

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

*Циклова комісія аеронавігації*

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

навчальної дисципліни

«Гідравліка та гідропневмопристрої авіаційної техніки»

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

**Технічне обслуговування та ремонт повітряних суден і авіадвигунів**

**за темою № 1 - «Вступ. Поняття про рідину. Основні фізико-механічні властивості і параметри рідин і газів»**

**Вінниця 2023**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії аеронавігації, протокол від 28.08.2023 р № 1.

**Розробник:**

викладач циклової комісії аеронавігації, доцент, к.т.н. Павленко О. В.

**Рецензенти:**

1. викладач Кременчуцького льотного коледжу Харківського національного університету внутрішніх справ, к.т.н., старший науковий співробітник, спеціаліст вищої категорії, викладач-методист Тягній В. Г.
2. доцент кафедри автомобілів і тракторів Кременчуцького національного університету ім. Михайла Остроградського, к.т.н., Черненко С. М.

## План лекції

1. Вступ, зміст, задачі і вимоги до вивчення дисципліни
2. Предмет гідравліки і коротка історія її розвитку, як науки
3. Поняття про рідину і класифікація сил, що діють на неї.
4. Основні методи вивчення механіки рідини і газу.
5. Основні фізичні параметри рідини і газу
6. Основні фізико-механічні властивості рідини і газу

## Рекомендована література:

### Основна література

1. Федорець В.О., Педченко М.Н., Федорець О.О. Технічна гідромеханіка. Гідравліка та гідропневмопривод. Підручник. Житомир.: ЖІТІ, 1998. – 412 с.
2. Кулінченко, В. Р. Гідравліка, гідравлічні машини і гідропривід: підручник / В. Р. Кулінченко. — Київ: ІНКІОС, Центр навчальної літератури, 2006. - 616 с.
3. Рогалевич Ю.П. Гідравліка / Ю.П. Рогалевич. – К. : Вища шк., 1993. – 255 с.
4. Холоменюк М.В. Насосні та вентиляторні установки. – Дніпропетровськ: Національний гірничий університет, 2005. – 330 с.
4. Навроцький Б. І. Механіка рідин : [підруч. для техн. вузів]/ Б.І. Навроцький, Є. Сухін. — К. : ДІА, 2003. — 416 с.
5. Гідравліка та гідропривод: збірник задач і вправ : навч. посіб./ Л. В. Возняк, Р. Ф. Гімер, П. Р. Гімер [та ін.]. - Івано-Франківськ: Факел, 2018. - 283 с.

### Допоміжна література

6. Расчет, проектирование и эксплуатация объемного гидропривода : учеб. пособие для студ. вузов / З.Л. Финкельштейн, О.М. Яхно, В.Г. Чебан и [ др.]. — К.: КПИ, 2006. — 216 с.
7. Мандрус В.І., Лендїй Н.П. Машинобудівна гідравліка. Задачі та приклади. Навчальний посібник. Львів:, Світ, 1995.-264с.
8. Промисловий гідропривод : Практичний порадник / З.Л. Фінкельштейн, О.М. Яхно, І.С. Корощупов, К.С. Коваленко ; м-во освіти і науки, молоді та спорту України. ДонДТУ.НТУУ "КПІ". — Алчевськ : ДонДТУ ; К. : НТУУ "КПІ", 2012. — 176 с.
9. Башта Т.М. Надежность гидравлических систем ВС. Учебник. М.: Транспорт, 1986.-279с.
10. Артемьева Т.В., Лысенко Т.М. Гидравлика, гидромашины и гидропневмопривод. Учебник. М.: Изд. Центр "Академия", 2006.-336 с.
11. Справочник по гидравлике / В. А. Большаков, Ю. М. Константинов, В. Н. Попов и др. — 2-е изд. — К.: Вища шк. Головное изд-во, 2004.
12. Мандрус В.І. Гідравлічні та аеродинамічні машини. Підручник. Львів:, "Магнолія -2006", 2007.-340 с.

13. Сидоренко В.П., Яхно О.М. Гідравліка і гідроприводи. Навчальний посібник. К.: Університет "Україна", 2007.-164 с.
14. Схиртладзе А.Г. Гидравлические и пневматические системы. Учебник. М.: Высш. шк., 2006.-534 с.
15. Свешников, А.Г. Станочные гидроприводы / А.Г. Свешников. – М.: Машиностроение, 2004. – 512 с.
16. Металлорежущие станки : учеб. пособие для вузов. – М.: Машиностроение, 1990. – 500 с.
17. Д.Ю. Воронов, В.В. Волосков, А.О. Драчев, О.В. Бойченко. Гидроцилиндры: учеб.-метод. пособие / Д.Ю. Воронов [и др.]. – Тольятти : ТГУ, 2011. – 72 с.
18. Левицький Б. Ф. Гідравліка. Загальний курс / Б. Ф. Левицький. Н. П. Лещій. — Львів: Світ, 1994. — 264 с.
19. Гідравліка, гідро- та пневмопривод. Навчально-методичний посібник для студентів інженерних спеціальностей ЗДІА/ Укл. В.К. Тарасов, О.В. Новокщона. Запоріжжя: Видавництво ЗДІА, 2010. - 132 с.

### **Текст лекції**

#### **1. Вступ, зміст, задачі і вимоги до вивчення дисципліни**

Гідравліка це прикладна наука про рівновагу та рух сконденсованих рідин Як будь-який розділ механіки, гідравліка поділяється на 1) статику – вчення про рівновагу тіл під дією сил, 2) кінематику - вчення про геометричні властивості руху тіл, та 3) динаміку – вчення про рух тіл під дією зовнішніх сил.

Зрозуміло, що перші два підрозділи є допоміжними під час вивчення останнього. В цьому курсі питання кінематики розглядаються в розділі гідродинаміки.

Гідравліка вивчає закони руху так званих ньютонівських рідин. Для них напруги, що викликаються опором рідини (в'язкістю), є пропорційними швидкостям деформації, тобто зміни відстані між окремими частинками потоку. Для неньютонівських рідин ця залежність є значно складнішою, закони руху для них вивчає реологія.

Процеси перенесення рідини в даному курсі розглядаються не як взаємодія елементарних частинок речовини, а як зміна тих чи інших їх усереднених параметрів, а сама речовина – як континуум, тобто простір, заповнений не окремими частинками, але суцільною масою. Такий підхід зветься феноменологічним (від грецького *phenomenon* – «те, що з'являється» та *logos* - вчення), тобто таким, що має справу з наявними результатами кожного процесу. Він був запропонований австрійським фізиком та філософом Е. Махом більше як сто років тому і досі є дуже плідним у різних галузях знання, включно із технічною термодинамікою та тепломасообміном.

Інший підхід до вивчення процесів гідравліки використовує інформацію щодо мікроскопічної будови рідини, тобто окремих молекул,

атомів, іонів тощо, то взаємодії між ними. Велика кількість цих частинок (наприклад діаметр молекул води становить приблизно  $3 \cdot 10^{-8}$  см) дозволяє застосовувати статистичні закономірності у поведінці цих частинок, і тому такий підхід має назву статистичний метод. Статистичний підхід дозволяє у принципі, а інколи і фактично за допомогою методів теорії ймовірності обчислити параметри руху континуума, якщо відомими є сили взаємодії між окремими частинками. Методи теорії ймовірності є невід'ємною частиною також феноменологічного підходу, але цього разу вони використовуються для з'ясування ступеня вірогідності отриманих у дослідях результатів та встановлення зв'язків між ними.

На відміну від інших частин курсу теплотехніки, в курсі гідравліки розглядається тільки механічна взаємодія потоків між собою та із стінками каналів, іншими словами – ці потоки вважаються ізотермічними. Насправді різкої границі між цими дисциплінами провести неможливо, наприклад, у зв'язку із так званою *дисипацією* (від лат. *dissipation* - розсіювання) механічної енергії. Потік рідини належить до *дисипативних систем*, коли енергія впорядкованого процесу переходить в енергію неупорядкованого процесу, а у кінцевому рахунку – в енергію теплового (хаотичного) руху молекул. Цього разу частина повної механічної енергії потоку, що витрачається на подолання опору тертя, переходить у внутрішню енергію речовини, а це викликає зміну її температури.

Вважається, що гідравліка це прикладна наука про рівновагу та рух сконденсованих рідин, але наближені методи гідравліки використовуються також під час розрахунків каналів, в яких транспортуються гази. Відповідний розділ гідрогазодинаміки видатний український вчений І.Л. Повх назвав «газовою гідравлікою».

Гідравліка умовно розділяється на три складові частини: *гідростатику*, *кінематику* і *гідродинаміку*.

*Гідростатика* вивчає закони рівноваги рідини в нерухомому стані.

*Кінематика* вивчає рух рідини і зміну кінематичних параметрів без впливу на неї зовнішніх сил.

*Гідродинаміка* вивчає закони руху рідини під впливом зовнішніх сил.

Гідравліка розглядає методи розрахунку і проектування різноманітних гідротехнічних споруд і гідросистем (*гребель, каналів, водозливів, трубопроводів для подачі різних рідин*), гідромашин (*насосів, гідротурбін, гідропередач*), а також других пристроїв, що використовуються в багатьох областях техніки. Особливо велике значення гідравліки в машинобудуванні.

Гідросистеми, що включають в себе насоси, трубопроводи, гідромашин і різноманітні гідроагрегати широко використовуються в машинобудуванні в якості силових і керуючих гідросистем, систем рідинного охолодження, паливоподачі, змащувальних систем і інші.

Широке розповсюдження в сучасних машин отримали гідропередачі і гідроавтоматика.

Гідропередачі представляють собою пристрої для передачі механічної енергії і перетворення її в гідравлічну, а також забезпечення різноманітних видів руху за допомогою робочої рідини. Гідропередачі, обладнанні системами автоматичного або ручного керування, створюють гідроприводи. Для розрахунку і проектування гідроприводів, їх систем автоматичного регулювання і інших пристроїв з гідромашинами і гідроавтоматикою, а також для правильної їх експлуатації, ремонту і налагодження необхідно мати відповідну підготовку в області гідравліки і теорії машин.

## **2. Предмет гідравліки і коротка історія її розвитку, як науки**

Гідравліка пройшла довгий та тривалий час розвитку. З найдавніших часів людство намагалося використовувати сили природи для своїх потреб. Першими двигунами були не теплові, а водяні і вітрові, оскільки на той час люди ще не користувалися вогнем. Поступово накопичувалися окремі спостереження, відкривалися закономірності руху рідини, які узагальнювалися та перетворювалися у систему знань - науку.

Окремі результати таких спостережень було викладено в трудах древньогрецького філософа Аристотеля (384–322 рр. до н.е.). Математик і механік Архімед (біля 287–212 рр. до н.е.) сформулював основний принцип гідростатики та винайшов водопідйомну машину для відкачування води із трюму корабля (гвинт Архімеда).

Пізніше Ктезибій винайшов водяний годинник клепсидру (з гр. *klepto* – краду, *hydor* - вода), а також пожежний насос.

Герон Александрійський (І сторіччя н.е.) описав водяний сифон, автомат для порціонування рідини, модель парового двигуна.

Леонардо да Вінчі (1457-1519 рр.) ввів до науки поняття нерозривності та опору рідини, розробив кілька гідравлічних машин.

Галілео Галілей (1564-1642) встановив пропорційність опору середовища швидкості тіла, що рухається в ньому.

Еванджеліста Торрічеллі (1608-1647) запропонував барометр та визначив формулу струменя рідини під час вільного падіння.

Блез Паскаль (1623-1662) встановив, що тиск на поверхні рідини передається рівномірно у всіх напрямках (закон Паскаля), та розробив метод розрахунку гідравлічних пресів. Усі три закони Ісаака Ньютона (1642-1727) застосовуються у гідравліці, він дав наближений опис внутрішнього тертя рідини.

Даніель Бернуллі (1700-1782) встановив зв'язок між основними видами енергії для стабільного руху рідини (рівняння Бернуллі).

Леонард Ейлер (1707-1783) узагальнив рівняння Бернуллі на рух за будь-яких умов, ввів поняття кавітації.

Осборн Рейнольдс (1842-912) сформулював закон опору рідини в трубах, теорію змащування та основні положення теорії турбулентності.

Георгій Проскура (1876-1958) створив у 1934 році першу гідродинамічну трубу у Харкові, займався динамікою гідравлічних машин та методами розрахунку гідротурбін.

В системі Національної академії наук України успішно функціонує Інститут гідромеханіки. Серед інших тут розв'язуються задачі безгребельного водозабору та розрахунку теплових режимів водостоків-охолоджувачів.

### 3. Поняття про рідину і класифікація сил, що діють на неї

#### Поняття про рідини

*Рідинами* в гідравліці називають фізичні тіла, які легко змінюють свою форму при впливі на них навіть незначних поверхневих і масових сил.

Розрізняють два види умовних рідин (рис 1.1 і рис 1.2):

- *краплинні (нестискувані) рідини;*
- *газоподібні (стискувані) рідини.*

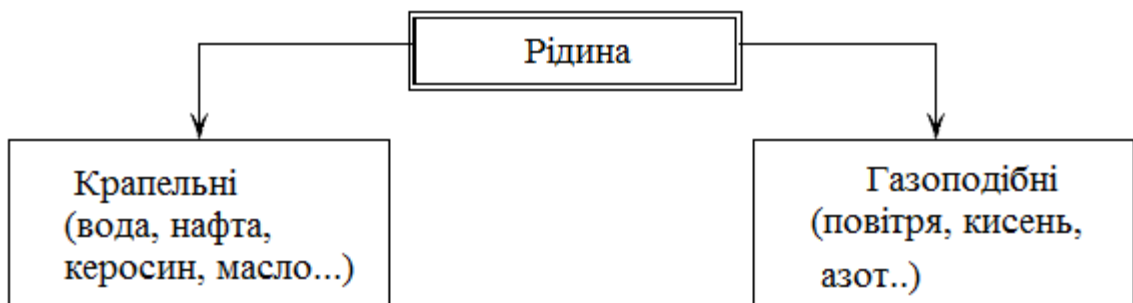


Рисунок 1.1 – Види умовних рідин в гідравліки

*Краплинні рідини* - це така фізична середовище яке в малих кількостях приймає сферичну форму, а в великих кількостях утворює вільну поверхню. Особливістю крапельних рідин є те, що вони мало змінюють свій об'єм при зміні тиску і температури, і теоретично вважаються нестисливими. До крапельних рідин відносяться такі речовини, які в стандартних умовах мають агрегатний стан - рідина (*вода, нафта, нафтові продукти*).

*Газоподібні рідини* - це така фізична середовище, яке в звичайних умовах являє собою газоподібна речовина. Газоподібні рідини здатні до

значного зменшення свого обсягу під впливом тиску і температури, а також до необмеженого розширення при відсутності тиску, тобто гази мають великим ступенем стискання. До газоподібним рідин відносяться такі речовини, які в стандартних умовах мають агрегатний стан - газ (*азот, водень, гелій, кисень, повітря*).

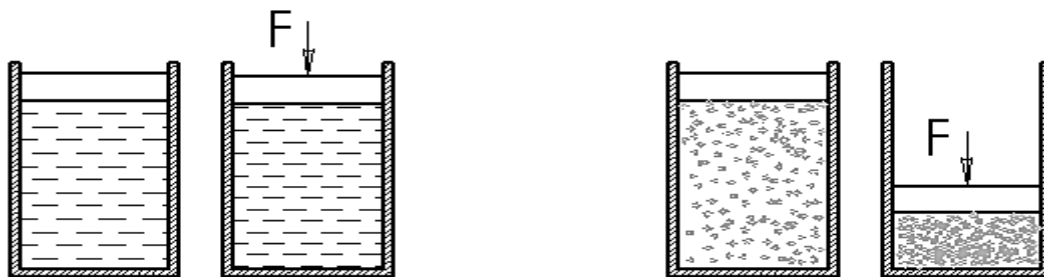


Рисунок 1.2 – Схема демонстрації крапельної (*нестискаємої*) і газоподібної (*стискаємої*) рідини

Незважаючи на відмінність двох видів рідин, закони руху крапельних рідин і газоподібних при певних умовах можна вважати однаковими, коли швидкості їх руху значно менше швидкості звуку ( $M < 0,3$ ). ( $M$  – число Маха)

У гідравліці умовно вважається, що рідина є суцільне середовище. Для цього не звертається увага на її внутрішню молекулярну будову і рух в рідині, а розглядається як рух елементарних обсягів, досить великих розмірів в порівнянні з відстанями між молекулами, як рух безперервної середовища з безперервно мінливими фізичними параметрами.

Такий прийом розгляду руху рідини відкриває широкі можливості для використання диференціальних і інтегральних методів при вирішенні практичних завдань гідравліки.

У гідравліки рідина умовно поділяють на ідеальну і реальну.

*Ідеальна рідина* - це така рідина, яка не володіє внутрішнім тертям, так як відсутній властивість в'язкості, а також відсутнє тертя об стінки судин і трубопроводів. Ідеальна рідина, крім цього, має абсолютну нестисливість. Ідеальна рідина введена в теорію гідравліки для полегшення і спрощення складання математичних моделей, проведення розрахунків і досліджень.

*Реальна рідина* - це рідина, що володіє властивостями в'язкості і стисливості.

### Сили, які діють на рідину

Так як рідина в гідравліки розглядається як суцільна безперервне середовище, що заповнює весь простір без пустот і проміжків, то при цьому не враховується молекулярну будову речовини і середовище навіть в малих



об'ємах вважається складається з великої кількості молекул, а значить суцільний.

Внаслідок плинності рідини, на неї не можуть діяти зосереджені сили, а можливо лише дію сил розосереджених по її обсягу або поверхні. У зв'язку з цим сили, що діють на даний обсяг, і є по відношенню до нього зовнішніми силами, умовно поділяються на:

- масові;
- поверхневі.

*Масові сили* - це такі сили, які пропорційні масі рідкого тіла або об'ємом для однорідної рідини.

До масових силам відносяться:

- сили тяжіння;
- сили інерції.

*Сили тяжіння* - це такі сили, які виникають під дією гравітаційного прискорення і діють на об'єм рідини постійно.

*Сили інерції* - це такі сили, які діють на обсяг рідини під дією виникаючих прискорень.

*Поверхневі сили* рівномірно розподілені по поверхні рідини і пропорційні площі цієї поверхні. Ці сили обумовлені безпосереднім впливом сусідніх об'ємів рідини на виділений обсяг або ж впливом інших тіл (*твердих або газоподібних*), що стикаються з даними рідким тілом (рис 1.3).

Нехай посудину наповнений рідиною. Якщо виділити всередині її нескінченно малий обсяг рідини, то на цей обсяг діятимуть сили з боку сусідніх, таких же нескінченно малих обсягів.

На вільну поверхню рідини діє сила атмосферного тиску. Крім цього на рідину діють сили з боку стінок посудини.

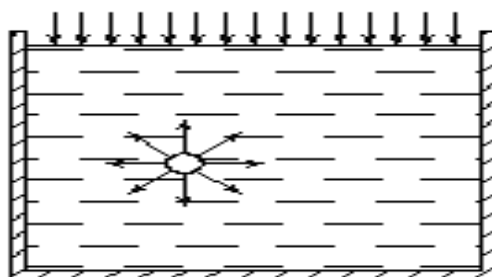


Рисунок 1.3 Схема дії на рідину поверхневих сил

У загальному випадку, на майданчик  $\Delta S$  діє поверхнева сила  $\Delta R$  під деяким кутом. Для зручності розрахунків і досліджень силу  $\Delta R$  розкладають на нормальну силу  $\Delta P$  і ковзну силу тертя  $\Delta T$  (рис 1.4).

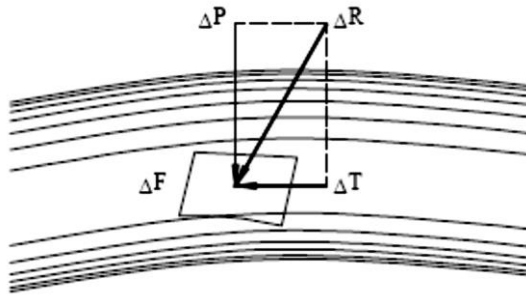


Рисунок 1.4 Схема сил, що діють на об'єми рідини

Нормальна сила  $\Delta P$  називається силою тиску. Дотична сила  $\Delta T$  називається силою тертя.

У гідромеханіці, для зручності, як масові так і поверхневі сили зазвичай розглядаються в одиничних силах, тобто віднесених до характерних розмірами.

Масові сили відносяться до одиниці маси, а поверхневі до одиниці площі. Тому одинична масова сила чисельно дорівнює прискоренню ( $g$  або  $a$ ), а одинична поверхнева сила чисельно дорівнює напрузі поверхневої сили. Умовно поверхнєве напруження розкладається на дві складові:

- нормальне;
- дотичне напруження.

Нормальним напруженням називається гідромеханічний тиск або просто тиск, в загальному випадку тиск в довільній точці рідини дорівнює відношення

$$p = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta P}{\Delta S};$$

середнє значення тиску визначається за формулою

$$p = \frac{\Delta P}{\Delta S}, \text{ Н / м}^2;$$

дотична напруження в рідині визначається за формулою

$$\tau = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{\Delta T}{\Delta S}.$$

Якщо тиск відраховується від абсолютного нуля, то воно називається абсолютним.

Якщо тиск відраховується від атмосферного тиску, то воно називається відносним або надмірним (рис 1.5).

У Міжнародній системі вимірювань (СІ), за одиницю тиску прийнятий Паскаль:  $1 \text{ Па} = 1 \text{ Н / м}^2 = 10^{-3} \text{ кПа} = 10^{-6} \text{ МПа}$

$$p_{\text{абс}} = p_a + p_{\text{над}}$$

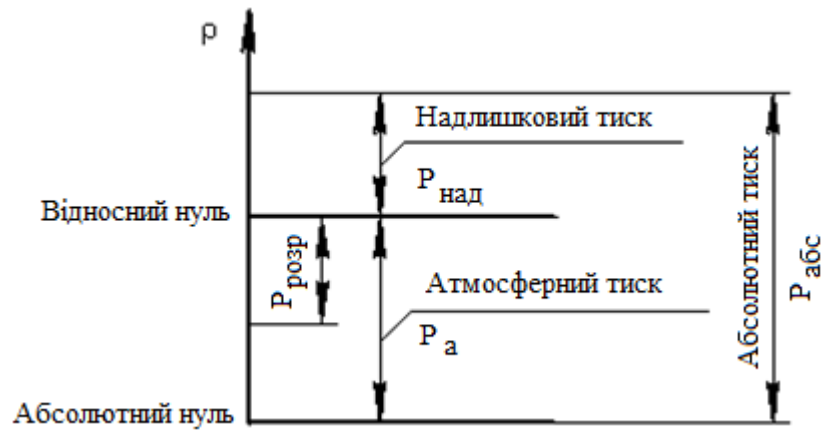


Рисунок 1.5 Схема визначення тиску в рідині

У техніці продовжує використовуватися система одиниць МКГСС, в якій за одиницю тиску прийнята:  $p = 1 \text{ кгс/см}^2$ ;  $1 \text{ Па} = 0,102 \text{ кгс/м}^2$ ;  $1 \text{ кгс/м}^2 = 9,81 \text{ Па}$

Якщо середовище знаходиться в стані спокою, то величина тиску не залежить від орієнтації майданчика в просторі, так як всі напрямки хаотичного руху молекул в просторі різновірогідні. Що виникає при цьому тиск називається статичним. Величина його характеризує енергію хаотичного руху молекул, укладених в одиниці об'єму рідини або газу. Дана енергія називається потенційною енергією сил тиску.

При русі середовища з певною швидкістю потоку  $V$ , до хаотичного руху молекул додається додаткова складова, яка називається динамічним тиском, а що виникає при цьому енергія називається кінетичною енергією, яка пропорційна швидкості потоку ( $V^2$ ).

Таким чином, повний тиск потоку ( $p_n$ ) залежить від величини і напрямку швидкості руху повітря відносно обтікаємої поверхні, тобто, від динамічного тиску ( $p_{\text{дин}}$ ) і статичного тиску в навколишньому середовищі ( $p_{\text{ст}}$ )

$$p_n = p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}},$$

$$p_{\text{дин}} = \left( \frac{\rho V^2}{2} \right).$$

Одиниці виміру тиску в різних системах виміру

*Технічна атмосфера:*

$$1 \text{ ат} = 1 = 10000 = 10 \text{ м. Вод. ст.} = 735,6 \text{ мм. рт. ст.} = 98000 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

*Фізична атмосфера:*

$$760 \text{ мм. рт. ст.} = 1,0332 = 101320 \frac{\text{кгс}}{\text{см}^2} \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}.$$

1) Для переведення величини тиску з розмірності технічної атмосфери в фізичну (з  $\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$  в мм. рт. ст.) можна використовувати спрощену формулу ведення

$$p_{\text{фіз}} = 735,6 * p_{\text{тех}}, (\text{мм рт.ст}),$$

де  $p_{\text{фіз}}$ - тиск в мм. рт. ст. ;

$$p_{\text{тех}} - \text{ТИСК В } \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}.$$

2) Для переведення величини тиску з розмірності фізичної атмосфери в технічну (з мм. рт. ст в  $\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$ ) можна використовувати спрощену формулу переведення

$$p_{\text{тех}} = \frac{p_{\text{фіз}}}{735,6}, \left( \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2} \right).$$

3) Для переведення величини тиску з розмірності технічна атмосфери в систему СИ (з  $\frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}$  в  $\frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$ ) можна використовувати спрощену формулу перерахунку

$$p_{\text{СИ}} = 9,81 * 10^4 * p_{\text{тех}}, \left( \frac{\text{Н}}{\text{м}^2} = \text{Па} \right),$$

де  $p_{\text{СИ}}$ - тиск в Па;

$$p_{\text{тех}} - \text{ТИСК В } \frac{\text{кГс}}{\text{см}^2}.$$

#### 4. Основні методи вивчення механіки рідини і газу

Ще знаменитий Галілео Галілей сказав, що набагато легше вивчити рух нескінченно віддалених від нас світил, ніж рух струмочка протікає у наших ніг.

З огляду на ці труднощі розвиток гідромеханіки йшло трьома шляхами:

- *теоретичним*, при якому на основі законів механіки, досліджуються математичні моделі, що моделюють обтікання твердих тіл потоком рідини. Теоретичний метод передбачає вивчення закономірностей руху рідини за допомогою математичних моделей, що складаються з системи диференціальних рівнянь і їх рішення. Моделі створюються на базі фізичних експериментів або теоретичних гіпотез. Правильність математичного моделювання перевіряється експериментом.

- *експериментальним*, при якому розглядаються явища такими, якими вони існують в природі, моделюються різні варіанти обтікання потоком рідини твердих тіл за допомогою спеціальних експериментальних пристроїв в лабораторних умовах. Безліч явищ, вкрай важко піддаються теоретичному аналізу, досліджуються в гідравліки чисто експериментальним шляхом, а результати таких досліджень представляються емпіричними формулами. Тому гідравліка вважається наукою напівемпіричної.

- *прикладним*, при якому з'єднуються теоретичні і експериментальні дослідження в прикладну гідравліку для використання її в практичних цілях. За результатами теоретичних і експериментальних досліджень явищ обтікання твердих тіл потоком рідини уточнюються наукові гіпотези і будуються нові більш точні моделі. Метою експериментальної і теоретичної гідравліки є вивчення фізичної сутності виникнення гідродинамічних сил і моментів, а також отримання їх величин і напрямки дії і з'єднати теоретичну гідравліку з практикою.

## 5. Основні фізичні параметри рідини і газу

Стан рідини і газу характеризується фізичними параметрами, основними з яких є наступні параметри.

### Масова щільність

Масовою щільністю рідини і газу називається відношення кількості маси речовини ( $m$ ) до одиниці об'єму  $W$  посудини в якому вони знаходяться (рис 2.1)

$$\rho = \frac{m}{W}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

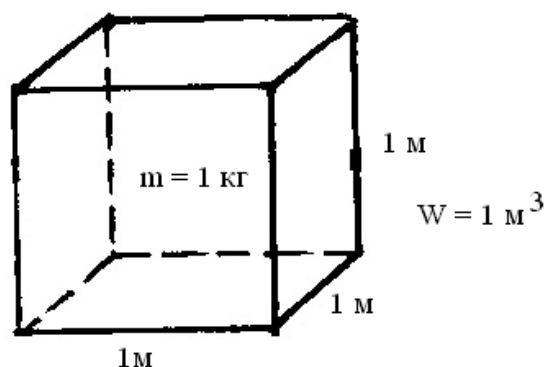


Рисунок 2.1 – Схема масової щільності речовини

У гідравліці часто використовується відносна щільність рідини -  $\Delta$ , яка дорівнює відношенню густини рідини при заданій температурі до щільності води при температурі  $t = 4^\circ\text{C}$

$$\Delta = \frac{\rho_{\text{жс}}}{\rho_{\text{води}}}.$$

Масова щільність істотно залежить від температури. Тому для

ідеальних газів має місце рівняння *Клайперона - Менделєєва*, яке характеризує рівняння стану ідеального газу, звідки випливає, що масова щільність знаходиться в зворотній залежності від температури:

$$\frac{p}{\rho} = RT, \text{ звідси } \rho = \frac{p}{RT},$$

де  $p$  - тиск газу, Па;  $T$  - температура газу,  $^{\circ}\text{K}$ ;  $\rho$  - масова щільність,  $\text{кг} / \text{м}^3$ ;

$R$  - газова постійна  $\frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}^{\circ}}$ .

### Питома вага

*Питомою вагою (об'ємною вагою) рідини і газу називається відношення ваги речовини ( $G$ ) до одиниці об'єму  $W$  посудини в якій вони знаходяться (рис. 2.2)*

$$\gamma = \frac{G}{W}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^3}.$$

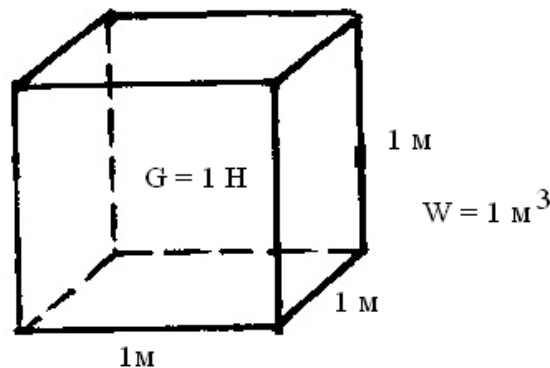


Рисунок 2.2 Схема питомої ваги речовини

Зв'язок між питомою вагою  $\gamma$  і масової щільністю  $\rho$  визначається з урахуванням другого закону Ньютона, що вага речовини рівняється  $G = m \cdot g$

$$\gamma = \rho \cdot g.$$

Числове значення питомої ваги, вираженого в  $\text{кГс}/\text{м}^3$  має однакове чисельне значення масової щільності, вираженої в  $\text{кг} / \text{м}^3$ .

### Питомий об'єм

Питомим об'ємом рідини і газу називається відношення об'єму речовини ( $W$ ) до його маси ( $m$ ), розміщеної в даному об'ємі

$$w = \frac{W}{m} \frac{\text{м}^3}{\text{кг}} \text{ або } \rho \cdot w = 1.$$

### Температура середовища

*Температурою* називається фізичний параметр, який характеризує ступінь нагрітості середовища і інтенсивність молекулярного хаотичного руху в середовищі. Чим вище температура середовища, тим швидше рухаються молекули і навпаки: чим швидше рухаються молекули, тим вище температура середовища. Для вимірювання температури середовища використовуються дві основні вимірювальні системи (рис 2.3).

1. Міжнародна (практична) температурна шкала (МПТШ) - шкала Цельсія, при якій за  $0^{\circ}\text{C}$  прийнята температура розтавання льоду, а за  $100^{\circ}\text{C}$  - температура кипіння води.

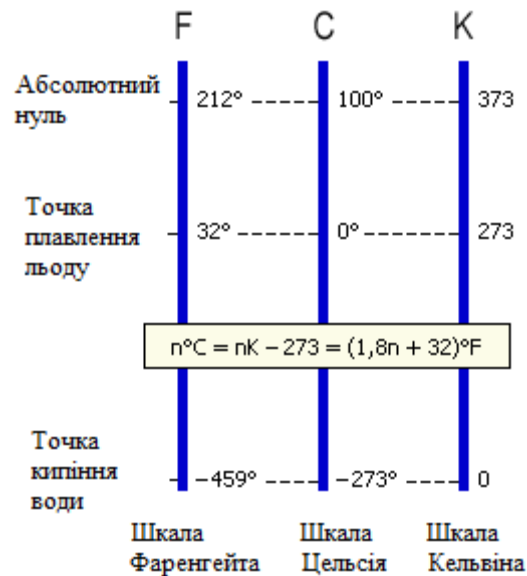


Рисунок 2.3 – Схема порівняння різних шкал вимірювання температури

2. Міжнародна термодинамічна шкала (МТДШ) - шкала Кельвіна ( $^{\circ}\text{K}$ ). За  $0^{\circ}\text{K}$  прийнята температура середовища вакууму, при якій припиняється тепловий (хаотичний) рух молекул середовища і за шкалою Цельсія вона дорівнює  $-273,16^{\circ}\text{C}$ .

Виміряна за шкалою Кельвіна температура називається абсолютною і позначається через  $T^{\circ}\text{K}$ . Залежності між використовуваними температурними системами вимірювання температури виражаються формулою

$$T^{\circ}, \text{K} = t^{\circ}, \text{C} + 273^{\circ},$$

$$t^{\circ}, \text{C} = T^{\circ}, \text{K} - 273.$$

### Національні температурні шкали

У Великобританії, США і Франції використовуються свої національні системи вимірювання температури:

У Великобританії і США використовується шкала Фаренгейта ( $^{\circ}\text{F}$ )

$$t, ^{\circ}\text{F} = \frac{9}{5} t^{\circ}\text{C} + 32 = \frac{9}{4} (t^{\circ}\text{R} + 32^{\circ}).$$

У Франції використовується шкала Реомюра ( $^{\circ}\text{R}$ )

$$t, ^{\circ}\text{R} = \frac{4}{5} t^{\circ}\text{C} = \frac{4}{9} (t^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}).$$

Переведення з національних температурних систем вимірювання в шкалу Цельсія має вигляд

$$t, ^{\circ}\text{C} = \frac{5}{4} t, ^{\circ}\text{R} = \frac{5}{9} (t^{\circ}\text{F} - 32^{\circ}).$$

### Швидкість звуку в середовищі

Швидкістю звуку називається швидкість поширення слабких хвиль збурень стиснення і розрідження в газовому або рідинному середовищі.

Нехай вихідний тиск  $p$  змінився на  $\Delta p$ , що викликало зміну щільності газу або рідини  $\rho$  на  $\Delta \rho$ , тоді швидкість звуку в повітряному середовищі

$$\frac{dp}{d\rho} = a^2.$$

Процеси поширення звукових хвиль в повітряному середовищі можна вважати адіабатним, тому рівняння має вигляд

$$p = c \cdot \rho^k,$$

де  $c$  - газова постійна;  $k = \frac{c_p}{c_w}$  - показник адіабати, (для повітря  $k = 1,41$ );

$c_p$  - питома теплоємність газу при  $p = const$ ;  $c_w$  - питома теплоємність газу при  $w = const$ .

При інтегруванні рівняння отримаємо

$$\frac{dp}{d\rho} = k \frac{c \cdot \rho^k}{\rho} = k \frac{p}{\rho},$$

$$a = \sqrt{\frac{dp}{d\rho}} = \sqrt{\frac{k \cdot p}{\rho}}.$$

Використовуючи рівняння стану газу, отримаємо формулу для визначення швидкості звуку,  $\frac{p}{\rho} = RT$

$$a = \sqrt{kRT},$$

де  $R$  - газова постійна для 1 кг газу. В системі СІ а в технічній системі.

$$R = \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \text{ або } \frac{\text{м}^2}{\text{с}^2 \cdot \text{град}}, R = \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

$$\text{Так для повітря } R = 29,27 \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot \text{град}} \text{ або } 287,14 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}.$$

Тоді формула швидкості звуку в повітряному середовищі спрощується:

$$a = 20,1 \sqrt{T}, \frac{\text{м}}{\text{с}}.$$

## 6. Основні фізико-механічні властивості рідини і газу

Розглянемо найхарактерніші для рідини основні фізико-механічні властивості.

**Стисливість** - це властивість рідини міняти свій об'єм під впливом тиску і характеризується коефіцієнтом об'ємного стиснення  $\beta_p$ , який являє собою відносну зміну об'єму, що припадає на одиницю зміни тиску:

$$\beta_p = -\frac{1}{W_0} \frac{dW}{dp}, \frac{\text{м}^2}{\text{Н}}.$$

Розглядаючи кінцеві збільшення тиску  $\Delta p = p - p_0$  і зміна об'єму  $\Delta W = W - W_0$ , отримаємо

$$W = W_0(1 - \beta_p \cdot \Delta p), \text{ м}^3.$$

З огляду на вплив тиску на масову щільність рідини отримаємо вираз

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{(1 - \beta_p \cdot \Delta p)}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3}.$$

Величина, зворотна коефіцієнту об'ємного стиснення рідини  $\beta_p$ , називається модулем пружності рідини  $E$



$$E = \frac{1}{\beta_p}, \frac{H}{M^2}.$$

Для крапельних рідин модуль пружності ( $E$ ) дещо зростає зі збільшенням температури і тиску. У більшості випадків краплинні рідини можна вважати практично нестисливими. Але при дуже високому тиску і при пружних коливаннях стисливість рідини необхідно враховувати. Стиснення рідини в основному обумовлено стисненням розчиненого в них газу. Стисливість знижує жорсткість гідроприводу, так як на стиск витрачається частина енергії. Стисливість може бути причиною виникнення автоколиваний в гідросистемі, створює запізнювання в спрацьовуванні гідроапаратури і виконавчих механізмів. Іноді стисливість рідини носить позитивний ефект - її використовують в гідравлічних амортизаторах.

*Температурне розширення* - це властивість рідини змінювати свій об'єм при зміні її температури і характеризується коефіцієнтом температурного (об'ємного) розширення  $\beta_v$ , який являє собою відносну зміну об'єму рідини при зміні температури на  $1^\circ\text{C}$  при постійному тиску  $p = \text{const}$

$$\beta_t = \frac{1}{W_0} \frac{dW}{dT}, \frac{1}{^\circ\text{K}}.$$

Розглядаючи кінцеві збільшення об'єму  $\Delta W = W - W_0$  і температури  $\Delta T = T - T_0$ , Отримуємо формулу для визначення об'єму

$$W = W_0(1 + \beta_t \cdot \Delta T).$$

З огляду на вплив температури на зміну щільності рідини отримаємо вираз

$$\rho = \rho_0 \frac{1}{(1 + \beta_t \cdot \Delta T)}.$$

*Опір розтягуванню* - являє собою фізичну властивість рідини утримувати вихідну відстань між молекулами. Усередині крапельної рідини згідно молекулярної теорії виникає опір розтягуванню, яке може бути досить значним і досягати величини  $10 \text{ Н/м}^2$ . При дослідях на очищеній і дегазованій воді були отримані короткочасні розтягування рівні  $0,23 - 0,28 \text{ Н/м}^2$ . Технічно чисті рідини не витримують навіть незначних напружень розтягу. Тому на практиці вважається, що напруження розтягу в крапельних рідинах не виникає.

*Поверхневий натяг.* На поверхні рідини діють сили поверхневого натягу, які прагнуть надати об'єму рідини сферичну форму і викликають деякий додатковий тиск в рідині (рис 2.4).

Сили поверхневого натягу обумовлені поверхневими силами і спрямовані завжди по-всередину розглянутого об'єму перпендикулярно вільної поверхні рідини. Величина додаткового тиску визначається за формулою Лапласа:

$$p = \delta \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right),$$

де  $\delta$  - коефіцієнт поверхневого натягу, дин/см;  $r_1$  і  $r_2$  - головні радіуси кривизни розглянутого елемента рідини.

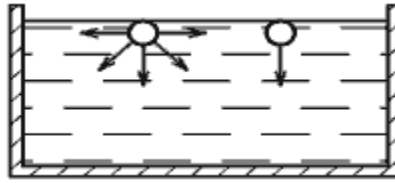


Рисунок 2.4 – Схема поверхневого натягу

Однак, цей тиск проявляється лише при малих розмірах обсягів рідини. В трубках малого діаметра це додатковий тиск викликає підйом (або опускання) рідини щодо нормального рівня. Це явище називається капілярного.

Так, *наприклад*, коефіцієнт поверхневого натягу для різних рідин ( $\sigma$ ) дорівнює: для води - 73 дин / см, спирту - 22,5 дин / см, ртуті - 490 дин / см.

Висота підйому рідини  $h$  в скляній трубці діаметром  $d$  визначається за формулою:

$$h = \frac{k}{d}, \quad (1.8)$$

де  $k$  - коефіцієнт змочуваності рідиною поверхні трубки, мм<sup>2</sup>;

$d$  - діаметр трубки, м.

Примітка. Діна — одиниця сили в системі одиниць СГС. Одна дина чисельно дорівнює силі, яка передає тілу масою в 1 грам прискорення в 1 см/с<sup>2</sup>. 1 дин = 1 г·см/с<sup>2</sup> = 10<sup>-5</sup> Н = 1,0197·10<sup>-6</sup> кгс.

Явище капілярності проявляється при використанні скляних трубок в приладах для вимірювання тиску, а також при виділенні рідини. Особливо це явище проявляється сильно в умовах невагомості.

*В'язкість. Здатність рідини чинити опір ковзанню одного її шару відносно другого називається в'язкістю.* Це властивість проявляється в тому, що в рідині при певних умовах виникають дотичні напруження. В'язкість - це властивість, протилежна плинності: більш в'язкі рідини є менш текучими, і навпаки.

$$\text{Текучість} - \eta = \frac{1}{\mu} \cdot \left( \frac{1}{\text{Па} \cdot \text{с}} \right).$$

При перебігу в'язкої рідини уздовж твердої стінки (рис 2.5) відбувається гальмування потоку, обумовлене в'язкістю. Швидкість руху шарів рідини зменшується в міру наближення до стінки трубопроводу і стає рівною «0» на поверхні стінки. Між шарами відбувається прослизання рідини, що супроводжується виникненням дотичних напружень.

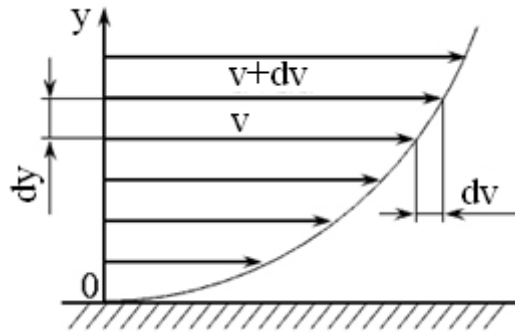


Рисунок 2.5 – Профіль швидкості при течії в'язкої рідини уздовж твердої стінки

Ковзна напруга в рідині залежать від її роду і характеру течії і при слоїстій течії змінюється прямо пропорційно до поперечного градієнту швидкості.

$$\tau = \mu \frac{dV}{dy}, \quad (1.9)$$

де  $\mu$ - коефіцієнт динамічної в'язкості,  $\text{Па} \cdot \text{с}$  ( $\text{Н} \cdot \text{сек} / \text{м}^2$ ), [пуаз];  $\frac{dV}{dy}$  - градієнт швидкості,  $\text{м/с} \cdot \text{мм}$ .

В'язкість рідини оцінюється коефіцієнтами динамічної і кінематичної в'язкості (рис 2.6).

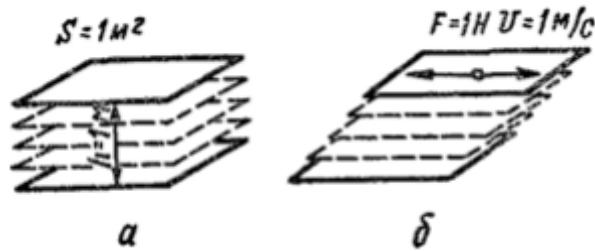
Коефіцієнт динамічної в'язкості є відношенням діючого дотичного напруження до градієнту швидкості. Коефіцієнт динамічної в'язкості ( $\mu$ ) служить мірою опору рідини течії під впливом сил тиску і масових сил

$$\mu = \frac{\tau}{\frac{dV}{dy}}, \left( \frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{М}^2} \right).$$



Рисунок 2.6 – Схема показників в'язкості рідини

За одиницю динамічної в'язкості в системі СІ прийнята в'язкість такої рідини, яка чинить опір з силою в 1 Н взаємному переміщенню двох шарів рідиною, які мають площі  $S = 1 \text{ м}^2$ , що знаходяться один від одного на відстані  $y = 1 \text{ м}$  і переміщаються з відносною швидкістю  $V = 1 \text{ м} / \text{с}$  (рис. 2.7).



*a* – стан спокою; *б* – початок руху

Рисунок 2.7 – Схема взаємного переміщення прошарків рідини

Динамічна в'язкість визначається капілярним або ротаційним віскозиметром під дією зовнішнього тиску

$$\mu = C \cdot t \cdot p, \text{ Па с (Пуаз)},$$

де *c* - поправочний коефіцієнт віскозиметра; *t* - час витікання рідини в віскозиметрі, с; *p* - середнє зовнішній тиск, Па.

Поряд з динамічною в'язкістю ( $\mu$ ) застосовується кінематична в'язкість ( $\nu$ ), яка представляє собою відношення динамічної в'язкості рідини до масової щільності при одній і тій же температурі.

Одиницею вимірювання кінематичної в'язкості є  $\text{м}^2/\text{с}$  (Стокс)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}, \frac{\text{м}^2}{\text{с}}.$$

Кінематична в'язкість служить мірою опору рідини течії під дією гравітаційних сил і визначається в капілярному віскозиметрі

$$\nu = C \cdot t, \text{ м}^2 / \text{с}$$

де *C* - поправочний коефіцієнт віскозиметра;

*t* - час витікання рідини в віскозиметрі, с.

В'язкість крапельних рідин залежить від температури і зменшується з її збільшенням. Для рідин більш в'язких, ніж вода, для вимірювання в'язкості застосовується віскозиметр Енглера. В'язкість рідини при цьому характеризується числом умовних градусів Енглера

$$1^\circ E = \frac{t}{t_{\text{води}}},$$

де  $t_{\text{води}} = 51,6 \text{ с}$ ; *t* - час закінчення досліджуваної рідини з контрольної ємності в віскозиметрі, с.

Після визначення в'язкості рідини в умовних градусах Енглера кінематична в'язкість обчислюється за емпіричною формулою

$$\nu = 0,073 \cdot {}^\circ E - \frac{0,063}{{}^\circ E}.$$

Вплив в'язкості на величину тертя вивчено І. Ньютоном і закріплено законом внутрішнього тертя, який встановлює, що сила тертя прямо пропорційна коефіцієнту динамічної в'язкості, площі контактуючих шарів рідини і градієнту швидкості і не залежить від зовнішнього тиску

$$T = \mu \cdot S \cdot \frac{dv}{dy}.$$

Облік внутрішнього тертя значно ускладнює вивчення законів руху

рідин. Із закону тертя слід, що напруга тертя можливо лише при її перебігу. У нерухомій рідині дотичні напруження дорівнюють нулю.

З метою спрощення постановки завдань і їх математичного рішення введено поняття ідеальної, або нев'язкої рідини. Ідеальна рідина характеризується відсутністю дотичних напружень і є абсолютно нестисливою.

Залежно від в'язкості рідини умовно поділяються на:

- *ньютонівські;*
- *не ньютонівські.*

*Ньютонівські* рідини, це такі рідини в яких при русі виникають ковзна напруга прямо пропорційно градієнту швидкості.

*Не ньютонівські* рідини, це такі рідини які не підкоряються закону пропорційності градієнту швидкості. Коефіцієнт динамічної в'язкості ( $\mu$ ) при цьому залежить від багатьох факторів, основними з яких є:

- *час, протягом якого на рідину діє дотичне напруження;*
- *величина чинного на рідину дотичного напруження.*

Не ньютонівські рідини умовно поділяються на три групи:

*Перша група*- рідини у яких градієнт швидкості залежить тільки від величини ковзної напруги. Розрізняють два види рідин групи I: *псевдопластичні рідини*, які підкоряються закону Освальда де Віля

$$\tau = k \cdot \left(\frac{dV}{dy}\right)^n,$$

де  $k$  і  $n$  - реологічні константи.

*Реологія* - це наука, що вивчає процеси, пов'язані з необоротними залишковими деформаціями і перебігом сильно в'язких і пластичних матеріалів.

*В'язкопластичні матеріали*, які підкоряються закону Шведова-Бінгама

$$\tau = \tau_0 + \mu \cdot \frac{dV}{dy},$$

де  $\tau_0$  - початкове дотичне напруження матеріалу, н/м<sup>2</sup>.

*Друга група* - це рідини, в'язкість яких змінюється в часі під впливом ковзної напруги;

*Третя група* - це рідини, які володіють в'язкопружними властивостями, в яких проявляються як пружні так і в'язкісні властивості.

*Випарованість рідини*. Випарованість властива всім краплинним рідинам, однак інтенсивність випаровування різних рідин неоднакова і залежить від умов, в яких знаходиться рідина.

Одним з показників, що характеризують випаровуваність рідини, є температура її кипіння при стандартному атмосферному тиску. Чим вище температура кипіння рідини, тим менше випаровуваність. Більш повною характеристикою випаровуваності вважається тиск (*пружність*) насичених парів  $p_t$ , як функція температури рідини. Зі збільшенням температури тиск насичених парів ( $p_t$ ) збільшується, проте у різних рідин в різному ступені.

*Розчинність газів в рідинах*. Характеризується об'ємом розчиненого газу в одиниці об'єму рідини і визначається за законом Генрі

$$W_r = W_{ж.} \cdot k \cdot \frac{p}{p_a},$$

де  $W_r$  - об'єм розчиненого газу, м<sup>3</sup>;  $W_{ж.}$  - об'єм рідини, м;  $k$  - коефіцієнт розчинності газу в рідині;  $p$  - тиск в рідині, Па;  $p_a$  - атмосферний тиск, Па.

Коефіцієнт розчинності ( $k$ ) при  $t = 20^\circ \text{C}$ : дорівнює: для води 0,016, гасу 0,13, мінеральних масел 0,08, рідини АМГ-10 - 0,1. При зниженні тиску з рідини виділяється розчинений в ній газ. Це явище може негативно позначатися на роботі гідросистем.

*Тиск насичених парів* - це такий тиск, який викликаний парами рідини в умовах рівноважного стану рідини і парів при заданій температурі.

*Насичений пар* - це пар, що знаходиться в стані рівноваги з рідиною, температура пару при цьому дорівнює температурі рідини.

*Інертність* - це фізична властивість газу чинити опір зміні стану відносного спокою або рівномірного прямолінійного руху (згідно 1-го закону Ньютона). Мірою інертності газу служить його масова щільність ( $\rho$ ). Чим вище щільність газу, тим більше зусилля необхідно докласти до його маси, щоб вивести частки газу з рівноважного стану.

*Текучість* - це фізична властивість рідини і газу приймати форму посудин, в яких вони знаходяться через слабкі міжмолекулярні зв'язки. Якщо відсунути стінки посудини до нескінченності, то рідина здатна розтікатися до товщини шару що дорівнює розміру молекули.

Текучість рідини являє собою величину зворотну коефіцієнту динамічної в'язкості

$$\eta = \frac{1}{\mu}, \frac{\text{м}^2}{\text{Н} \cdot \text{с}}.$$

*Питома теплоємність* - це фізична властивість газу, яка характеризується кількістю тепла, необхідного для нагрівання 1 кг газу на  $1^\circ \text{C}$ . Питома теплоємність залежить від наступних умов нагрівання.

При постійному тиску ( $p = \text{const}$ ) тепло витрачається не тільки на підвищення температури  $T$ , але і на виконання механічної роботи -  $F$  (рис 2.8).

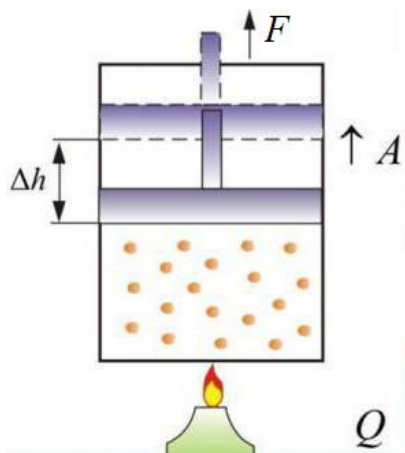


Рисунок 2.8 – Схема демонстрації питомої теплоємності при постійному тиску

При постійному об'ємі ( $W = const$ ) тепло витрачається не тільки на підвищення температури  $T$ , але і на підвищення тиску ( $p = var$ ) (рис 2.9).

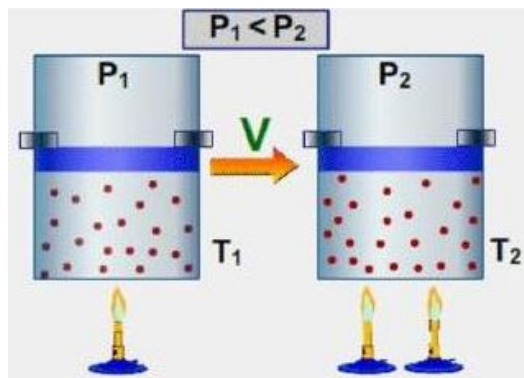


Рисунок 2.9 – Схема демонстрації питомої теплоємності при постійному об'ємі

$$Q = C_p - C_w,$$

де  $C_p$  - питома теплоємність при постійному тиску ( $p = const$ );  $C_w$  - питома теплоємність при постійному обсязі ( $W = const$ );  $Q$  - кількість тепла, що витрачається на виконання механічної роботи розширення, Дж.

Рівняння стану газу при підводі тепла

$$R = \frac{1}{A} (Cp - Cw) = \frac{1}{A} \cdot Q,$$

де  $\frac{1}{A}$  - механічний еквівалент тепла,  $\frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{ккал}}$ ;  $R$  - газова постійна, що представляє собою механічну роботу розширення  $1 \text{ кг}$  газу при нагріванні його на  $1^\circ \text{C}$ ,

Для повітря  $R = 287,4, \frac{\text{кгс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot ^\circ \text{C}} \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{K}^0}$ .