деформації – зміни розмірів та форми.

Деформації бувають пружними та пластичними. Пружна деформація – деформація, яка зникає після зникнення навантаження (тобто тіло повністю відновлює форму та розміри). При пластичній деформації тіло не відновлює форму та розміри.

Пружні деформації описуються законом Гука (закон пружних деформацій): механічне напруження ($\sigma = F/S$), що виникає в тілі при його деформації, прямо пропорційне величині його відносної деформації (ε):

$$\sigma = \varepsilon \cdot E, \quad (12.4)$$

де $\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} = (l - l_0)/l_0$ – відносна деформація;

E – модуль пружності (модуль Юнга).

Всі судини у нормі є пружними, тобто після деформації (розтягування) вони повертаються у попередній стан.

Деформаційні властивості кровоносних судин, їх міцність та зміна із віком мають велике значення для біологічного об'єкту.

Кровоносні судини складаються із трьох концентричних шарів: внутрішній – інтима, середній – середня судинна оболонка, зовнішній – зовнішня судинна оболонка. Механічні властивості кровоносних судин обумовлюються головним чином властивостями середньої судинної оболонки, яка складається із колагену, еластину та гладких м'язових волокон. Допустима деформація та модуль Юнга цих речовин наведено в таблиці 12.1.

Гладкі м'язові клітини можуть змінювати звою довжину під дією нервових або хімічних стимуляторів. Гладкі м'язи керують поведінкою кровоносних судин, оскільки в результаті їх

скорочення змінюється діаметр кровоносної судини і механічні властивості судинної стінки в цілому. Таким чином досягається оптимальне розподілення та регулювання потоку крові.

Таблиця 12.1 – Допустима деформація та модуль Юнга елементів судинної оболонки.

Елемент	Деформація, %	Модуль Юнга, МПа
Еластин	200-300	0,1 - 0,6
Колаген	до 10	10 - 100
М'язове волокно (при скороченні)	20	0,01 - 0,1
Кровоносна судина	5 - 50	0,06 - 0,7

Вміст трьох основних компонентів судинної тканини змінюється для різних частин стінки. Відношення еластину до колагену в судинах ближче до серця 2:1, але воно зменшується при віддаленні від нього і у стегновій артерії відношення дорівнює 1:2. При віддаленні від серця збільшується вміст гладких м'язових волокон, і уже в артеріолах вони є основною складовою судинної тканини.

Еластичність судин залежить від властивостей колагену (більш пружний – $E = 10-100$ МПа) та еластину (менш пружний – $E = 0,1-0,6$ МПа). Співвідношення еластин/колаген стінок судин змінюється по ходу кровоносної системи (таблиця 12.2).

Таблиця 12.2 – Співвідношення еластин/колаген стінок судин

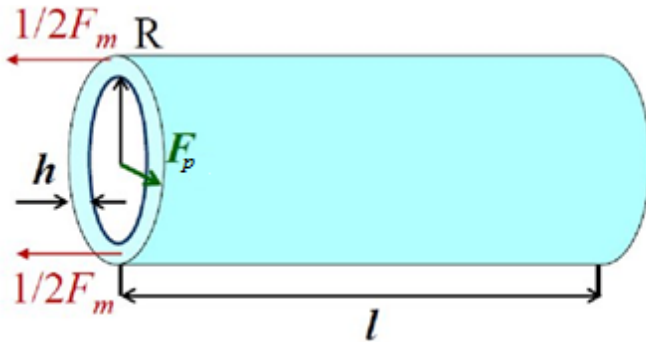
Артерія	Ел/Кол	$E_{\text{эф.}}$ (Па)
Сонна	2:1	$\sim 10^6$
Стегнова	1:2	$\sim 10^7$

З віком еластичність судин зменшується внаслідок утворення атеросклеротичних бляшок. У віці 40 років 70% судин мають склеротичні бляшки, а у 60 років – 98-100 %.

Дослідження дії сил на судини

У відповідності із законом Гука механічне напруження, що виникає у стінках судин (рис. 12.1) визначається за формулою

$$\sigma_T = \frac{F_T}{S_{\text{стінки судини}}} = \frac{F_T}{2hl} \quad (12.5)$$



R – внутрішній радіус судини; l – довжина судини; h – товщина стінки судини; F_m – тангенціальні сили (сили пружності, що розтягують судину) направлені по дотичній; F_p – сили тиску (зрівноважуючі сили).

Рисунок 12.1 – Дослідження дії сил на судини

Тоді

$$F_T = \sigma_T \cdot 2hl. \quad (12.6)$$

Сили тиску

$$F_p = p \cdot S_{\text{площа перерізу судини}} = p \cdot 2rl. \quad (12.7)$$

Прирівнюючи $F_T = F_p$ отримаємо рівняння Ламе

$$\sigma_T = \frac{p \cdot r}{h}. \quad (12.8)$$

Таким чином, напруження, що виникає в стінках кровоносних судин, залежить від величини тиск крові, внутрішнього радіусу та товщини стінок судини.

Для великих і малих судин співвідношення r/h зберігається:

$$\frac{r}{h} = \text{const}. \quad (12.9)$$

Рівняння Лапласа для визначення тонуусу судин

$$T = (p_e - p_z) \cdot r/h, \quad (12.10)$$

де p_6 і p_3 – відповідно внутрішній та зовнішній тиски;
 r – радіус судини;
 h – товщина стінок судини.

Пульсовою хвилею називається хвиля підвищеного тиску, яка виникає при викиданні крові з лівого шлуночка в період систоли і яка розповсюджується по аорті і артеріях.

Швидкість розповсюдження пульсової хвилі (ШРПХ) v – кількісний показник пружних властивостей артерії. ШРПХ визначається за формулою Моенса-Кортевеги

$$V = \sqrt{\frac{E \cdot h}{\rho_{\text{крові}} \cdot d}} \quad (12.11)$$

де E – модуль Юнга;
 h – товщина стінки судини;
 d – діаметр судини;
 $\rho_{\text{крові}}$ – густина крові.

Нормальна ШРПХ – 5-10 м/с. З віком ШРПХ збільшується.

Задачі

Задача 1

Швидкість пульсової хвилі в артеріях дорівнює 10 м/с. Чому дорівнює модуль пружності цих судин, якщо відношення радіусу просвіту до товщини стінки судини дорівнює 8, а густина крові $\rho = 1,05 \cdot 10^3 \text{ кг/м}^3$.

Рішення

Швидкість пульсової хвилі визначається за формулою

$$v = \sqrt{E \cdot h(2\rho r)}.$$

Відповідно

$$E = (2\rho v^2) r/h = (2 \cdot 1,05 \cdot 10^3 \cdot 10^2)/8 = 1,68 \cdot 10^6 \text{ Па}.$$

Відповідь: $E = 1,68 \cdot 10^6 \text{ Па}$.

Задача 2.

Як зміниться швидкість розповсюдження пульсової хвилі в судині при зміні товщини стінки судини від 0,4 до 0,5 мм?

Рішення

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\sqrt{h_2}}{\sqrt{h_1}} = \sqrt{1,25} = 1,12.$$

Відповідь: збільшиться на 12%.

Задача 3

Швидкість потоку крові у капілярах $v_1 = 30$ мм/хв., а швидкість крові у аорті $v_2 = 45$ см/с. Визначити у скільки разів площа поперечного перерізу всіх капілярів більша ніж площа аорти.

Рішення

У відповідності із рівнянням нерозривності

$$S_2/S_1 = v_1/v_2 = 45/(3/60) = 900.$$

Відповідь: 900 разів.

Задача 4

Який діаметр аорти, якщо при проходженні через неї крові масою 0,36 кг за 2 с режим руху залишається ламінарним? В'язкість крові 4 мПа·с, а критичне число Рейнольдса 2000.

Рішення

У відповідності із рівнянням

$$Re = \frac{\rho v d}{\eta}$$

$$d = (Re \cdot \eta) / (\rho \cdot v)$$

Маса крові може бути визначеною за формулою

$$m = \rho v = (\rho \pi d^2 t) / 4$$

Тобто

$$\rho v = 4m / (\pi d^2 t)$$

Тоді

$$d = (Re \cdot \eta \cdot \pi \cdot d^2 \cdot t) / 4m.$$

Відповідно

$$d = 4m / (Re \cdot \eta \cdot \pi^2 \cdot t) = (4 \cdot 0,36) / (2 \cdot 10^3 \cdot 4 \cdot 10^{-3} \cdot 3,14 \cdot 2) \approx 0,029 \text{ м.}$$

Відповідь: $d \approx 0,029 \text{ м.}$

Питання для самоконтролю.

1. Чим забезпечується енергія функціонування серця?
2. Як визначається робота, яку виконує серце при одному скороченні?
3. Що таке пружна деформація?
4. Який закон описує пружні деформації?
5. Які шари кровеносних судин?
6. Від чого залежать механічні властивості кровеносних судин?
7. Із чого складається середня судинна оболонка?
8. Від чого залежить напруження, що виникає в стінках кровеносних судин?
9. Що таке пульсова хвиля?
10. Від чого залежить швидкість розповсюдження пульсової хвилі?
11. Яке нормальне значення ШРПХ?

Лекція 13

Насоси

Насоси – гідромашини призначені для перекачування рідин, які перетворюють механічну енергію приводного двигуна у механічну енергію рухомої рідини.

Існують такі групи насосів:

1) лопатеві; 2) об'ємні; 3) насоси тертя.

До *лопатевих насосів* відносяться відцентрові, діагональні та осьові насоси, в яких рідина переміщується під дією лопаток робочого колеса.

Об'ємні насоси переміщують рідину по принципу механічного періодичного витіснення рідини робочим тілом, яке створює в процесі переміщення певний тиск на рідину.

До них відносяться:

поршневі насоси – в яких поршень або плунжер, що витісняє рідину, здійснює зворотно-поступальний рух;

роторі – з обертальним та зворотно-поступальним рухом робочого органу.

Насоси тертя поділяються на насоси з твердим та рідким робочим тілом, в яких рідина або газ переміщується за рахунок передачі їй енергії під дією сил тертя.

До них відносяться вихрові насоси, в яких робочий орган колесо з лопатками, та струменеві насоси, в яких рідина переміщується під дією потоку рідини або газу.

Відцентрові насоси

Головним робочим органом відцентрового насоса є робоче колесо, яке вільно обертається всередині корпусу.

Робоче колесо складається з двох дисків (переднього та заднього), які з'єднані в одну конструкцію за допомогою лопаток (рис. 13.1). Лопатки плавно відігнуті в сторону, протилежну на-

пряму обертання робочого колеса. Передній диск має отвір для підведення рідини, а задній – для закріплення колеса на валу. Потік рідини входить в насос у осьовому напрямі, а виходить – у радіальному.

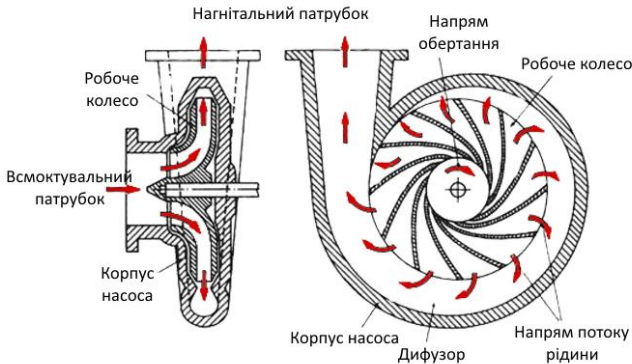


Рисунок 13.1 – Схема робочого колеса відцентрового насоса

На вході до корпусу насоса під'єднується всмоктувальний патрубок, а на виході – нагнітальний.

Всмоктувальний трубопровід та корпус насоса перед запуском повинні бути заповнені рідиною.

Принцип дії насоса полягає в тому, що при обертання робочого колеса на кожний об'єм рідини масою m , що знаходиться в міжлопатевому каналі на відстані r від осі валу, діє відцентрова сила

$$F = m\omega^2 r ,$$

де r – відстань від центра частинки до центра колеса;

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \text{ – кутлова швидкість обертання колеса;}$$

n – число обертів робочого колеса за хвилину.

Під дією цієї сили рідина викидається з робочого колеса, в результаті чого в центрі колеса утворюється вакуум, а в периферійній його частині – підвищення тиску. Рух рідини у всмоктувальному трубопроводі відбувається внаслідок різниці тисків

над вільною поверхнею рідини в нижньому резервуарі та в центральній частині колеса, де утворюється вакуум.

Відео – принцип роботи відцентрового насоса.

<https://www.youtube.com/watch?v=BaEHVpKc-1Q>

В залежності від конструкції відцентрові насоси діляться на консольні, насоси з двохстороннім входом рідини на робоче колесо та багатоступеневі секційні насоси.

До групи *консольних насосів* відносяться відцентрові одноступеневі насоси з одностороннім підведенням рідини до робочого колеса (рис. 13.2). Колесо такого насоса розміщується на кінці вала (консолі), закріпленого в підшипниках корпусу насоса.

Матеріал деталей проточної частини консольних насосів – сірий чавун. Конструктивно насоси мають наступне виконання: К – горизонтальні консольні з опорою на корпусі, з приводом від двигуна через пружну муфту (рис. 13.3); КМ – консольні моблочні (рис. 13.4). Робоче колесо встановлено на кінці подовженого вала електричного двигуна.

Ці насоси випускаються на однакові робочі параметри і при обмежених робочих площадках перевага віддається виконанню КМ, які, як правило, мають на 30% меншу довжину.

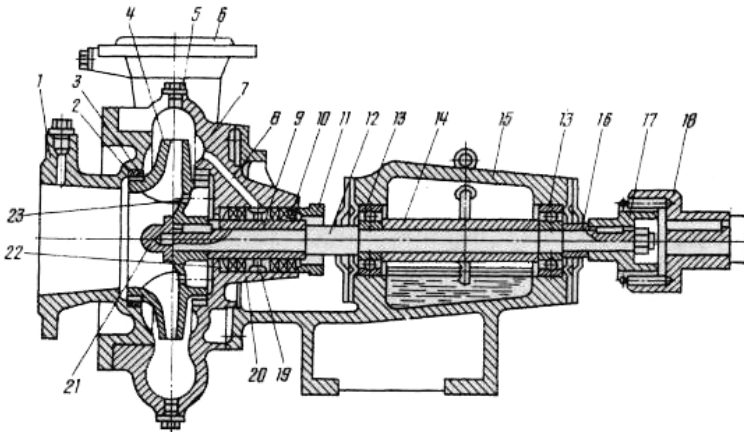


Рисунок 13.2 – Розріз відцентрового консольного насоса

1 – вхідний (всмоктувальний) патрубок; 2 – ущільнююче кільце; 3 – захисне кільце; 4 – робоче колесо; 5 – пробка отвору для під'єднання вакуумного насоса; 6 – вихідний (нагнітальний) патрубок; 7 – корпус насоса; 8 – отвір; 9 – захисна втулка; 10 – набивка сальника; 11 – кришка сальника; 12 – вал; 13 – підшипники; 14,16 – втулки; 15 – стійка опірня з ванною для оливи; 17,18 – напівмуфти; 19 – кільце гідравлічного ущільнення; 20 – корпус сальника; 21 – гайка; 22 – грандбукса; 23 – розвантажувальний отвір.

Консольні насоси призначені для перекачування води та інших нейтральних рідин з температурою від 0° до 85°С (за спеціальним замовленням до 105°С) з твердими включеннями розміром до 0,2 мм, об'ємна концентрація яких не перевищує 0,1%.



Рисунок 13.3 – Насос типу К



Рисунок 13.4 – Насос типу КМ

Найбільший допустимий манометричний тиск на вході: для насосів типу К – 6 кгс/см², для КМ – 3,5 кгс/см².

Виконання насоса за вузлом ущільнення визначається температурою води та тиском на вході в насос. Ущільнення буває одинарним та подвійним. В одинарне сальникове ущільнення затворна рідина не подається. При температурі води більшій ніж 85°С або при абсолютному тиску на вході нижче атмосферного в подвійне сальникове ущільнення подається затворна вода під тиском, що перевищує тиск рідини перед ущільненням на 0,5...1 кгс/см². Нормальна величина витікання води назовні через сальник до 3 л/год (через сальник повинна просочуватись рідина, щоб змащувати ущільнюючі поверхні).

В позначення насосів традиційно закладається багато інформації.

До 1982 року позначення консольних насосів було наступним: наприклад 4К-6, де

“4” – діаметр всмоктувального патрубка в мм, зменшений в 25 разів;

“К” – консольний;

“6” – коефіцієнт швидкохідності насоса, зменшений у 10 разів і округлений.

Коефіцієнт швидкохідності – умовне число обертів, зв’язане з геометричними розмірами робочого колеса

У 1982 році було введено параметричне позначення насосів, той же насос позначався К 90/85, де “90” – подача ($\text{м}^3/\text{год.}$), “85” – напір (м) – при максимальному ККД.

Це позначення в більшій мірі відображало споживчі властивості насоса.

З 1990 року введено позначення насосів у відповідності з міжнародними стандартами. Той же насос позначається К100-65-250аБ-СД,

де “100” – діаметр всмоктувального патрубка, мм;

“65” – діаметр напірного патрубка, мм;

“250” – номінальний діаметр робочого колеса, мм;

“а” – індекс обточки робочого колеса. Як правило більше двох обточок не буває, тому позначення вводять “а” і “б” (якщо колесо без обточки – то індексу немає).

“Б” – виконання за матеріалом проточної частини.

Попередні позначення мінялися без істотної зміни конструкції. Остання зміна потребувала значної зміни конструкції у відповідності з вимогами міжнародних стандартів.

Основною відмінністю та перевагою конструкції відцентрових насосів (з осьовим входом рідини на робоче колесо), розроблених у відповідності з міжнародним стандартом, є те, що демонтаж насосу можливо здійснити без від’єднування напірного та всмоктувального трубопроводів. При цьому трубопроводи кріпляться до корпусу, а робоче колесо виймається зі сторони електричного двигуна.

Подача консольних насосів від 2,4 до 100 л/с при напорах від 8,8 до 100 м.

Перевагою консольний насосів є простота конструкції та компактність. Недоліками є наявність осьових зусиль, які намагаються зсунути робоче колесо в сторону вхідного патрубку та необхідність заповнення робочої камери рідиною перед включенням його в роботу.

Насосна установка

Насосною установкою (рис. 13.5) називається насосний агрегат з певним обладнанням, яке монтується за певною схемою і забезпечує роботу насоса.

При розрахунках та проектуванні насосної установки найважливішими є такі задачі: визначення напору насоса H , потужності насоса N та перевірка процесу всмоктування.

Необхідний напір насоса визначається за формулою

$$H = H_z + h_g + h_n, \quad (13.1)$$

де H_z – геодезичний напір (висота підймання рідини);

h_g – втрата напору у всмоктувальному трубопроводі;

h_n – втрата напору в нагнітальному трубопроводі.

Геодезичний напір складається з геометричної висоти всмоктування $H_{z.g}$ та геометричної висоти нагнітання $H_{z.n}$.

$$H_z = H_{z.g} + H_{z.n}. \quad (13.2)$$

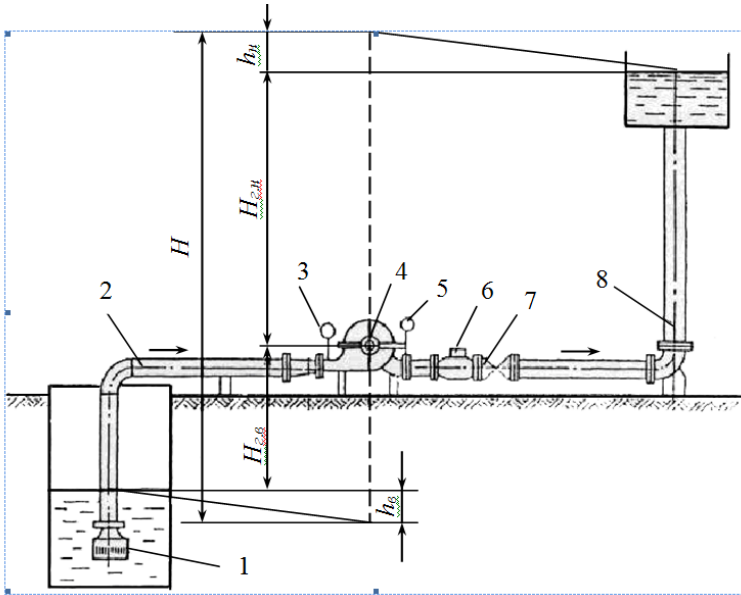


Рисунок 13.5 – Схема насосної установки

1 – приймальна сітка зі зворотним клапаном; 2 – всмоктувальний трубопровід; 3 – вакуумметр; 4 – насос; 5 – манометр; 6 – зворотний клапан; 7 – засувка; 8 – напірний трубопровід.

Потужність, що споживається насосом, визначається за формулою

$$N_H = \frac{\rho g Q H}{\eta_n}, \quad (13.3)$$

де ρ – густина рідини, що перекачується;

Q – подача, $\text{м}^3/\text{с}$;

H – напір, м;

η_n – ККД насоса.

Коефіцієнт корисної дії насоса визначається як добуток трьох коефіцієнтів, що характеризують окремі види втрат енергії в насосі

$$\eta_n = \eta_g \eta_{об} \eta_{мех}, \quad (13.4)$$

де η_g – гідравлічний ККД насоса;

$\eta_{об}$ – об'ємний ККД насоса;

$\eta_{мех}$ – механічний ККД насоса.

Значення ККД сучасних лопатевих насосів знаходиться в межах 0,6...0,9.

Необхідна потужність двигуна для приводу насоса визначається за формулою

$$N_{\partial} = k \frac{N_H}{\eta_n} = k \frac{\rho g Q H}{\eta_n \eta_n} \quad (13.5)$$

де k – коефіцієнт запасу ($k = 1,05 \dots 1,3$), більше значення коефіцієнта k відноситься до насосів невеликої потужності;

η_n – ККД передачі.

Об'ємні насоси

Об'ємним називається насос, в якому рідина переміщується шляхом періодичної зміни об'єму камери, яку вона займає, і яка періодично з'єднується з місцями входу та виходу рідини. Переміщення рідини в об'ємних насосах здійснюється шляхом витіснення її з робочої камери робочим тілом (поршень, плунжер, шестерні, гвинти, пластини). Об'ємні насоси відрізняються від лопатевих наступними ознакам:

- 1) подача рідини в об'ємних насосах здійснюється циклічно, а не рівномірним потоком, як в лопатевих насосах, причому за кожний цикл робочого процесу подається об'єм рідини, який дорівнює робочому об'єму насоса;
- 2) напірний трубопровід об'ємного насоса постійно відокремлений від всмоктувального трубопроводу розмежувальними пристроями;
- 3) об'ємні насоси мають здатність самозасмоктування рідини, тобто здатні створювати вакуум у всмоктувальному трубопроводі без попереднього його заповнення рідиною;
- 4) ідеальна подача насоса не залежить від тиску, що створюється ним;
- 5) тиск, що створюється насосом, не залежить від швидкості руху робочого органу.

За характером руху робочого тіла об'ємні насоси діляться на поршневі зі зворотно-поступальним рухом робочого тіла та

роторні з обертальним або обертально–поступальним рухом робочого органу.

Середня подача об’ємного насоса розраховується за формулою

$$Q = \frac{Vn}{60} \eta_Q, \quad (13.6)$$

де V – робочий об’єм насоса, тобто об’єм рідини, що витісняється робочим тілом за 1 цикл;

n – число робочих циклів за 1 хвилину;

η_Q – об’ємний ККД насоса.

Питання для самоконтролю.

1. Що таке насос та які існують групи насосів?
2. Яка будова робочого колеса відцентрового насосу?
3. Який принцип дії відцентрового насоса?
4. Яка будова консольного насоса?
5. Як позначаються консольні насоси?
6. Який будова насосної установки та призначення її елементів?
7. Як визначається необхідний напір насоса?
8. Як визначається ККД насоса?
9. Як розраховується необхідна потужність двигуна для приводу насоса?
10. Що таке об’ємний насос та який принцип її дії?
11. Чим відрізняються об’ємні насоси від відцентрових?

Відео. Робота відцентрового насоса.

https://www.youtube.com/watch?v=_BAnnTLpros

Лекція 14

Робочі характеристики відцентрового насоса

Робочими характеристиками насоса називаються залежності напору, потужності та ККД від подачі, відповідно $H=f_1(Q)$, $N=f_2(Q)$, $\eta=f_3(Q)$ при номінальній частоті обертання робочого колеса ($n_1=const$) (рис. 14.1). Ці характеристики отримують експериментальним шляхом і вони приводяться в паспортних даних насоса.

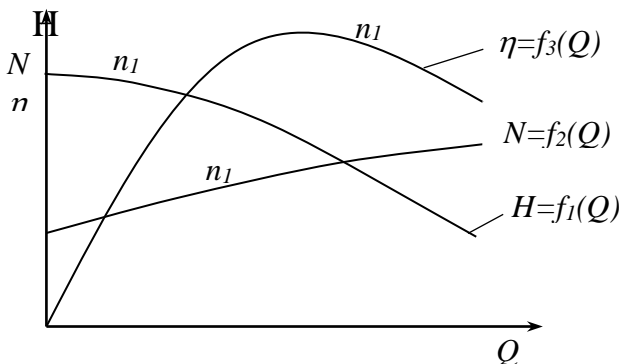


Рисунок 14.1 – Робочі характеристики насоса

Перерахунок характеристик лопатевого насоса при зміні частоти обертання робочого колеса

При зміні частоти обертання робочого колеса насоса змінюються і характеристики насоса (рис. 14.2).

При частоті обертання n_2 , що відрізняється від номінальної частоти n_1 , параметри насоса розраховуються за наступними залежностями:

$$Q_2 = Q_1 \frac{n_2}{n_1}; \quad (14.1)$$

$$H_2 = H_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^2; \quad (14.2)$$

$$N_2 = N_1 \left(\frac{n_2}{n_1} \right)^3. \quad (14.3)$$

ККД насоса при зміні частоти обертання майже не змінюється $\eta_1 \approx \eta_2$.

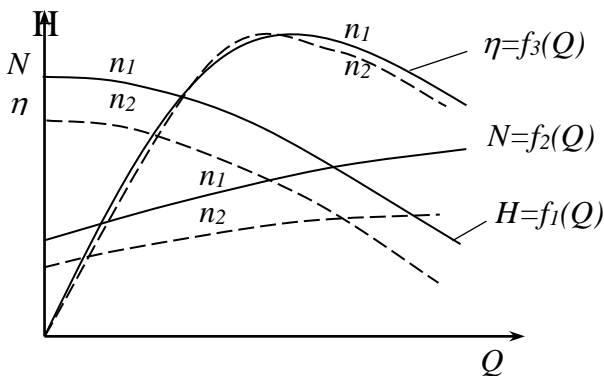


Рисунок 14.2 – Робочі характеристики насоса при номінальній частоті обертання n_1 та частоті обертання n_2

Робота насоса допускається тільки зі зниженою частотою обертання, а робота з підвищеною частотою обертання, більшою ніж на 10...15 % від номінальної, повинна погоджуватись з підприємством – виробником.

Зміна характеристик насоса обточуванням робочого колеса

Обточування робочого колеса забезпечує зміну вихідного діаметра робочого колеса, що призводить до зниження головних параметрів насоса. Величину обточування характеризує коефіцієнт обточування

$$m = \frac{D_2 - D'_2}{D_2} 100\%, \quad (14.5)$$

де D_2 і D'_2 – відповідно вихідний діаметр робочого колеса до обточування та після.

Перерахунок характеристик насоса, при обточуванні робочого колеса, проводиться за формулами:

$$Q' = Q \frac{D_2'}{D_2}; \quad (14.6)$$

$$H' = H \left(\frac{D_2'}{D_2} \right)^2; \quad (14.7)$$

$$N' = N \left(\frac{D_2'}{D_2} \right)^3. \quad (14.8)$$

Рекомендовані коефіцієнти обточування (табл. 14.1) обмежуються відношенням вихідного діаметра робочого колеса D_2 до вхідного D_1 (рис. 14.3).

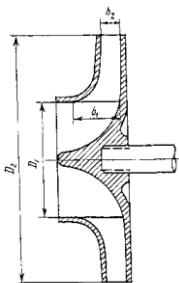


Рисунок 14.3 –
Робоче колесо

Зміна діаметра робочого колеса забезпечує значне розширення діапазону застосування насосу, в якому його робоча характеристики відповідає необхідним значенням подачі Q та напору H . Рекомендовані режими роботи насосу, які покривають поле Q - H між характеристиками з максимальним та мінімальним діаметрами робочого колеса, обмежені хвильовими лініями, називається *полем насоса* (рис. 14.4). Хвильові лінії відмічають зону роботи насоса з високим ККД.

Таблиця 14.1 – Рекомендовані коефіцієнти обточування

D_2/D_1	3...2	2...1,5	1,5...1,2
$m, \%$	20	15	10

Для полегшення підбору насосів в каталогах насосів приводяться зведені графіки полів насосів (рис. 14.5). За заданими значеннями Q та H на зведений графік полів насосів наносять

режимну точку, і на поле якого насоса ця точка попала, той насос і вибирається.

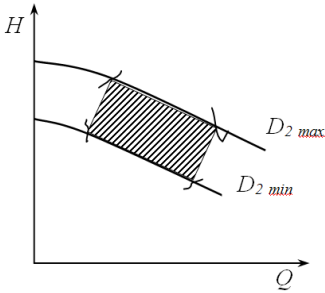


Рисунок 14.4 – Поле насоса

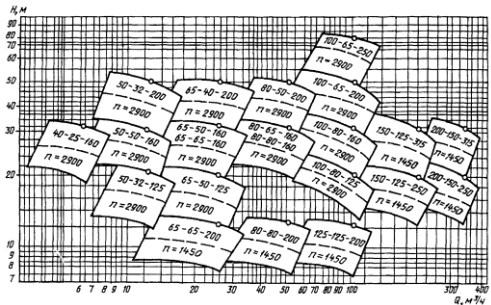


Рисунок 14.5 – Зведений графік полів насосів

Робота насоса на трубопроводі

Для визначення режиму роботи насоса на одному і тому ж графіку будується основна робоча характеристика насоса $H=f_1(Q)$ та гідравлічна характеристика трубопроводу. Точка перетину (т. А) основної робочої характеристики насоса та гідравлічної характеристики трубопроводу називається *робочою точкою насосної установки* (рис. 14.6). Положення робочої точки визначає подачу та напір насоса, а також інші робочі параметри насоса (N , η , $H_{\text{бак}}^{\text{дон}}$ або $\Delta h_{\text{дон}}$).

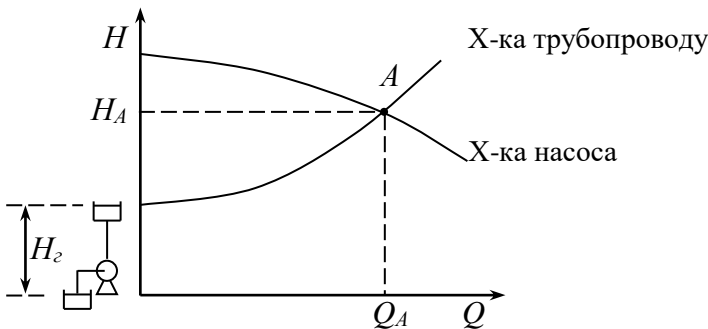


Рисунок 14.6 – Визначення робочої точки насосної установки

Гідравлічна характеристика трубопроводу розраховується за формулою

$$H = H_z + SQ^2, \quad (14.9)$$

де H_z – геодезичний напір або висота підймання рідини;

$$S = \frac{\lambda \frac{l}{d} + \sum \zeta}{2g\omega^2} - \text{коефіцієнт опору трубопроводу.}$$

Поршневі насоси

Поршневий насос простої дії (рис. 14.7) за один оберт валу кривошипа робить один такт всмоктування і один такт нагнітання.

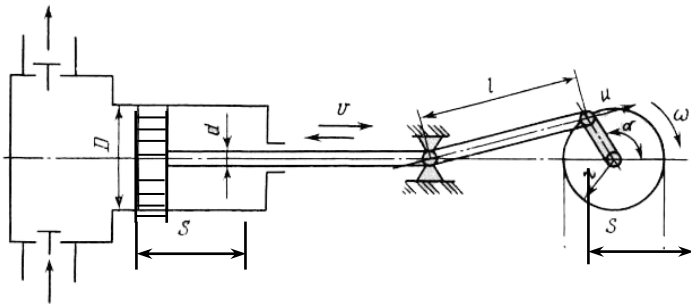


Рисунок 14.7 – Схема поршневого насоса простої дії

Об'єм рідини, що витісняється за один робочий цикл розраховується за формулою

$$V = SF, \quad (14.10)$$

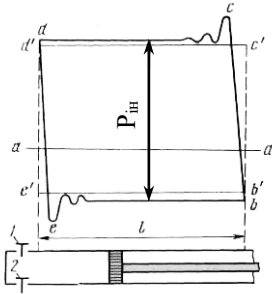
де F – площа поршня;

S – хід поршня.

Подача розраховується за формулою

$$Q = \frac{SFn}{60} \eta_Q \quad (14.11)$$

Індикаторна діаграма (графічне зображення зміни тиску в циліндрі насоса за один оберт валу кривошипа) показана на рис. 14.8.



1,2 – нагнітальний та всмоктувальний клапани

Рисунок 14.8 – Індикаторна діаграма

При русі поршня вправо з мертвої точки d до точки b відбувається засмоктування рідини в циліндр, при русі поршня вправо з мертвої точки b до точки d відбувається подача рідини в нагнітальний трубопровід. Тиск в циліндрі при цьому зменшується не стрибкоподібно, а з деяким запізненням (лінії de , bc), внаслідок запізнення закриття

нагнітального клапана та відкриття всмоктувального клапана, а також наявності повітря в циліндрі. Деяке збільшення тиску в точках e і c пояснюється подоланням опору при відкритті клапанів.

Перевагами поршневого насоса є високий ККД, незалежність напору від подачі, здатність перекачувати рідину з різною в'язкістю, здатність самозасмоктування рідини (без попереднього заповнення корпусу насоса та всмоктувального трубопроводу рідиною, що перекачується).

Недоліками поршневого насоса є нерівномірна подача і значні коливання тиску, тихохідність насосів, значна вартість на металоемкість. Для зменшення коливань тиску, на напірному трубопроводі поршневого насоса, встановлюються повітряні ковпаки.

Регулювання подачі в поршневих насосах здійснюється шляхом зміни об'ємного ККД η_Q за допомогою регулюючого перепускного клапана, через який частина рідини із нагнітального трубопроводу або робочої камери направляється знову у всмоктувальний трубопровід.

Питання для самоконтролю.

1. Що таке робочі характеристики насоса?
2. За якими формулами розраховуються параметри насоса при зміні частоти обертання робочого колеса?
3. З якою метою обточують робочі колеса відцентрового насоса?
4. За якими формулами розраховуються параметри насоса при обточуванні робочого колеса?
5. Які рекомендовані значення обточування робочого колеса?
6. Що таке поле насоса?
7. За якими параметрами вибираються насоси?
8. Яка будова та принцип дії поршневого насоса простої дії?
9. Від чого залежить подача поршневого насоса простої дії?
10. Що таке індикаторна діаграма поршневого насоса та що вона показує?
11. Які достоїнства та недоліки поршневих насосів?

Лекція 15

Компресори

В медичній практиці широке впровадження мають компресори, які забезпечують подачу стисненого повітря для потреб фахівців при виконанні різних робіт, зокрема в анестезіології, стоматології, фармацевтиці для виготовлення та упаковки медикаментів, змішування лікарських препаратів або в якості пневмотранспорту, а також для аерозольної дезінфекції і дезінсекції (комплекс профілактичних і винищувальних заходів для знищення і врегулювання кількості комах (тарганів, мурах, клопів, бліх, комарів, мух, вошей, молі, кліщів, ос тощо).

Компресор (від лат. *compressio* – стиснення) – пристрій для підвищення тиску та переміщення газоподібних речовин.

Повітряні компресори поділяються за конструктивними особливостями і принципом роботи. Існують дві основні категорії – поршневі і роторні компресори.

У поршневих компресорах повітря стискається за допомогою поршнів (рис. 15.1), що приводяться в рух двигуном.

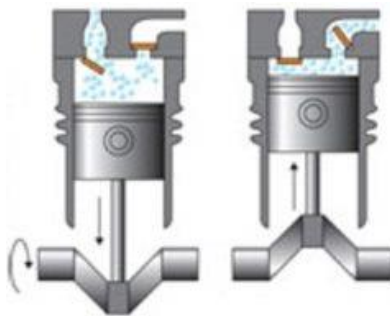


Рисунок 15.1 – Будова поршневого компресора

В роторних компресорах використовуються обертові елементи. Існують такі різновиди роторних агрегатів:

– гвинтові компресори. У них використовується два ротори, за рахунок обертання яких порожнину стиснення зменшується в об'ємі. Завдяки симетрії роторів, працюючих в таких

компресорах, вал може обертатися швидше, а конструкція займає менше місця;

– роторно-пластинчасті компресори. Цей тип компресорів працює з пластинами, які при обертанні ротора, заганяють повітря у ємність.

Компресори поршневого типу відрізняються надійністю, стабільністю роботи і досить задовільною якістю повітря, що поставляється ними. Найчастіше їх використовують для однієї або декількох стоматологічних установок.

Компресори гвинтового типу мають можливість створювати високий тиск при великій витраті повітря. Застосовуються вони для централізованого забезпечення стоматологічних клінік.

Компресори відцентрові найширше застосовують в системах вакуумного відсмоктування і пилососах.

Принцип дії роторних гвинтових компресорів полягає на взаємодії гелікоїдальних (черв'ячних) роторів. Один з роторів має виступи, інший – виїмки. Повітря, яке потрапляє між роторами стискається між ними та корпусом компресора. Роботу компресора можна поділити на 4 етапи (рис. 15.2):

1. край роторів відкриває впускний отвір та повітря потрапляє до камери стискування;
2. повітря потрапляє у порожнину між двома роторами;
3. під час повороту роторів об'єм порожнини постійно зменшується та повітря, що знаходиться в ній, стискається;
4. стиснуте повітря виходить через випускний клапан.

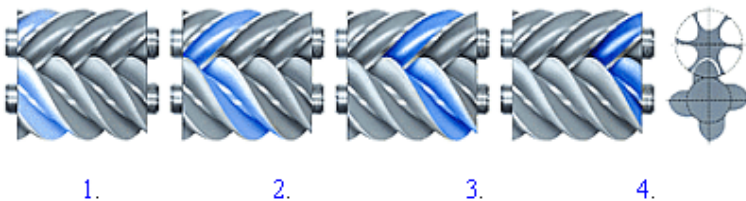


Рисунок 15.2 – Етапи роботи гвинтового компресора

Роторні гвинтові компресори, в основному, мають два робочих вали. Перший ведучий, другий ведений. Ведучий вал безпосередньо з'єднаний з електричним двигуном або через редук-

тор; ведений вал обертається завдяки зачепленню з ведучим валом.

За конструкцією компресори можуть бути з одним робочим елементом чи з двома. Тобто, з одним ведучим валом (рис. 15.3) чи з двома (одновальний, двохвальний).

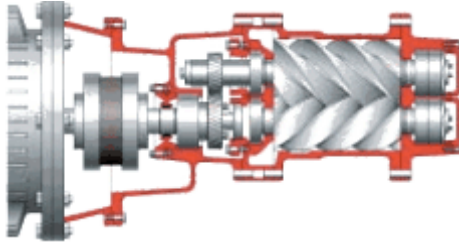


Рисунок 15.3 – Будова одновального гвинтового насоса

Широке використання мають відцентрові компресори (турбокомпресори). Робочий процес в цих компресорах можна розбити на дві стадії: спочатку газу надається за рахунок підведеної механічної енергії деяка кінетична енергія, яка в подальшому перетворюється в потенціальну енергію стиснутого газу. Компресори, як правило мають водяне охолодження. Компресор (рис. 15.4) складається із корпусу з вхідним 1 і вихідним 2 патрубками, робочих коліс 3, направляючих апаратів 4. Корпус відливається із чавуну і має горизонтальний або вертикальний роз'єм. Робочі колеса, закріплені на загальному валу, утворюють ротор компресора, який обертається в підшипниках 5. В місцях з'єднання валу і підшипників є лабіринті ущільнювачі 6.

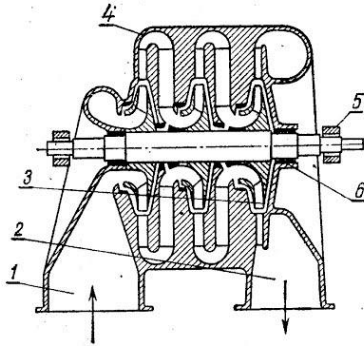


Рисунок 15.4 – Будова турбокомпресора

Робоче колесо складається із двох дисків, які з'єднані між собою лопатками, що утворюють в просторі між дисками ряд криволінійних каналів. Робоче колесо і направляючий апарат утворюють одну ступінь компресора.

Газ засмоктується через вхідний патрубок в кільцеву камеру – конфузор (або спеціальний направляючий апарат), де отримує деяке прискорення, і далі надходить в першу ступінь компресора. Газ, заповнюючи канали між лопатками, при обертанні робочого колеса відкидається під дією відцентрових сил від центру до периферії. В центральній частині колеса утворюється розрідження, а на периферії тиск дещо підвищується. Таким чином, механічна енергія, підведена до колеса від двигуна, перетворюється в кінетичну і потенціальну енергію газу. У направляючому апараті тиск газу підвищується за рахунок зменшення його кінетичної енергії. Направляючим апаратом здійснюється не тільки підведення газу до наступної ступені або вихідного патрубку, але і перетворення кінетичної енергії (швидкості) потоку в його потенціальну енергію (тиск).

Оскільки в кожній ступені збільшення тиску газу порівняно невелике, то для значного підвищення тиску необхідно велике число ступенів. Продуктивність компресора залежить від частоти обертання ротора, діаметра робочих коліс і їх конструкції. Газ може охолоджуватись в проміжних холодильних камерах.

Принцип роботи турбокомпресора

https://www.youtube.com/watch?time_continue=125&v=FiaRjnEgbyQ&feature=emb_logo

Широке застосування у техніці мають також ротаційні компресори, перевага яких у тому, що вони працюють з примусовим виштовхуванням стисненого повітря при відсутності всмоктувального і нагнітального клапанів.

Принцип роботи роторно-пластинчастого компресора https://www.youtube.com/watch?time_continue=894&v=ImuElphPaA&feature=emb_logo

За принципом роботи компресори поділяються на заповнені оливою та безоливові.

Компресори з оливою мають нижчий рівень шуму при роботі, вони надійніші і довговічніші, але їх недоліком є те, що в повітря при роботі потрапляє деяка кількість парів оливи.

Безоливові компресори більше шумні, тривалість їх служби нижча, деякі деталі зношуються досить швидко, і підлягають заміні, що пов'язано з відсутністю мастила для робочих елементів. Це призводить до додаткових витрати по обслуговуванню пристрою. Але якість їх повітря набагато вища, ніж у оливових. Тому в медицині застосовують саме цей вид устаткування.

Властивості повітря

Повітря, що стискується в компресорах, являє собою механічну суміш з азоту та кисню (відповідно 78 та 21%) і інших газів в невеликій кількості (аргон, вуглекислий газ і т.п.), а також водяної пари.

Повітря, що містить водяну пару, є вологим і характеризується абсолютною та відносною вологістю. *Абсолютна вологість* визначається кількістю водяної пари в одиниці об'єму повітря. Відношення абсолютної вологості до максимальної кількості пари, яка може вміщуватись в одиниці об'єму повітря при тій же температурі та тиску, називається *відносною вологістю*. Коли відносна вологість більша ніж 100%, то з повітря виділяється конденсат. Конденсація вологи відбувається в приладах та трубопроводах, де температура стисненого повітря зменшується. Влітку конденсат зливається через кран для зливання кон-

денсату і істотної шкоди не завдає. Взимку вода замерзає, утворюючи крижані пробки, які призводять до відмов систем, які використовують стиснене повітря. Тому в системах підготовки повітря повинні бути пристрої для його сушіння (дегідратори).

На практиці при термодинамічних розрахунках користуються параметрами стисненого повітря. Поправка на вологість вноситься тільки при особливих вимогах до точності. Основними параметрами, що характеризують стан стисненого повітря, є тиск p , температура T та густина ρ .

Стиснене повітря звичайно розглядається як ідеальний газ, тобто газ, у якого відсутні сили зчеплення між молекулами, а молекули є матеріальними точками і не мають об'єму. Реальний газ відрізняється від ідеального головним чином наявністю сил тертя. Параметри стану газу (p , T , ρ) зв'язані між собою рівнянням стану, вид якого залежить від властивостей газу. У залежності від зміни стану газу розрізняють декілька видів термодинамічних процесів, характеристики яких приведені в таблиці 15.1.

Таблиця 15.1 – Характеристики термодинамічних процесів

Назва процесу	Значення n в рівнянні $pV^n = const$	Рівняння процесу	Залежність між параметрами
Ізохоричний	$\pm \infty$	$V = const$	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{T_2}{T_1}$
Ізобаричний	0	$p = const$	$\frac{V_2}{V_1} = \frac{T_2}{T_1}$
Ізотермічний	1	$pV = const$	$\frac{p_2}{p_1} = \frac{V_2}{V_1}$
Адіабатичний	k	$pV^k = const$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$
Політропічний	від $-\infty$ до $+\infty$	$pV^n = const$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$

де $V = \frac{W}{m}$ ($\text{м}^3/\text{кг}$) – питомий об'єм.

де W і m – об'єм і маса речовини.

Питомий об'єм – величина обернена густині $V = \frac{1}{\rho}$.

Основи розрахунків повітропроводів

При сталому русі повітря по трубі постійного діаметра масова витрата потоку Q_m залишається постійною і відповідно буде справедливим рівняння

$$Q_m / \omega = v_1 \rho_1 = v_2 \rho_2 = v_n \rho_n = \text{const} \quad (15.1)$$

де v – швидкість руху газу; ω – площа поперечного перерізу труби; ρ – густина газу.

Так як при русі газу виникає тертя, то тиск зменшується вздовж потоку і відповідно газ розширюється, що призводить до зменшення його густини ρ і відповідно до збільшення швидкості v . При відсутності теплообміну з зовнішнім середовищем процес розширення при русі газу буде адіабатним, а при інтенсивному теплообміні температура газу вздовж труби залишається постійною, тобто має місце ізотермічний процес. Таким чином чим коротший трубопровід, тим буде ближчим процес до адіабатичного, і навпаки, чим довший трубопровід, тим ближчим буде процес до ізотермічного. Оскільки трубопроводи мають, як правило, значну довжину, то вважається що рух газу в них ізотермічний.

Виразивши число Рейнольдса для потоку газу в трубі через його масову витрату та динамічну в'язкість маємо

$$\text{Re} = \frac{4Q_m}{\pi d \eta}. \quad (15.2)$$

Звідси видно, що число Рейнольдса може змінюватись вздовж потоку в трубі постійного діаметру лише за рахунок зміни в'язкості η . Але в'язкість газів не залежить від тиску, визначається лише температурою, тому при ізотермічному процесі

руху газу по трубі число Рейнольдса буде залишатися постійним вздовж потоку. Відповідно коефіцієнт втрат на тертя λ також буде постійною величиною вздовж труби постійного діаметру, незважаючи на збільшення швидкості потоку газу.

Масова витрата газу визначається за формулою

$$Q_m = \frac{\pi d^2}{4} \rho v = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2)}{\left(\lambda \frac{l}{d} + 2 \ln \frac{p_1}{p_2}\right) RT}} \quad (15.3)$$

В довгих трубопроводах при русі газу зі швидкостями, які значно менші звукових

$$\lambda \frac{l}{d} \gg 2 \ln \frac{p_1}{p_2}$$

і відповідно масова витрата газу визначається за формулою

$$Q_m = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{(p_1^2 - p_2^2) d}{\lambda RT}} \quad (15.4)$$

Коефіцієнт λ визначається таким же чином, як і для нестигнених рідин за числом Рейнольдса та відносною шорсткістю.

Стоматологічні компресори

Усі сучасні стоматологічні установки працюють на стислому повітрі і тому потребують якісного і надійного компресора для подання повітря з необхідними параметрами.

Повітря використовується для різних операцій: для розкручування ротора високошвидкісної турбіни, для подання води в пістолет, для відсмоктування слини і так далі. Забезпечення стоматологічної установки стисненим повітрям є завданням повітряних компресорів.

Спочатку в стоматологічних компресорах застосовувалися типові поршневі групи, ідентичні таким як і у двигунах внутрішнього згорання. Популярні вони завдяки інженерній простоті: є вал, який обертається електродвигуном, на вал насаджений шатун з поршнем і коли той рухається усередині гільзи – систе-

ма клапанів накачує атмосферне повітря в ресивер. Рух поршня усередині гільзи супроводжується тертям та підвищенням температури агрегату. Для зменшення тертя і відповідно нагріву була додана система мащення. Побічним ефектом системи мащення стали домішки оливи у робочому повітрі. Для вирішення проблеми поршень оснастили кільцем для зняття оливи, а на виході були встановлені додаткові фільтри. Такий підхід виявився недостатньо ефективним, очистити повітря до ідеалу не виходило, а конструкція ускладнилася істотно.

Тому технологічний пошук тривав, поки не були розроблені поршневі безоливові компресори, і саме вони у XXI столітті є “золотим стандартом” для стоматології. Втім безоливові компресори мають свої особливості, які необхідно враховувати при роботі.

Проблему тертя у безоливових компресорів дещо зменшили за рахунок зниження оборотів приводного двигуна та заміною алюмінієвої гільзи на чавунну, оскільки чавун міняє свої властивості від нагрівання значно менше, ніж алюміній. При цьому довелося поліпшити систему охолодження.

Переваги безоливових компресорів:

- немає необхідності заливати оливу;
- стиснене повітря є чистим від домішок оливи;
- зменшується шум компресора за рахунок зменшення обертів.

До компресора є такі вимоги:

– повітря повинно бути абсолютно сухим, щоб волога не порушувала процеси твердіння композитних пломбувальних матеріалів;

– повітря повинно бути абсолютно чистим – найменші домішки сторонніх часток призводять до швидкого зносу устаткування установки;

– оптимальний тиск, якого повинно вистачати для одночасної роботи декількох пристроїв, наприклад – мікромотора і слиновідсосу;

- бути малошумним.

У відповідності із санітарними нормами максимальне значення шуму компресора повинно бути не більше 80 дБ. Завдяки ідеальній підгонці рухливих частин можливе зниження цього показника до 60-65 дБ. Для зниження шуму до 50-40 дБ, на апарат встановлюється спеціальна шумопоглинаюча шафа, в якій обов'язково передбачається система примусового охолодження за рахунок установки припливного і витяжного вентиляторів. Останній критерій визначається характеристиками і якістю комплектуючих, з яких складається сучасний.

Мінімальний склад малошумного стоматологічного компресора (рис. 15.5) такий:

- компресорна голівка (одна або декілька);
- ресивер для накопичення повітря і створення необхідного робочого тиску;
- запобіжний клапан для скидання занадто високого тиску;
- повітряний фільтр на всмоктуючому патрубку;
- система збору конденсату для осушення вхідного повітря.



Рисунок 15.5 – Зовнішній вид стоматологічного компресора

Застереження щодо умов експлуатації компресора вказуються на блоці управління (рис. 15.6).



Рисунок 15.6 – Застереження щодо умов експлуатації компресора

Основним елементом компресора є голівка (рис. 15.7), яка призначена для закачування атмосферного повітря у ресивер під певним тиском, який може бути від 1,9 бар для пістолета вода-повітря, до 3,5 бар, для розкручування повітряного мікромотора. Причому тиск повинен створюватись за досить короткий час, оскільки повітря може бути потрібне одночасно декільком споживачам, наприклад, слиновідсосу і мікромотору.



Рисунок 15.7 – Голівка стоматологічного компресора

Потреби споживання стисненого повітря стоматологічними пристроями такі:

- повітряний мікромотор – 55...65 л/хв.;
- турбіна – 30...40 л/хв.;
- потужний повітряний слиновідсос – 40...55 л/хв.;
- простий повітряний слиновідсос – 15...28 л/хв.;
- пістолет вода-повітря – 12...19 л/хв.

Для акумулювання стисненого повітря використовується ресивер – металевий бак, в якому накопичується повітря при робочому тиску. Для ресиверів медичних компресорів внутрішня поверхня повинна мати покриття багат шарової емалі, яка захищає внутрішню поверхню від корозії та запобігає розмноженню мікробів.

При досягненні максимального робочого тиску голівка компресора вимикається, а при досягненні мінімального тиску – вмикається. Функції подачі команди на вмикання та вимикання голівки компресора здійснює датчик тиску (рис. 8.8).



Рисунок 15.8 – Датчик тиску

Для видалення домішок у стисненому повітрі на вході в ресивер або голівку ставиться багат шаровий фільтр, завдяки якому повітря очищується до необхідної чистоти.

Для видалення вологи, що міститься у атмосферному повітрі, і яка заважає нормальним процесам твердіння сучасних пломбувальних матеріалів, стоматологічні компресори оснащуються осушувачами і системою скидання зібраного конденсату (рис. 15.9). Система відведення конденсату збирає вологу із атмосфери та автоматично виводить рідину, що накопилась, через проміжки часу в межах 30 сек. – 5 хв. Також на компресор встановлюються адсорбційний осушувач з попутним охолодженням і 100% поглинанням вологи з повітря, що нагнітається. Після осушення, точка роси для обробленого повітря складає мінус 20°C.

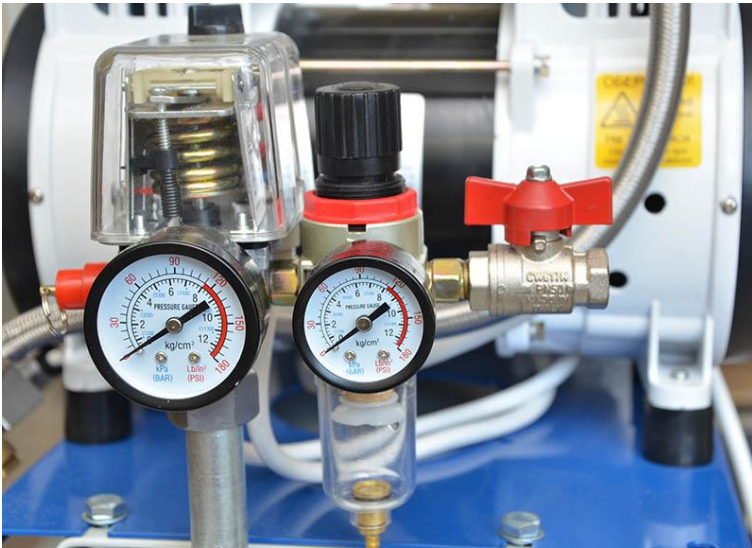


Рисунок 15.9 – Осушувач, система скидання конденсату та манометри

Розрахунок оптимальних параметрів компресора

При використанні одного компресора для декількох стоматологічних установок, необхідно враховувати об'єми споживання повітря різними пристроями та показник одночасності роботи споживачів стислого повітря. Він характеризує одночасно працююче устаткування, яке приєднане до повітряної мережі. Окрім цього, необхідно враховувати коефіцієнт використання ком-

пресора. Він розраховується у співвідношенні часу фактичної роботи до тривалості робочого дня.

Розрахунок витрати стисненого повітря компресора визначається множенням коефіцієнта одночасності на суму величин максимальної витрати кожного споживача, помножених на величину коефіцієнта використання.

Коефіцієнт одночасності має такі значення:

- 2-3 одиниці устаткування – 0,9;
- 4-6 одиниць устаткування – 0,8;
- 7-8 одиниць устаткування – 0,76;
- 10-14 одиниць устаткування – 0,7;
- 15-20 одиниць устаткування – 0,6.

В деяких випадках вибір продуктивності компресора встановлюється експериментальним шляхом при якому визначається період часу падіння тиску в ресивері від максимального до мінімального. Період цей – тривалість між зупинкою і включенням компресора. Ця тривалість з урахуванням технічних характеристик діючого агрегату потрібна для правильного вибору компресора необхідної продуктивності. При працюючих інструментах оптимальний за часом режим роботи компресора складає: 1 до 2-х (1 частина робота, 2 частини відпочинок).

Профілактичне обслуговування компресорів

Всі компресори потребують профілактичного обслуговування, яке передбачає такі операції:

Раз на тиждень необхідно:

- видаляти конденсат, що потрапив в ресивер (зливати під тиском не більше 2 бар);
- видалити вологу з конденсатовідвідника, шляхом натискання на кнопку у дні фільтра доочистки повітря після відбору конденсату. У деяких компресорах конденсатовідвідник автоматично скидає воду при зниженні тиску нижче 2 бар, тому цю процедуру необхідно проводити тільки якщо тиск не скидається близько тижня.

Раз на місяць необхідно:

- перевіряти надійність усіх з'єднань;

- контролювати відповідність часу набору тиску паспортним даним;

- очищати компресор вологою ганчіркою від бруду, пилю, оскільки із-за цього погіршується охолодження апарату.

Раз на рік необхідно:

- перевіряти стан фільтру на вході. При забрудненні – почистити, при сильному забрудненні – замінити.

- перевіряти стан кільця ущільнювача на зворотному клапані (перед цим необхідно повністю скинути тиск з ресиверу);

- перевіряти роботу запобіжного клапана – натиснути на його кільце при манометричному тиску в ресивері.

Ознаки поломки компресора такі:

- посилення шуму і вібрації при його роботі;

- час набору тиску до значення робочого тиску суттєво збільшується або він зовсім не досягається;

- зупинка вентиляторів системи охолодження компресора;

- компресор вмикається навіть без активних споживачів повітря;

- компресор перегрівається;

- компресор не вмикається при падінні тиску або постійно спрацьовує запобіжний клапан.

Характеристики повітряного компресора

Характеристиками повітряного компресора є такі показники: продуктивність, максимальний тиск, об'єм ресивера, час набору тиску і потужність двигуна.

Продуктивність компресора визначається в л/хв. при певному тиску, при збільшенні тиску продуктивність компресора зменшується. Продуктивність деяких агрегатів визначається за обсягом повітря, що виходить, а в деяких – що входить.

Максимальний тиск компресора може бути від 0,2 до 16 бар.

Об'єм ресивера залежить від продуктивності компресора і режиму споживання повітря. При використанні обладнання з великим об'ємом ресивера робочий цикл триває довше, а сам агрегат рідше вмикається впродовж робочого часу.

Час набору тиску залежить від продуктивності компресора та об'єму ресивера, як правило складає декілька хвилин.

Потужність двигуна залежить від характеристики потужності агрегату і рівня його енергоспоживання. Компресор повітряний гвинтовий може оснащуватися двигуном тієї ж потужності, що і поршневий, але ККД і рівень витраченої електроенергії будуть різними.

Питання для самоконтролю.

21. Що таке компресор і його призначення?
22. При яких роботах використовується стиснене повітря?
23. Які основні групи повітряних компресорів?
24. Який принцип дії та будова поршневих компресорів?
25. Яка будова гвинтових компресорів?
26. Які етапи роботи гвинтових компресорів?
27. Який принцип дії роторно-пластинчастого компресора?
28. Який принцип дії відцентрових компресорів?
29. Від чого залежить продуктивність відцентрового компресора?
30. Які переваги та недоліки безоливових компресорів?
31. Який склад атмосферного повітря?
32. Що таке абсолютна та відносна вологість повітря?
33. Які основні параметри повітря?
34. Що таке ізохоричний процес?
35. Що таке ізобаричний процес?
36. Що таке ізотермічний процес?
37. Що таке адіабатичний процес?
38. Що таке політропічний процес?
39. Як збільшується швидкість руху повітря вздовж трубопроводу?
40. За якою формулою визначається число Рейнольдса для потоку газу в трубі?
41. За якою формулою визначається масова витрата газу?
42. Які переваги безоливових компресорів?
43. Який склад малошумного стоматологічного компресора?

44. Яке призначення голівки компресора?
45. Які потреби споживання стисненого повітря стоматологічними пристроями?
46. Яке призначення ресивера?
47. Яке призначення системи осушувача?
48. Як проводиться розрахунок витрати стисненого повітря компресора?
49. Які операції щотижневого профілактичного обслуговування?
50. Які операції щомісячного профілактичного обслуговування?
51. Які операції щорічного профілактичного обслуговування?
52. Які характеристики повітряного компресора?

Навчальне видання

ГІДРАВЛІКА ТА ГЕМОДИНАМІКА

Курс лекцій

***МОРОЗ** Олександр Миколайович*

СЕРЕДА Анатолій Іванович

Формат 60×84/16. Гарнітура Times New Roman
Папір для цифрового друку. Друк ризографічний.
Ум. друк. арк. 6,39. Наклад 100 пр.
ДБТУ
61002, м. Харків, вул. Алчевських, 44