

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

**Циклова комісія аеронавігації**

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни

**«Основи аеродинаміки та динаміки польоту»**

обов'язкових компонент

освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

**Технології робіт та технологічне обладнання аеропортів**

272 Авіаційний транспорт

за ТЕМОЮ 1- Основні поняття і співвідношення аерогідрогазодинаміки.  
Фізико-механічні властивості рідин і газів

**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*  
*№ 1*

**Розробник:** професор навчального відділу КЛК ХНУВС, викладач циклової комісії аеронавігації, к. т. н., с. н. с., спеціаліст вищої категорії, викладач – методист, Тягній В. Г.

**Рецензенти:**

1 Головний науковий співробітник ТОВ «Науково-виробниче об'єднання» «АВІА», к.т.н., с.н.с., Зінченко В. П.

2 Професор навчального відділу КЛК ХНУВС, викладач-методист циклової комісії енергозабезпечення та систем управління, к. т. н., професор, спеціаліст вищої категорії, Гаврилюк Ю. М.

**ЛЕКЦІЯ 1.1: Загальні відомості про рідину і газ.**  
**Фізико-механічні властивості і параметри рідини і газу**

**План лекції:**

- 1 Основні фізичні властивості рідини і газу.
- 2 Основні фізико – механічні параметри рідини і газу.

**Рекомендована література:**

**Основна:**

1. Котельніков Г. Н., Мамлюк О. В., Аеродинаміка літальних апаратів. Підручник. -К.: Вища школа, 2002. – 255 с.
2. Навчальний посібник «Аеродинаміка та динаміка польоту вертольота». Частина I, «Аеродинаміка вертольота» / А. Г. Зінченко, О. О. Бурсала, О. Л. Бурсала та ін.; за заг. ред. А. Г. Зінченка. – Х.: ХНУПС, 2016.–402 с.: іл.
3. Навчальний посібник «Аеродинаміка та динаміка польоту вертольота». Часть II, «Динаміка польоту вертольота». / А. Г. Зінченко, І. Б. Ковтонюк, В. М. Костенко та ін.; за загальною редакцією В. М. Костенка та І. Б. Ковтонюка. – Х.: ХУПС, 2010. – 272 с.: іл.
4. Опорний конспект з навчальної дисципліни «Аеродинаміка, динаміка польоту та практична аеродинаміка». Частина I «Аеродинаміка вертольоту». Автор: Пчельников С. І.
5. Опорний конспект з навчальної дисципліни «Аеродинаміка, динаміка польоту та практична аеродинаміка». Частина II «Динаміка польоту». Автор: Пчельников С.І.
6. Аеродинаміка літальних апаратів: навчальний посібник /О.О. Бурсала. А. Г. Зінченко, Є. Ю. Іленко, І. Б. Ковтонюк, А. Л. Сушко – Х.: ХУПС, 2015. -333 с.: іл.
7. Лебідь В. Г., Миргород Ю. І., Аерогідрогазодинаміка. Підручник Х.: ХУПС, 2006. – 350 с.
8. Тягній В. Г., Ємець В. В., Основи аеродинаміки та динаміки польоту, частина I, Аерогідрогазодинаміка. Навчальний посібник, КЛК ХНУВС, 2022. – 384 с.

**Допоміжна:**

1. Ковалев Е. Д., Удовенко В. А., Основи аеродинаміки і динаміка польоту легких вертольотів. Навчальний посібник. - Х.: КБ Аерокоптер, 2008. – 280 с.

### **Інформаційні ресурси**

Інформаційні ресурси в Інтернеті

<http://csm.kiev.ua/nd/nd.php?b=1>

#### **Технічні засоби**

1. Багатофункціональний плазмовий телевізор.
2. Персональний комп'ютер.
3. Мультимедійний проектор.

#### **Наочні посібники**

4. Опорний конспект лекцій.
5. Електронний конспект лекцій.
6. Презентація окремих тем дисципліни.
7. Схеми та таблиці по темам дисципліни.
8. Зразки інформаційної та службової документації.
9. Навчальні фільми за тематикою дисципліни «Основи аеродинаміки та динаміки польоту».
10. Стенди і плакати за тематикою дисципліни «Основи аеродинаміки та динаміки польоту».
11. Курс лекцій по дисципліні «Основи аеродинаміки та динаміки польоту»
12. Начальний посібник по дисципліні “Аерогідрогазодинаміка”.

## Текст лекції

### ЛЕКЦІЯ 1.1: ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РІДИНУ І ГАЗИ. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ПАРАМЕТРИ РІДИНИ І ГАЗУ

#### План лекції:

##### 1.1.1 Основні фізичні властивості рідини і газу

##### 1.1.2 Основні фізико-механічні параметри рідини і газу

#### 1.1.1 Основні фізичні властивості рідин і газів

##### 1.1.1.1 Поняття про фізичну структуру рідини і газу

**Рідиною** називається фізичне тіло, яке характеризується певними властивостями, а саме:

- наявністю певного об'єму, як тверде тіло;
- відсутністю певної форми, як газ.

За фізичним станом розрізняють два види рідин (*рис 1.1.1*):

- краплинні (нестисливі) рідини;
- газоподібні (стиливі) рідини.

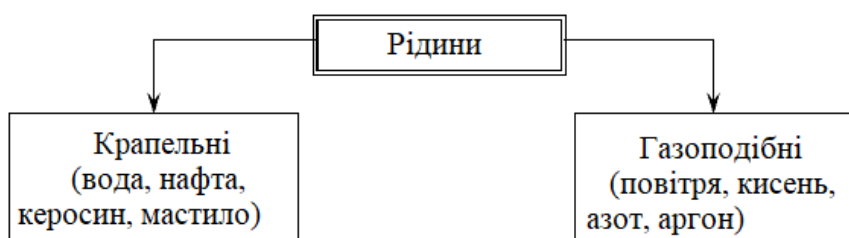


Рис 1.1.1 Умовна класифікація видів рідин

Краплинні рідини - це фізичний стан речовини, яка в малих об'ємах приймає форму сфери, а в великих об'ємах утворюють вільну поверхню. Особливістю крапельних рідин є те, що вони мало змінюють свій об'єм при сильній зміні тиску і температури, вони вважаються практично нестисливими (*рис 1.1.2*). До крапельних рідин відносяться речовини, які в нормальних стандартних умовах мають агрегатний стан - *рідини*.

Газоподібні рідини - це фізичний стан речовини, які в нормальних стандартних умовах мають агрегатний стан газу. Газоподібні рідини здатні до значного зменшення свого об'єму під дією тиску (*рис 1.1.2*) і необмеженому розширенню при зменшенні тиску і збільшенні температури, вони мають властивість стисливості.

Крапельна рідина чинить опір стисненню, так при зміні тиску і температури об'єм рідини змінюється мало. Рідина із-за слабких сил взаємозв'язку між молекулами практично не чинить опір деформації зсуву і має унікальну фізичну властивість - *плинності*. Завдяки цій властивості рідина не має власної форми і приймає форму того посуду, в якому вона знаходиться. Рідина і газ не чинять опору повільної і незначній деформації зсуву. У той же час при швидких деформаціях зсуву сили опору досягають великих розмірів. Рідина на відміну від газу може чинити опір розтягуючим зусиллям. У газі таких зусиль не виникає.

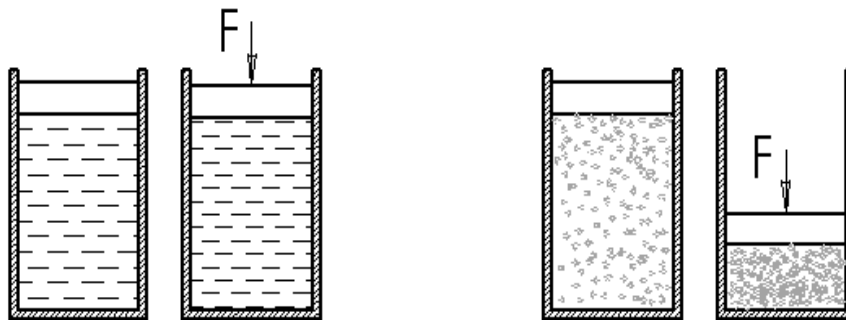


Рис 1.1.2 Схема демонстрації властивостей крапельної і газоподібної рідин

Незважаючи на відмінність крапельної і газоподібної рідин, закони руху їх за певних умов можна вважати однаковими, а саме коли швидкості їх течії невеликі в порівнянні зі швидкістю звуку ( $M < 0,3$ ).

У аерогідрогазодинаміці розглядаються ідеальна і реальна рідини.

**Ідеальна рідина** - це такий фізичний стан речовини (*віртуальний*), який не має властивості в'язкості і абсолютною нестислива. Ідеальна рідина введена в теорію аерогідрогазодинаміки математиком, професором Санкт-Петербурзької академії наук Л. Ейлером для полегшення і спрощення складання математичних моделей обтікання рідиною твердих тіл, а також спрощення проведення досліджень і розрахунків.

**Реальна рідина** - це такий фізичний стан речовини, який має властивості в'язкості і стисливості.

При вивченні властивостей і явищ аеродинаміки як навколишнього середовища розглядається в основному газове середовище, так як повітря являє собою суміш певних газів.

Фізична сутність процесів взаємодії потоку рідини з твердим тілом, виникнення аеродинамічних сил і моментів, а також їх величина і напрямки дії залежать від фізичних властивостей середовища.

До фізичних властивостей рідини відносяться:

- інертність, в'язкість;
- стисливість, плинність;
- питома теплоємність.

Багато фізичні властивості рідини, що визначають їх стан, характеризуються фізично-механічними параметрами, а саме:

- температурою, тиском;
- щільністю, швидкістю звуку;
- вологістю.

### 1.1.1.2 Характеристика фізичних властивостей рідини

#### 1.1.1.2.1 Інертність

*Інертність* - це фізична властивість рідини чинити опір зміні стану відносного спокою або рівномірного прямолінійного руху (згідно 1-го закону Ньютона).

Мірою інертності рідини служить його масова щільність. Чим вище щільність рідини, тим більше зусилля необхідно прикласти до її маси, щоб вивести з рівноважного стану.

#### 1.1.1.2.2 В'язкість

*В'язкість* - це фізична властивість рідини чинити опір відносному зсуву її шарів. Фізичною суттю в'язкості є сили внутрішнього тертя. Зі збільшенням температури газу його в'язкість збільшується, внаслідок збільшення хаотичного руху частинок газу і перемішування шарів газу по товщині (висоті) середовища.

При наявності в'язкості швидкості переміщення сусідніх шарів рідини відносно один одного неоднакова. (рис 1.1.3)

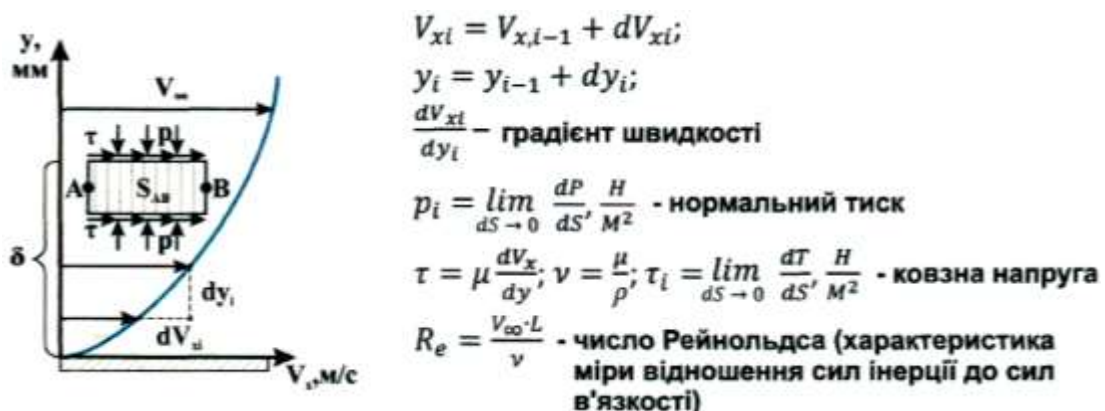


Рис 1.1.3 Схема зміни повздовжньої швидкості потоку по товщині примежового шару

$$V_{xi} = V_{xi-1} + dV_{xi}$$

Розглянемо дію зовнішніх сил на плоску пластину, площею  $S_{AB}$  (рис 1.1.3).

З боку верхніх шарів на пластину  $AB$  площею  $S_{AB}$  діє нормальна сила тиску ( $P$ ).

**Шар, в якому відбувається зміна швидкості течії по мірі віддалення від обтікаємої поверхні твердого тіла до швидкості незбуреного потоку називається примежовим шаром.**

Внаслідок наявності дотичної сили ( $T$ ) уздовж обтікаємої поверхні  $S_{AB}$  швидкості течії по товщині примежового шару змінюються, таким чином має місце градієнт швидкості течії рідини по товщині шару.  $\frac{dV_x}{dy}$ .

**Сила** нормального тиску дорівнює добутку нормального тиску на площу поверхні пластини

$$P = p * S_{AB}, = H, (\kappa \Gamma c)$$

Між шарами рідини виникає дотичне напруження, яке викликає силу тертя, спрямовану по дотичній до поверхні  $AB$  на площі  $S_{AB}$ .

$$T = \tau * S_{AB}, = H, (\kappa \Gamma c)$$

**Дотичним напруженням** рідини називається фізичний параметр, який показує відношення сили тертя  $T$  до площі поверхні  $S_{AB}$  по дотичній до неї.

$$\tau = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{dT}{dS}, \quad \frac{H}{m^2}, \text{ Па}$$

Згідно гіпотези Ньютона про закон внутрішнього тертя при шаруватій течії потоку дотичне напруження тертя визначається за формулою:

$$\tau = \mu \frac{dV_x}{dy}$$

де

$\mu$  - динамічний коефіцієнт в'язкості,  $\frac{H \cdot c}{m^2}$

$\frac{dV_x}{dy}$  - градієнт швидкості по товщині примежового шару,  $\frac{m}{c \cdot mm}$ .

В'язкість рідини оцінюється коефіцієнтами динамічної ( $\mu$ ) і кінематичної ( $\nu$ ) в'язкості, вплив температури на в'язкість рідини оцінюється параметром градусу Енглера ( $E$ ) (рис 1.1.4).

Коефіцієнт динамічної в'язкості приставляє собою відношення діючого дотичного напруження до градієнту швидкості. коефіцієнт ( $\mu$ ) служить мірою опору рідини течією під впливом сил тиску і масових сил.

Динамічний коефіцієнт в'язкості є вимірником в'язкості рідини під дією гравітаційних сил і сил зовнішнього тиску. Величина коефіцієнта динамічної в'язкості визначається капілярним або ротаційним віскозиметрами:

$$\mu = C * t * p, \text{ Па } c, (\text{Пуаз})$$

де

$C$  - поправочний коефіцієнт віскозиметра;



$t$  - час закінчення перетікання рідини,  $c$ ;  
 $p$  - зовнішній тиск що діє на рідину,  $Па$ .

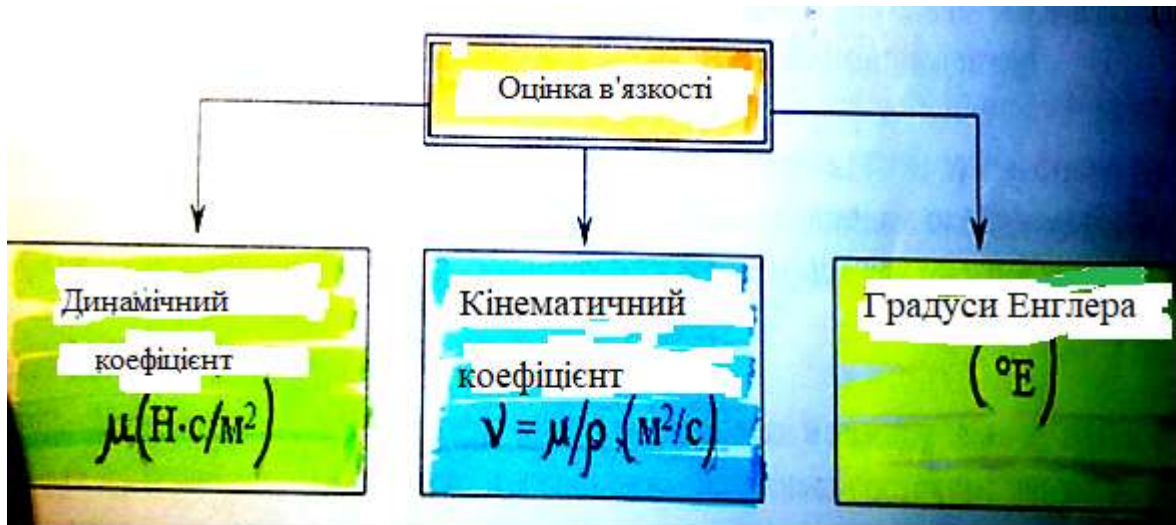


Рис 1.1.4 Схема показників в'язкості рідини

За одиницю динамічної в'язкості в системі СІ прийнята в'язкість такої рідини, яка чинить опору з силою в  $1 Н$  взаємному переміщенню двох шарів рідиною, що мають площі  $S = 1 м^2$ , що знаходяться один від одного на відстані  $y = 1 м$  і переміщуються з відносною швидкістю  $V = 1 м/с$  (рис 1.1.5).

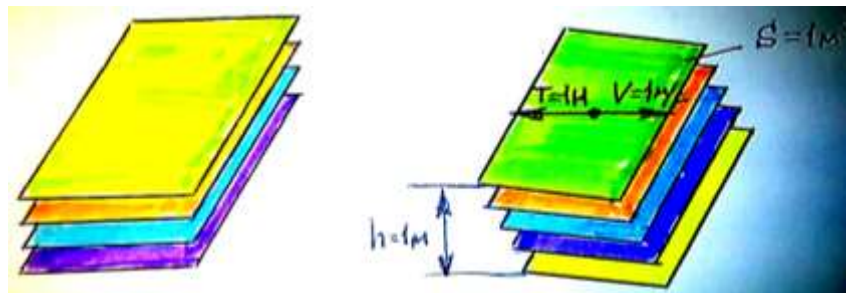


Рис 1.1.5 Схема визначення динамічної в'язкості

Часто в аеродинаміці використовується кінематичний коефіцієнт в'язкості, який є вимірником в'язкості рідини тільки під дією гравітаційних сил. Величина коефіцієнта кінематичної в'язкості визначається капілярним віскозиметром:

$$\nu = C * t, м^2/с, \text{ або } \nu = \frac{\mu}{\rho}, \frac{м^2}{с}, м^2/с, (\text{або Стокс})$$

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

характеризується числом умовних градусів Енглера:

$$1^{\circ}E = \frac{t}{t_{води}}$$

де

$t_{води} = 51,6 \text{ с}$  - водяне число.

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

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

Характеристикою ступеня прояву сил інерції по відношенню до сил в'язкості є число Рейнольдса - **Re**.

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot L}{\nu}$$

де

$L$  - характерний лінійний розмір обтічного тіла ( $l, d, b$ ), м;

$V_{\infty}$  - швидкість незбуреного потоку рідини, м/с;

$\nu$  - кінематичний коефіцієнт в'язкості,  $\text{м}^2/\text{с}$ , (Стокс).

Зі збільшенням числа Рейнольдса (**Re**) знижується вплив в'язкості середовища при обтіканні твердих тіл. При  $\nu = 0$   $Re \uparrow \rightarrow \infty$  рідина вважається ідеальною, яка не має в'язкості.

1 Задача: 1.1.1:

1) Об'єм  $W = 200 \text{ см}^3$  мінерального масла при температурі  $t = + 500^{\circ}\text{C}$  вітікає із віскозіметра Енглера за годину  $\tau = 327 \text{ с}$ . Водне число приладу рівняється  $\tau = 51 \text{ с}$ . Масова Густина масла рівняється  $\rho = 910 \text{ кг/м}^3$ . Визначити умовну в'язкість масла в  $^{\circ}\text{ВУ}$ , коефіцієнт кінематичної в'язкості  $\nu$  і коефіцієнт динамічної в'язкості  $\mu$ .

#### 1.1.1.2.3 Стисливість

**Стисливість** - це фізична властивість речовини змінювати свій обсяг і щільність при дії на нього тиску і температури.

Стисливість крапельної рідини характеризується коефіцієнтом об'ємного стиснення ( $\beta_p$ ), який являє собою відносну зміну об'єму рідини, що припадає на одиницю зміни тиску:

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

де

$W_0$  - первинний об'єм рідини,  $\text{м}^3$ ;

$dW$ - зміна обсягу при зміні тиску,  $\text{м}^3$ ;

$dp$  - зміна тиск в рідині,  $\text{Па}$ .

Розглядаючи кінцеві збільшення тиску  $\Delta p = p - p_0$  і зміна про  $\Delta W = W - W_0$ ,  
Отримаємо:

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

Або враховуючи вплив тиску на щільність рідини отримаємо вираз:

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

2 Задачі: 1.1.2:

1) Визначити відносну зміну масової густини нафти при її стисканні від  $p_1 = 1 \cdot 10^5$  до  $p_2 = 1 \cdot 10^6$  Па, якщо коефіцієнт об'ємного стискання нафти рівняється  $\beta_p = 7,4 \cdot 10^{-10} \text{ Па}^{-1}$ .

2) Визначити зміну тиску і масову густину в кінці стискання, при якому початковий об'єм води зменшився на **2,5%**, об'ємний коефіцієнт стискання рівняється  $5,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Г}$ , первинна масова густина складає **920 кг/м<sup>3</sup>**.

3) Посудину заповнено водою об'ємом **3000 л**, як зміниться об'єм при збільшенні тиску на **250 кгс/см<sup>2</sup>** і масова густина. Коефіцієнт об'ємного стискання рівняється  $47,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{кгс}$ , первинна масова густина - **940 кг/м<sup>3</sup>**.

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

$$E = \frac{1}{\beta_p}, \frac{\text{Н}}{\text{м}^2}$$

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 повітря і парів рідини.

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

3 Задачі: 1.1.3:

1) Визначити зміну об'єму масла з підвищенням тиску в циліндрі на  $\Delta p = 25 \text{ кгс/ см}^2$ , якщо перед цим масло містилось в масивною товстостінному циліндрі з внутрішнім діаметром  $d = 30 \text{ мм}$  и довжина  $l = 40 \text{ дм}$ . Модуль пружності масла  $E = 1,33 \text{ ГПа}$ .

2) Визначити зміну тиску, при якому початковий об'єм води зменшився на **25%**, об'ємний коефіцієнт стискання рівняється  $4,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}$ .

**Характеристикою стисливості** газоподібної рідини служить число Маха -  $M$ .

$$M = \frac{V}{a}$$

За ступенем стискання швидкість газового потоку умовно розділяється на діапазони:

- $V < a, M < 1$  - дозвуковий;
- $V \approx a, M \approx 1$  - трансзвуковий;
- $V > a, M > 1$  - надзвуковий;
- $V \gg a, M \gg 1$  - гіперзвуковий.

#### 4 Задача: 1.1.4

1) Визначити число Маха і число Рейнольдса на висоті **10000 м**, якщо швидкість літака рівняється **900 км/год**, коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря на висоті рівняється  **$3,55 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$** , хорда крила - **1,5 м**.

Властивість протилежна стисливості називається *розширенням*.

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

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

де

$W_0$  - первинний об'єм рідини,  $\text{м}^3$ ;

$dW$  - зміна обсягу при зміні температури,  $\text{м}^3$ ;

$dT$  - зміна температури в рідині,  $^\circ\text{K}$ .

Розглядаючи кінцеві збільшення обсягу  $\Delta W = W - W_0$  і температури  $\Delta T = T - T_0$ , Отримуємо формулу для визначення обсягу:

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

З огляду на вплив температури на зміну щільності рідини отримаємо вираз:

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

#### 5 Задачі: 1.1.5

1) Визначити зміну об'єму в резервуарі при нагріванні її від температури  $t_1 = + 20^\circ\text{C}$  до  $t_2 = + 40^\circ\text{C}$ . Первинний об'єм води рівняється  $W_0 = 100 \text{ м}^3$ . Коефіцієнт об'ємного розширення в заданому інтервалі температур при тиску  $p = 10^5 \text{ Па}$  рівняється  $\beta_t = 0,00029 \text{ } ^\circ\text{K}^{-1}$ .

2) Мінеральне мастило підводиться до гідродвигуна при температурі  $+30^{\circ}\text{C}$  в кількості **10 л/с**. За гідродвигуном температура масла рівняється  $+70^{\circ}\text{C}$ . Яка кількість мастила зливається з гідродвигуна, якщо його температурний коефіцієнт об'ємного розширення рівняється  $6,5 \cdot 10^{-4} 1/^{\circ}\text{K}$ .

3) Визначити масову густину води при збільшенні температури від  $+15^{\circ}\text{C}$  до  $+40^{\circ}\text{C}$ , коефіцієнт об'ємного розширення рівняється  $0,00031 1/^{\circ}\text{K}$ , масова густина при температурі  $+40^{\circ}\text{C}$  рівняється  $960 \text{ кг/м}^3$ .

#### 1.1.1.2.4 Плинність

**Плинність ( $\eta$ )** - це фізична властивість рідини приймати форму посудин, в яких вона знаходиться через слабкі міжмолекулярні зв'язки. Якщо розширити стінки посудин до нескінченності, то рідина розтечеться до товщини шару рівному розміру молекули. **Плинність** - це властивість рідини зворотна динамічному коефіцієнту в'язкості.

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

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

**1 При постійному тиску ( $p = \text{const}$ )** - ( $C_p$ ) тепло витрачається не тільки на підвищення температури газу ( **$T$** ), а й на виконання механічної роботи (рис 1.1.6).

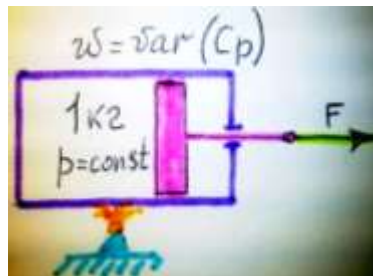


Рис 1.1.6 Схема питомої теплоємності при постійному тиску

**2 При постійному об'ємі ( $W = \text{const}$ )** - ( $C_w$ ) тепло витрачається не тільки на підвищення температури газу ( **$T$** ), але і на підвищення тиску ( **$p = \text{var}$** ) (рис 1.1.7).

$$Q = C_p - C_w$$

де

$C_p$  - питома теплоємність при постійному тиску ( **$p = \text{const}$** ).

$C_w$  - питома теплоємність при постійному обсязі ( $W = \text{const}$ ).

$Q$  - кількість тепла, що витрачається на вчинення механічної роботи розширення, **ккал**.

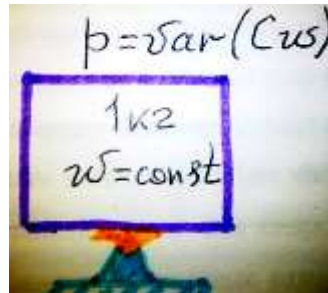


Рис.1.1.7 Схема питомої теплоємності при постійному об'ємі

Рівняння стану газу при підведенні тепла:

$$R = \frac{1}{A} (c_p - c_w) = \frac{1}{A} \cdot Q$$

де

$\frac{1}{A}$  - механічний еквівалент тепла,  $\frac{\text{кГс}\cdot\text{м}}{\text{ккал}}$

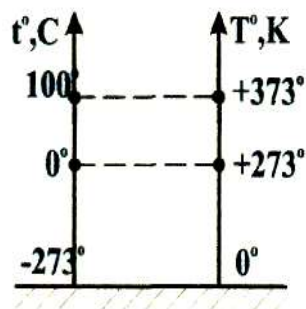
$R$  - газова постійна, що представляє собою механічну роботу розширення  $1 \text{ кг}$  газу при нагріванні його на  $1^\circ \text{C}$ ,  $\frac{\text{кГс}\cdot\text{м}}{\text{кг}\cdot^\circ\text{C}}$

## 1.1.2 Характеристика фізичних параметрів газу

### 1.1.2.1 Температура середовища

Температурою називається фізичний параметр, який характеризує ступінь нагрітості середовища і інтенсивність молекулярного хаотичного руху в рідині (*газі*). Чим вище температура середовища, тим швидше рухаються молекули і навпаки: чим швидше рухаються молекули, тим вище температура середовища.

Для вимірювання температури середовища в світі використовуються дві основні вимірювальні системи (рис 1.1.8):



$$T^0, \text{K} = t^0, \text{C} + 273^0;$$

$$t^0, \text{C} = T^0, \text{K} - 273^0;$$

$$t^0, \text{F} = \frac{9}{5} t^0, \text{C} + 32 - \text{по Фаренгейту};$$

$$t^0, \text{R} = \frac{4}{5} t^0, \text{C} - \text{по Реомюру}$$

Рис 1.1.8 Схема порівняння різних шкал вимірювання температури

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

**2 Міжнародна термодинамічна шкала (МТДШ) - шкала Кельвіна ( $^{\circ}\text{K}$ )**

За  $0^{\circ}\text{K}$  прийнята температура середовища вакууму, при якій практично повністю припиняється тепловий (хаотичний) рух молекул середовища і за шкалою Цельсія вона дорівнює **мінус  $273,16^{\circ}\text{C}$** .

Вимірювана за шкалою Кельвіна температура називається абсолютною і позначається через  $T^{\circ}\text{K}$ .

Залежності між використовуваними температурними системами вимірювання температури виражаються формулою:

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

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

**3 Національні температурні шкали**

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

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

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

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

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

Переклад з національних температурних систем вимірювання в шкалу Цельсія має вигляд:

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

Закон зміни температури повітря в тропосфері по висоті атмосфери:

$$t_n = t_0 - 6,5 * H;$$

6 Задачі: 1.1.6:

1) Визначити на скільки градусів і у скільки разів підвищилась температура газу за шкалами Цельсія і Кельвіна, якщо при стисканні газу в циліндрі температура підвищилась від температури  $+30^{\circ}\text{C}$  до  $+300^{\circ}\text{C}$ .

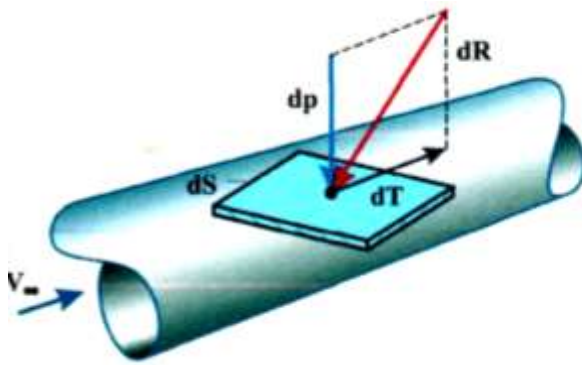
2) Визначити швидкість польоту літака на висоті, при температурі **мінус  $50^{\circ}\text{C}$** , якщо температура на землі рівняється  $+15^{\circ}$ , число Маха рівняється **0,8** на висоті польоту.

**1.1.2.2 Тиск**

**Тиском речовини** називається фізичний параметр який представляє собою силу, діючу на одиницю площі, перпендикулярно до її поверхні (рис 1.1.9).



Якщо виділити в потоці рідини (*газу*) нескінченно-малу площадку площею  $dS$ , то в *м.А* на неї буде діяти сила тиску ( $dP$ ) і ковзна сила (*тертя*) ( $dT$ ).



$$p = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{dP}{dS}; p_{\text{ср}} = \frac{\Delta P}{\Delta S};$$

$$p_n = p_{\text{ст}} + p_{\text{дин}}; B = 735.6 \cdot p;$$

Технічна атмосфера

$$1_{\text{ат}} = 1 \text{ кгс/см}^2 = 10 \text{ м.в.в.ст.} = 735,6 \text{ мм.рт.ст.}$$

$p$  – тиск в  $\frac{\text{кгс}}{\text{см}^2}$ ;  $B$  – тиск в мм.рт.ст.

Фізична атмосфера

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

Рис 1.1.9 Схема виникнення нормальних і ковзних сил

На підставі гіпотези про безперервність середовища тиск розподілений по площі поверхні визначається за формулою:

$$p = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{dP}{dS}$$

При стаціонарному режимі руху потоку нормальна сила тиску ( $\Delta P$ ) діє на площадку поверхні площею ( $\Delta S$ ), тоді середня величина тиску в межах цієї поверхні буде дорівнювати:

$$p_{\text{ср}} = \frac{\Delta P}{\Delta S}$$

Якщо рідина знаходиться в стані спокою, то величина тиску в ній не залежить від орієнтації площадки в просторі, так як всі напрямки хаотичного руху молекул різновірогідні. Тиск, що виникає при цьому називається статичним. Величина його характеризує енергію хаотичного руху молекул, що знаходиться в одиниці об'єму рідини. Дана енергія називається потенційною енергією сил тиску.

При прямолінійному русі рідини з певною швидкістю потоку  $\vec{V}$ , до швидкості хаотичного руху молекул додається додаткова складова, і в сумі вони викликають виникнення динамічного тиску, при цьому виникає енергія що називається кінетичної енергією, яка пропорційна швидкості потоку ( $V^2$ ).

**Таким чином, повний тиск дорівнює сумі динамічного і статичного тисків і залежить від величини і напрямку швидкості руху рідини щодо обтічної поверхні:**

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

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

Закон зміни нормального тиску повітря по висоті тропосфери:



$$p_n = p_0^* \frac{16,8 - H}{16,8 + H}$$

Тиск вимірюється в одиницях систем вимірювання:

1 Технічна атмосфера:

$$1 \text{ ат} = 1 = 10000 = 10 \text{ м.вод.ст.} = 735,6 \text{ мм.рт.ст.} = 98000 \text{ Па} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{см}^2} \frac{\text{кг} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$$

2 Фізична атмосфера:

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

Для переведення величини тиску з розмірності однієї системи вимірювання в іншу використовуються спрощені формули:

$$p_{\text{физ}} = 735,6 \cdot p_{\text{тех}}, (\text{мм. рт.ст.});$$

$$p_{\text{тех}} = \frac{p_{\text{физ}}}{735,6}, (\text{кгс} / \text{м}^2);$$

$$p_{\text{СИ}} = p_{\text{тех}} \cdot 9,81 \cdot 10^4, (\text{Н} / \text{м}^2, \text{Па}).$$

де

$p_{\text{физ}}$  - тиск, мм. рт. ст.;

$p_{\text{тех}}$  - тиск, кгс / см<sup>2</sup>;

$p_{\text{СИ}}$  - тиск в Па.

7 Задачі 1.1.7:

1) Літак летить на висоті, що відповідає температурі навколишнього середовища  $t_{\text{нв}} = \text{мінус } 35^0 \text{ C}$  зі швидкістю  $V = 720 \text{ км/год}$ . Визначити повний тиск, що діє на елементи конструкції ЛА.

2) У польоті на висоті  $H = 3000 \text{ м}$  на літак діє повний тиск  $p^* = 103 \text{ кПа}$ . Визначити швидкісний тиск, що діє на літак і швидкість польоту літака.

### 1.1.2.3 Масова щільність, питома вага і питомий об'єм речовини

Масова щільність - це фізичний параметр речовини, який характеризує ступінь концентрації його маси в одиниці визначеного об'єму (рис 1.1.10).

$$\rho = \lim_{\Delta W \rightarrow 0} \frac{\Delta m}{\Delta W}$$

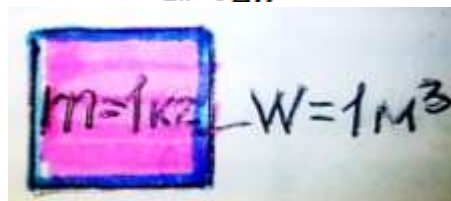


Рис 1.1.10 Схема виникнення масової щільності

Маса речовини є мірою його інертності, а масова щільність є показником його інертності.

$$\rho = \frac{m}{W}, \frac{\text{кг}}{\text{м}^3} \left( \frac{\text{кгс} \cdot \text{с}^2}{\text{м}^4} \right)$$

де

$m$  - маса повітря,  $\text{кг}$ ;

$W$  – об'єм повітря,  $\text{м}^3$ .

Масова щільність залежить від температури. Тому для ідеальних газів має місце рівняння Клайперона - Менделєєва, яке характеризує рівняння стану газу, звідки випливає, що масова щільність знаходиться в зворотній залежності від температури:

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

Відносна густина газу характеризує відношення масової щільності на певній висоті до масової щільності на рівні світового океану.

$$\Delta = \frac{\rho_n}{\rho_0}$$

На рівні світового океану  $H_0 = 0 \text{ км}$ ;  $T_0 = 288^0 \text{ К}$ ;  $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ;  
 $p_0 = 101320 \text{ Па}$ .

Закон зміни масової щільності по висоті тропосфери:

$$\rho_n = \rho_0 \cdot \frac{20-H}{20+H}$$

Питома (об'ємна) вага - це фізичний параметр, який характеризує ступінь концентрації ваги речовини, в одиниці визначеного об'єму (рис 1.1.11):

$$\gamma = \frac{G}{W} = \frac{m \cdot g}{W} = \rho \cdot g, \frac{\text{Н}}{\text{м}^3} \left( \frac{\text{кгс}}{\text{м}^2} \right)$$

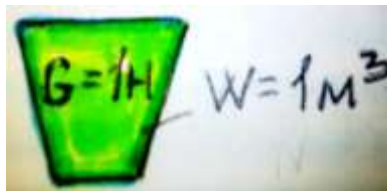


Рис 1.1.11 Схема визначення питомої ваги

Питомий об'єм - це фізичний параметр, який характеризує величину об'єму речовини, що займає його одиниця маси

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

8 Задачі 1.1.8:

1) Визначити масову густину, питому вагу і питомий об'єм, якщо вага газу рівняється  $7 \text{ Г}$ , а об'єм циліндра складає  $0,9 \text{ л}$ .

- 2) Визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря на висоті **10000 м**, якщо коефіцієнт динамічної в'язкості на цій висоті рівняється  **$1,457 \cdot 10^{-5} \text{ Н с/м}^2$** .
- 3) Визначити число Маха і швидкісний тиск, якщо швидкість польоту літака на висоті **8000 м** рівняється **720 км/год**.
- 4) Визначити тиск, масову густину і швидкість звуку на висоті, якщо температура на землі рівняється  **$+10^0 \text{ С}$** , а на висоті **мінус  $40^0 \text{ С}$** .
- 5) Визначити питомий об'єм, питому вагу і масову густину повітря на виході із сопла ТРД, якщо відомо, що тиск рівняється  **$1,2 \text{ кгс/см}^2$** , а температури  **$500^0 \text{ С}$** .
- 6) Тиск повітря на виході із компресора ТРД рівняється  **$10 \text{ кгс/см}^2$** , температура  **$+400^0 \text{ С}$** . Визначити питомий об'єм, масову густину і питому вагу повітря.
- 7) Визначити вагу повітря, яке надійшло в циліндр, якщо об'єм циліндра при русі поршня вниз рівняється **4 л**, тиск і температура в кінці такту всмоктування рівняється  **$1,5 \text{ кгс/см}^2$  і  $90^0 \text{ С}$** .
- 8) У скільки разів зменшиться об'єм газу в циліндрі в процесі стискання, якщо перед стисканням тиск і температура рівнялися  **$1,8 \text{ кгс/см}^2$  і  $35^0 \text{ С}$** , а в кінці стискання тиск і температура рівнялися  **$16 \text{ кгс/см}^2$  і  $600^0 \text{ С}$** .
- 9) Визначити вагу повітря, що міститься в бортовому балоні гальмівної системи вертольоту, якщо об'єм балону рівняється **6 л**, тиск рівняється  **$190 \text{ кгс/см}^2$** , а температура  **$+ 35^0 \text{ С}$** .

#### **1.1.2.4 Швидкість звуку в середовищі**

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

Нехай зміна тиску  **$p$**  на  **$\Delta p$**  → викликало зміну щільності газу або рідини  **$\rho$**  на  **$\Delta \rho$** , тоді:

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

Процеси поширення звукових хвиль в повітряному середовищі можна вважати ізоентропічними, тому рівняння матиме 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 ізоентропи отримаємо:

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

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

Використовуючи рівняння стану газу  $\frac{p}{\rho} = RT$ , отримаємо  $a = \sqrt{kRT}$ ,

де

$R$  - газова постійна для  $1 \text{ кг}$  газу.

Для повітря в системі СІ:  $R = 287,14 \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{K}}$ , а в технічній

системі:  $R = 29,27 \frac{\text{кГс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$ . Тоді формула швидкості звуку в повітряному середовищі спрощується:

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

Закон зміни швидкості звуку в повітряному середовищі за висотою в тропосфері:

$$a_n = a_0 - 4 * H$$

9 Задачі 1.1.9:

1) Визначити у скільки разів підвищилась швидкість звуку повітря, якщо при стисканні його в циліндрі температура підвищилась від температури  $+20^\circ\text{C}$  до  $+500^\circ\text{C}$ .

2) Визначити, як зміниться максимальна швидкість польоту літака, якщо число Маха рівняється  $0,75$ , а температура повітря змінюється від мінус  $30^\circ\text{C}$  до  $+50^\circ\text{C}$ .

3) Визначити висоту польоту, якщо швидкість звуку на землі рівняється  $340 \text{ м/с}$ , на висоті польоту **310 м/с**, а також масову густину на визначеній висоті.

### 1.1.2.5 Вологість

*Вологістю* називається фізичний параметр, який визначає масову кількість водяного пару, що знаходяться в одиниці об'єму повітря.

*Абсолютна вологість* - це фізичний параметр, який визначає масу водяного пару, що містяться в **1 см<sup>3</sup>** об'єму повітря.

*Відносна вологість* - це фізичний параметр, який визначає відношення абсолютної вологості до маси водяного пару, яка необхідна для насичення **1 см<sup>3</sup>** повітря при заданій температурі.

**Формули спрощеного розрахунку основних параметрів повітря в тропосфері:**

$$t_n = t_0 - 6,5 * H; p_n = p_0 * \frac{16,8-H}{16,8+H}; \rho_n = \rho_0 * \frac{20-H}{20+H}; a_n = a_0 - 4 * H; a = 20,1 * \sqrt{T}$$

де:

$H$ - висота в км;  $T$  - температура повітря в  $^{\circ}K$ ;

$t_0$ ;  $p_0$ ;  $\rho_0$ ;  $a_0$  - стандартні значення: температури, тиску, масової щільності і швидкості звуку повітря на рівні світового океану:  $t^0 = 288^{\circ}K$ ;  $p^0 = 101320 \text{ Па}$ ;  $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$ ;  $a_0 = 340,14 \text{ м/с}^2$ .