

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

Циклова комісія аеронавігації

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

з навчальної дисципліни
«Принципи польоту (Аерогідрогазодинаміка)»
обов'язкових компонент
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
Аеронавігація

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

Харків 2021

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 23.09.2021 № 8

СХВАЛЕНО

Методичною радою Кременчуцького
льотного коледжу Харківського
національного університету внутрішніх
справ
Протокол від 22.09.2021 № 2

ПОГОДЖЕНО

Секцією Науково-методичної ради
ХНУВС з технічних дисциплін
Протокол від 22.09.2021 № 8

Розглянуто на засіданні циклової комісії аеронавігації, протокол від 10.09.2021
№ 2

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 Професор Кременчуцького Державного національного університету ім.
Михайла Остроградського, д. ф - м. н., професор, лауреат Державної премії
України в галузі науки і техніки, Єлізаров О. І.

2 Викладач-методист циклової комісії природничих дисциплін КЛК
ХНУВС, к. т. н., доцент, спеціаліст вищої категорії, лауреат Державної премії
України в галузі науки і техніки, Лісовенко В. Д.

ЛЕКЦИЯ 1.3: Загальні відомості про рідину і газу. Фізико-механічні властивості і параметри рідини і газу

План лекції:

- 1 Основні фізичні властивості рідини і газу.
- 2 Основні фізичні параметри рідини і газу.

Рекомендована література:

Основна література:

- 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 заг. 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.

Допоміжна література:

- 1 Мхитарян А. М., Аеродинаміка. Підручник. - М.: Машинобудування, 1968. – 430 с.
- 2 Кокуніна Л. Х., Основи аеродинаміки. Підручник. - М.: Транспорт, 1976. – 208 с.
- 3 Прицкер Д. М., Сахаров Г. И., Аеродинаміка. Підручник. - М.: Машинобудування, 1968. – 310 с.
- 4 Володко А. М., Вертолiт в особливій ситуації. Підручник. – М.:

Транспорт, 1992. – 262 с.

- 5 Володко А. М., Безпека польотів вертольотів. Підручник. – М.: Транспорт, 1981. – 224 с.
- 6 Володко А. М., Горшков В. А. Вертольоти: Довідник по аеродинаміці, динаміці польоту вертольоту. Навчальний посібник. – М.: Воєнвидат, 1992. – 557 с.
- 7 Алаян О. М., Ромасевич В. Ф., Аеродинаміка і динаміка польоту вертольоту. Підручник. - М.: Воєнвидат, 1973. – 446 с.
- 8 Бураго Г. Ф. Аеродинаміка, Ч.1. Підручник. - М.: ВПА ім. М. Є. Жуковського, 1957. – 350 с.
- 9 Вотяков В. Д., Аеродинаміка ЛА і гідравліка їх систем, Ч.1. Аеродинаміка. Підручник. - М.: ВПА ім. М. Є. Жуковського, 1972. – 652 с.
- 10 Дьяченко А. А., Літальні апарати і безпека польоту. Підручник. - М.: ВПА ім. М. Є. Жуковського, 1987. – 626 с.
- 11 Базов Д. И., Аеродинаміка вертольотів. Підручник. - М.: Транспорт, 1972. – 184 с.
- 12 Ромасевич В. Ф., Самойлов Г. А., Практична аеродинаміка вертольотів. Підручник. - М.: Воєнвидат, 1984. – 484 с.
- 13 Володко А. М., Основи льотної експлуатації вертольотів. Аеродинаміка. Підручник. - М.: Транспорт, 1984. – 256 с.
- 14 Ковалев Е. Д., Удовенко В. А., Основи аеродинаміки і динаміка польоту легких вертольотів. Навчальний посібник. - Х.: КБ Аерокopter, 2008. – 280 с.
- 15 Нашукевич А. В., Аеродинаміка літака. Підручник. - М.: Воєнвидат, 1966. – 208 с.
- 16 Мхитарян А. М., Збірник задач по курсу “Аеромеханіка”. Навчальний посібник - К.: КПЦА, 1976. – 100 с.

Нормативна література:

- 1 ДСТУ 22499 - 77. Апарати винтокрилі. Механіка польоту в атмосфері. Терміни. Визначення і літерні позначення. Видавництво стандартів, 1981.
- 2 ДСТУ 23281 - 78. Аеродинаміка летальних апаратів. Терміни. Визначення і літерні позначення. Видавництво стандартів, 1981.
- 3 ДСТУ 20058 - 80. Динаміка літальних апаратів в атмосфері. Терміни. Визначення і літерні позначення. Видавництво стандартів, 1976.
- 4 ДСТУ 23199 - 80. Газодинаміка. Терміни. Визначення і літерні позначення. Видавництво стандартів, 1978.
- 5 ДСТУ 221890 - 76. Фюзеляж, крила і оперіння літаків і вертольотів. Терміни. Визначення і літерні позначення. Видавн. стандартів, 1976.

ЛЕКЦІЯ 1.3: ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО РІДИНУ І ГАЗИ. ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ І ПАРАМЕТРИ РІДИНИ І ГАЗУ

План лекції:

1.3.1 Основні фізичні властивості рідини і газу

1.3.2 Основні фізичні параметри рідини і газу

1.3.1 Основні фізичні властивості рідин і газів

1.3.1.1 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 1.3.1):

- краплинні (нестискувані) рідини;
- газоподібні (стикуємі) рідини.

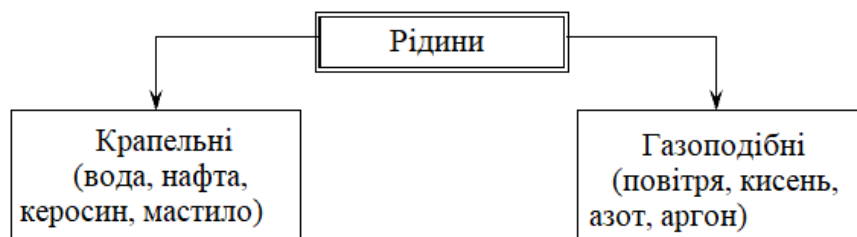


Рис 1.3.1 Умовні види рідин

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 1.3.2). 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 1.3.2) і необмеженому розширенню при зменшенні тиску, 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 - плинність. 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.

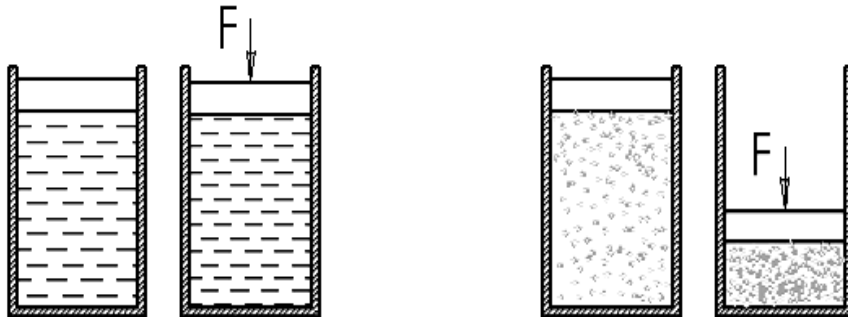


Рис 1.3.2 Схема демонстрації властивостей крапельної і газоподібної рідин

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*), яке 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, яка 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 фізичними параметрами, а саме:

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

1.3.1.2 Характеристика фізичних властивостей рідини

1.3.1.2.1 Інертність

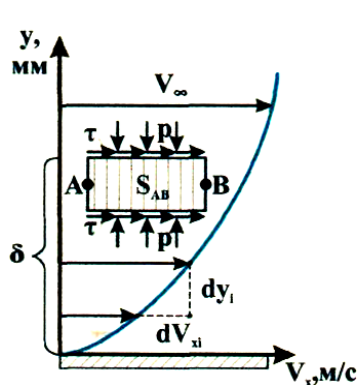
Інертність - це фізична властивість рідини чинити опір зміні стану відносного спокою або рівномірного прямолінійного руху (згідно 1-го закону Ньютона).

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

1.3.1.2.2 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 1.3.3)



$$V_{xi} = V_{x,i-1} + dV_{xi};$$

$$y_i = y_{i-1} + dy_i;$$

$$\frac{dV_{xi}}{dy_i} - \text{градієнт швидкості}$$

$$p_i = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{dP}{dS} \cdot \frac{H}{M^2} - \text{нормальний тиск}$$

$$\tau = \mu \frac{dV_x}{dy}; \nu = \frac{\mu}{\rho}; \tau_i = \lim_{dS \rightarrow 0} \frac{dT}{dS} \cdot \frac{H}{M^2} - \text{ковзна напруга}$$

$$Re = \frac{V_{\infty} \cdot L}{\nu} - \text{число Рейнольдса (характеристика міри відношення сил інерції до сил в'язкості)}$$

Рис 1.3.3 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 1.3.3).

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

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

Внаслідок наявності дотичної сили (T) уздовж 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

$$P = p * S_{AB}, \text{ Н, (кГс)}$$

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

$$T = \tau * S_{AB}, \text{ Н, (кГс)}$$

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

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

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

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

де

μ - динамічний коефіцієнт в'язкості, $\frac{\text{Н} \cdot \text{с}}{\text{м}^2}$

$\frac{dv_x}{dy}$ - градієнт швидкості по товщині примежового шару, $\frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{мм}}$.

В'язкість рідини оцінюється коефіцієнтами динамічної (μ) і кінематичної (ν) в'язкості, вплив температури на в'язкість рідини оцінюється параметром градус Енглера ($^{\circ}E$) (рис 1.3.4).

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

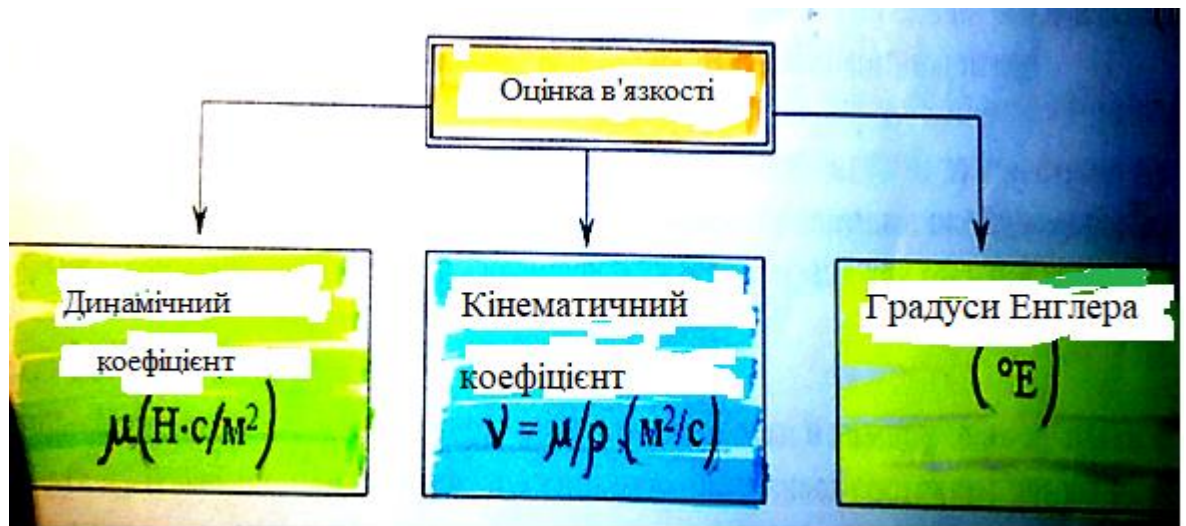


Рис 1.3.4 Схема показників в'язкості рідини

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 $S = 1\text{ м}^2$, що знаходяться один від одного на відстані $y = 1\text{ м}$ і переміщуються з відносною швидкістю $V = 1\text{ м/с}$ (рис 1.3.5).

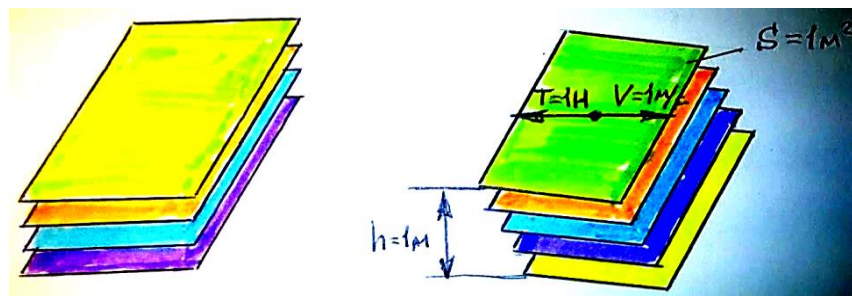


Рис 1.3.5 Схема визначення динамічної в'язкості

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:

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

де

C - поправочний коефіцієнт віскозиметра;

t - час закінчення досліджуваної рідини, с;

p - зовнішній тиск що діє на рідину, Па.

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:

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

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:

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

де

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

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_{∞} - швидкість незбуреного потоку рідини, м/с;

ν - кінематичний коефіцієнт в'язкості, м²/с, (Стокс).

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

1 Задачі: 1.3.1:

- 1) Об'єм $W = 200 \text{ см}^3$ мінерального масла при температурі $t = + 50^{\circ}\text{C}$ витікає із віскозиметра Енглера за годину $\tau_m = 327 \text{ с}$. Водне число приладу рівняється $\tau_v = 51 \text{ с}$. Масова Густина масла рівняється $\rho = 910 \text{ кг / м}^3$. Визначити умовно в'язкість масла в ОВУ, коефіцієнт кінематичної в'язкості ν и коефіцієнт динамічної в'язкості μ .

1.3.1.2.3 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 (β_p), який являє собою відносну зміну об'єму рідини, що припадає на одиницю зміни тиску:

$$\beta_p = -\frac{1}{W_0} \frac{dW}{dp}, \frac{m^2}{H};$$

де

W_0 - первинний об'єм рідини, m^3 ;

dW - зміна обсягу при зміні тиску, m^3 ;

dp - зміна тиск в рідині, $Па$.

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

$$W = W_0(1 - \beta_p \cdot \Delta p), m^3$$

Або враховуючи вплив тиску на щільність рідини отримаємо вираз:

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

2 Задачі: 1.3.2:

- 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 масової густини в кінці стискання, при якому початковий об'єм води зменшився на 2,5%, об'ємний коефіцієнт стискання рівняється $\beta_p = 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Г}$, первинна масова густина складає $920 \text{ кг}/\text{м}^3$.
- 3) Посудину заповнено водою об'ємом $W = 3000$ л, як зміниться об'єм при збільшенні тиску на $\Delta p = 250 \text{ кгс}/\text{см}^2$ і масова густина. Коефіцієнт об'ємного стискання рівняється $\beta_p = 47,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{кгс}$, первинна масова густина – $\rho = 940 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Величина, зворотна коефіцієнту об'ємного стиснення крапельної рідини β_p , називається модулем пружності рідини E :

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

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 β_p , називається модулем пружності рідини E :

3 Задачі: 1.3.3:

- 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 масивному товстостінному циліндрі з внутрішнім діаметром $d = 30 \text{ мм}$ і 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 $\beta_p = 4,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{Н}$.

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: 1.3.4

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

1.3.1.2.4 Температурне розширення

Властивість протилежне стисливості називається розширенням.

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

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

де

W_0 - первинний об'єм рідини, м^3 ;

dW - зміна об'єму при зміні температури, м^3 ;

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

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: 1.3.5:

- 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 $\beta_t = 0,00029 \text{ 1/}^{\circ}\text{K}$.
- 2) Мінеральне мастило підводиться до гідродвигуна при температурі $t_1 = + 30^{\circ}\text{C}$ в кількості $Q_w = 10 \text{ л/с}$. За гідродвигуном температура масла рівняється $t_2 = + 70^{\circ}\text{C}$. Яка кількість мастила зливається з гідродвигуна, якщо його температурний коефіцієнт об'ємного розширення рівняється $\beta_t = 6,5 \cdot 10^{-4} \text{ 1/}^{\circ}\text{K}$.
- 3) Визначити масову густину води при збільшенні температури від $t_1 = + 15^{\circ}\text{C}$ до $t_2 = + 40^{\circ}\text{C}$, коефіцієнт об'ємного розширення рівняється $\beta_t = 0,00031 \text{ 1/}^{\circ}\text{K}$, масова густина при температурі $t_2 = + 40^{\circ}\text{C}$ рівняється $\rho = 960 \text{ кг/м}^3$.

1.3.1.2.4 Плинність

Плинність (η) - 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.

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

1.3.1.2.5 Питома теплоємність- це фізична властивість газу, яка характеризується кількістю витрачається тепла, необхідного для нагрівання 1 кг газу на 1°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 1.3.6).

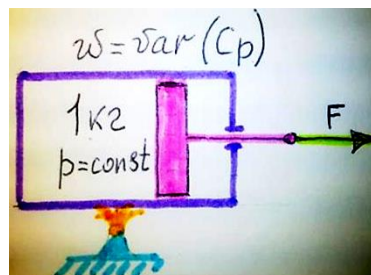


Рис 1.3.6 Схема питомої теплоємності при постійному тиску

2 При постійному об'ємі ($W = const$) - (C_w) тепло витрачається не тільки на підвищення температури газу (T), але і на підвищення тиску ($p = var$) (рис 1.3.7).

$$Q = C_p - C_w$$

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 вчинення механічної роботи розширення, ккал.

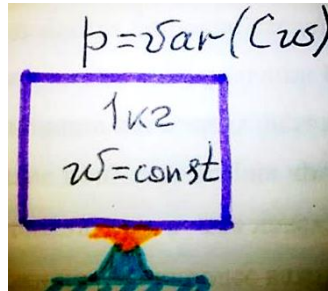


Рис.1.3.7 Схема питомої теплоємності при постійному об'ємі

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, $\frac{\text{кГс} \cdot \text{м}}{\text{ккал}}$

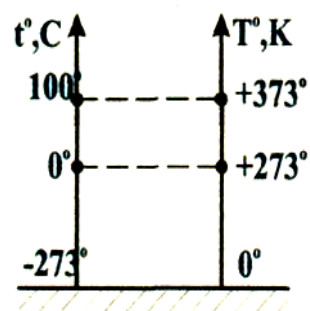
R - газова постійна, що представляє собою механічну роботу розширення 1 кг газу при нагріванні його на 1°C , $\frac{\text{кГс} \cdot \text{м}}{\text{кг} \cdot ^\circ\text{C}}$

1.3.2 Характеристика фізичних параметрів газу

1.3.2.1 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 1.3.8):



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

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

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

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

Рис 1.3.8 Схема порівняння різних шкал вимірювання температури

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

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

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

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

Залежності між використовуваними температурними системами вимірювання температури виражаються формулою:

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

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

3 Національні температурні шкали

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

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

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

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

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

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

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

Закон зміни температури повітря в тропосфері по висоті атмосфери:

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

6 Задачі: 1.3.6:

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°C , якщо температура на землі рівняється $+15^{\circ}$, число Маха рівняється **0,8** на висоті польоту.

1.3.2.2 Тиск

Тиском речовини називається фізичний параметр який представляє собою силу, діючу на одиницю площі, перпендикулярно до її поверхні (рис 1.3.9).

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

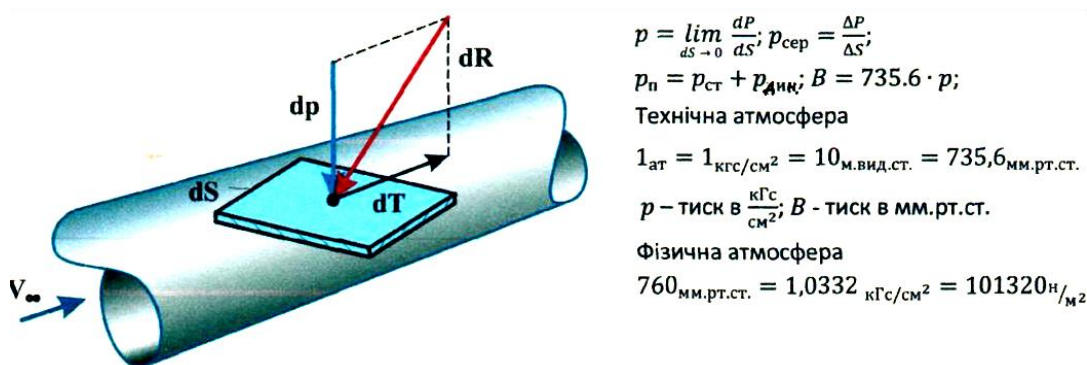


Рис 1.3.9 Схема виникнення нормальних і ковзних сил

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 (ΔP) діє на площадку поверхні площею (ΔS), 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:

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

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

Закон зміни нормального тиску повітря по висоті тропосфери:

$$p_{\text{н}} = p_0^* \frac{16,8 - H}{16,8 + H};$$

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:

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

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

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

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

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

де

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

$p_{\text{тех}}$ - тиск, кгс/см²;

$p_{\text{СИ}}$ - тиск, Па.

7 Задачі: 1.3.7:

- 1) Літак летить на висоті, що відповідає температурі навколишнього середовища $t_{\text{нв}} = \text{мінус } 35^{\circ}\text{C}$ 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.

1.3.2.3 Масова густина, питома вага і питомий об'єм речовини

Масова густина - це фізичний параметр речовини, який характеризує ступінь концентрації його маси в одиниці визначеного об'єму.

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

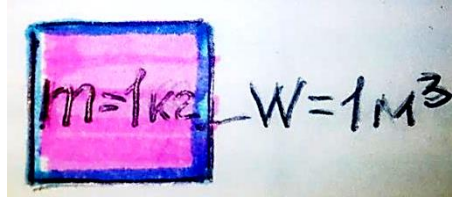


Рис 1.3.10 Схема виникнення масової густини

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

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

де

m - маса повітря, кг;

W – об'єм повітря, м³.

Масова щільність істотно 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.

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

На рівні світового океану $H_0 = 0$ км: $T_0 = 2880\text{K}$; $\rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3$; $p_0 = 101320 \text{ Па}$.

Закон зміни масової щільності по висоті тропосфери:

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

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

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

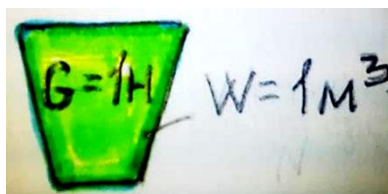


Рис 1.3.11 Схема визначення питомої ваги

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

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

8 Задачі: 1.3.8:

- 1) Визначити масову густину, питому вагу і питомий об'єм, якщо вага газу рівняється $G = 7 \text{ Г}$, а об'єм циліндра складає $W = 0,9 \text{ л}$.
- 2) Визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря на висоті $H = 10000 \text{ м}$, якщо коефіцієнт динамічної в'язкості на цій висоті рівняється $\mu = 1,457 \cdot 10^{-5} \text{ Н с/м}^2$.
- 3) Визначити число Маха і швидкісний тиск, якщо швидкість польоти літака на висоті $H = 8000 \text{ м}$ рівняється $V = 720 \text{ км/год}$.
- 4) Визначити статичний тиск, масову густину і швидкість звуку на висоті, якщо температура на землі рівняється $t = +10^\circ\text{C}$, а на висоті $t_n = \text{мінус } 40^\circ\text{C}$.
- 5) Визначити питомий об'єм, питому вагу і масову густину повітря на виході із сопла ТРД, якщо відомо, що тиск рівняється $p = 1,2 \text{ кгс/см}^2$, а температури $t = 500^\circ\text{C}$.
- 6) Тиск повітря на виході із компресора ТРД рівняється $p = 10 \text{ кгс/см}^2$, температура $t = +400^\circ\text{C}$. 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 $W = 4 \text{ л}$, тиск і температура в кінці такту всмоктування рівняється $p = 1,5 \text{ кгс/см}^2$ і $t = 90^\circ\text{C}$.
- 8) У скільки разів зменшиться об'єм газу в циліндрі в процесі стискання, якщо перед стисканням тиск і температура рівнялися $p_1 = 1,8 \text{ кгс/см}^2$ і $t_1 = 35^\circ\text{C}$, а в кінці стискання тиск і температура рівнялися $p_2 = 16 \text{ кгс/см}^2$ і $t_2 = 600^\circ\text{C}$.
- 9) Визначити вагу повітря, що міститься в бортовому балоні гальмівної системи вертольоти, якщо об'єм балону рівняється $W = 6 \text{ л}$, тиск рівняється $p = 190 \text{ кгс/см}^2$, а температура $t = +35^\circ\text{C}$.

1.3.2.4 Швидкість звуку в середовищі

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

Нехай зміна тиску p на $\Delta p \rightarrow$ викликало зміну щільності газу або рідини ρ 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 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:

$$a_n = a_0 - 4 \cdot H$$

9 Задачі: 1.3.9:

- 1) Визначити у скільки разів підвищилась швидкість звуку повітря, якщо при стисканні його в циліндрі температура підвищилась від $t_1 = + 20^\circ\text{C}$ до $t_2 = + 500^\circ\text{C}$.

- 2) Визначити, як зміниться максимальна швидкість польоту літака, якщо число Маха рівняється $M = 0,75$, а температура повітря змінюється від $t_1 = \text{мінус } 30^{\circ}\text{C}$ до $t_2 = + 50^{\circ}\text{C}$.
- 3) Визначити висоту польоту, якщо швидкість звуку на землі рівняється $a_0 = 340 \text{ м/с}$, на висоті польоту $a_n = 310 \text{ м/с}$, а також масову густину на визначеній висоті.

1.3.2.5 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^3 об'єму повітря.

Відносна вологість - це фізичний параметр, який визначає відношення абсолютної вологості до маси водяного пару, яка необхідна для насичення 1 см^3 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 $^{\circ}\text{K}$;

t_0 ; p_0 ; ρ_0 ; a_0 - стандартні значення: температури, тиску, масової густини і швидкості звуку повітря на рівні світового океану:

$$t^0 = 288^{\circ}\text{K}; p^0 = 101320 \text{ Па}; \rho_0 = 1,225 \text{ кг/м}^3; a_0 = 340,14 \text{ м/с}^2.$$