

**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
272 Авіаційний транспорт

за ТЕМОЮ 2- Основи кінематики і динаміки рідини 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 30.08.2023 № 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 2.3: Рівняння стану і нерозривності потоку рідини і газу

План лекції:

- 1 Рівняння стану середовища і взаємозалежність фізичних параметрів потоку.
- 2 Рівняння нерозривності рухомого потоку. (Рівняння Л. Ейлера)

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

- 1 Опорний конспект лекцій.
- 2 Електронний конспект лекцій.
- 3 Презентація окремих тем дисципліни.
- 4 Схеми та таблиці по темам дисципліни.
- 5 Зразки інформаційної та службової документації.
- 6 Навчальні фільми за тематикою дисципліни «Принципи польоту (Аерогідрогазодинаміка)».
- 7 Стенди і плакати за тематикою дисципліни «Принципи польоту (Аерогідрогазодинаміка)».
- 8 Курс лекцій по дисципліні «Принципи польоту (Аерогідрогазодинаміка)»
- 9 Начальний посібник по дисципліні “Аерогідрогазодинаміка”.

Текст лекції

ЛЕКЦІЯ 2.3: РІВНЯННЯ СТАНУ І НЕРОЗРИВНОСТІ ПОТОКУ РІДИНИ І ГАЗУ

План лекції:

2.3.1 Рівняння стану середовища і взаємозалежність фізичних параметрів потоку

*2.3.2 Рівняння нерозривності потоку, що рухається
(Рівняння Л. Ейлера)*

2.3.1 Рівняння стану потоку і взаємозалежність фізичних параметрів потоку

Стан газу, як робочого тіла, характеризується певними значеннями параметрів стану: тиском (p), температурою (T) і питомим об'ємом (w) чи масової щільністю (ρ).

Використовуючи основне рівняння молекулярно-кінетичної теорії газів можна встановити взаємозв'язок між параметрами ідеального газу в будь-якому термодинамічному стані.

Зміна хоча б одного із параметрів призводить до зміни інших параметрів.

В загальному вигляді зв'язок між термодинамічними параметрами може бути представлена залежністю: $f(p, T, w, \rho) = 0$.

Залежність, що зв'язує основні параметри стану ідеального газу називається рівнянням стану газу і має вигляд:

$$p \cdot w = R \cdot T, \text{ звідси}$$

$$\frac{p}{\rho} = R \cdot T, \text{ або } \rho \cdot w = 1$$

де

p - тиск газу, Па;

w - питомий об'єм, м³/кг;

T - температура газу, °К;

ρ - масова щільність, кг/м³;

$R = 287,14, \frac{\text{Дж}}{\text{кг} \cdot \text{град}}$ газова постійна, характеризує природу конкретного газу

і не залежить від параметрів його стану.

Рівняння отримано шляхом об'єднання окремих законів *Бойля-Маріотта* і *Гей-Люссака* до загального закону і воно отримало назву рівняння *Клайперона-Менделєєва*.

Для визначення стану ідеального газу досить знати тільки два його параметра (p і w або ρ) або (p і T) або (w, ρ і T) третій параметр визначається з рівнянь:

$$T = \frac{p \cdot w}{R}; \quad w = \frac{R \cdot T}{p}; \quad p = \frac{R \cdot T}{w}; \quad \rho = \frac{p}{R \cdot T}$$

Розв'язок рівняння спрощується, якщо один із параметрів стану газу зберігається постійним:

$$1 \text{ Для ізохоричного процесу: } W = \text{const}, \quad p_2 = p_1 \cdot \frac{T_2}{T_1};$$

$$2 \text{ Для ізобарного процесу: } p = \text{const}, \quad w_2 = w_1 \cdot \frac{T_2}{T_1};$$

$$3 \text{ Для ізотермічного процесу } T = \text{const}, \quad p_2 = p_1 \cdot \frac{w_1}{w_2};$$

$$4 \text{ Для адіабатичного процесу } Q = 0; \quad p_2 = p_1 \cdot \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^k; \quad w_2 = w_1 \cdot \left(\frac{T_1}{T_2} \right)^{\frac{1}{k-1}};$$

$$T_2 = T_1 \cdot \left(\frac{p_1}{p_2} \right)^{\frac{k-1}{k}}$$

Найбільший інтерес представляє визначення параметра за двома іншими відомими параметрами, які можна визначити за допомогою певних інструментальних приладів.

Наприклад, При тиску $p = 101320 \text{ Н/м}^2$, температурі $T = 288\text{С}$, масова щільність повітря згідно рівняння стану буде дорівнює:

$$\rho = \frac{p}{RT} = \frac{101320}{287 \cdot 288} = 1,226 \text{ кг/м}^3$$

1 Задачі: 2.3.1:

- 1) У скільки разів зменшиться об'єм газу в циліндрі поршневого двигуна в процесі стискання, якщо перед стисканням тиск і температура рівнялися $2,0 \text{ кгс/см}^2$ і $+35^\circ\text{С}$, а в кінці стискання тиск і температура рівнялися 25 кгс/см^2 і $+600^\circ\text{С}$.
- 2) Визначити вагу повітря, що міститься в бортовому балоні гальмівної системи вертольоту, якщо об'єм балону рівняється 6 л , тиск в балоні рівняється 190 кгс/см^2 , а температура $+35^\circ\text{С}$.

2.3.2 Рівняння нерозривності рухомого потоку (рівняння Л. Ейлера)

Рівняння нерозривності відображає умовне збереження маси рухомого потоку рідини або газу. Для виведення рівняння віртуально виділимо в потоці рідини або газу замкнутий об'єм у вигляді трубки потоку (рис 2.3.1):

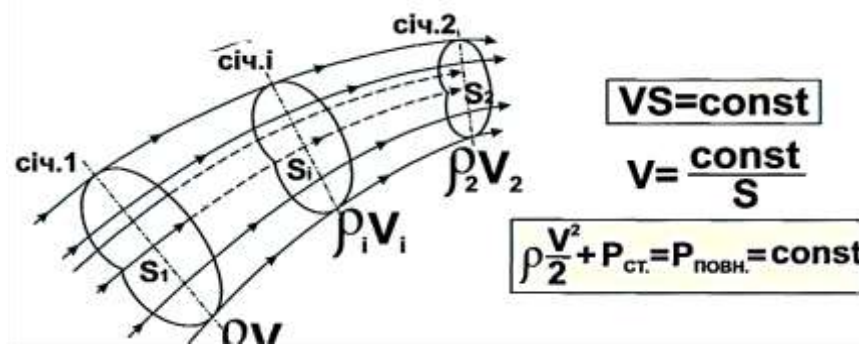


Рис 2.3.1 Схема трубки току рухомого повітряного потоку

Рівняння нерозривності виведено на підставі закону збереження матерії, установленого в 1748 р російським вченим М. В. Ломоносовим. Рівняння нерозривності було опубліковано Л. Ейлером в 1770 р. і є застосування закону збереження енергії до струмка газу.

Нехай в перерізі "1-1" площа S_1 , параметри стану газу рівні p_1, ρ_1, V_1 . За час $1c$ через переріз проходить маса повітря.

$$m_1 = S_1 * V_1 * \rho_1$$

Через переріз "2-2" проходить за $1c$ своя маса повітря. $m_2 = S_2 * V_2 * \rho_2$.

Так як через бічну поверхню трубки потоку повітря не просочується, то через будь-який переріз трубки за однаковий час проходить однакова маса повітря.

$$m_1 = m_i = m_2 \text{ или } S_1 * V_1 * \rho_1 = S_i * V_i * \rho_i = S_2 * V_2 * \rho_2 = \text{const}$$

Тоді для сталого руху рівняння має вигляд:

$$S * V * \rho = \text{const} (Q_m) - \text{масова витрата повітря}$$

$$\text{або } S = \frac{\text{const}}{\rho * V}$$

де

ρV — питома витрата газу, $\text{кг/м}^2 * \text{с}$;

При невеликих швидкостях прямолінійного рівномірного руху повітря стисливістю $\rho_1 = \rho_i = \rho_2 = \rho$ можна знехтувати, тоді рівняння прийме вигляд:

$$S_1 V_1 = S_i V_i = S_2 V_2 = SV = \text{const} (Q_w) - \text{об'ємна витрата повітря}$$

Фізичний сенс рівняння: при малих швидкостях руху повітря зменшення площі перерізу потоку викликає збільшення швидкості руху.

$$\frac{V_1}{V_2} = \frac{S_2}{S_1}, \text{ звідси } V_2 = V_1 \frac{S_1}{S_2}$$

З рівняння випливає, що при дозвуковій швидкості потоку швидкість руху газу в струйці обернено пропорційна площі поперечного перерізу, тобто при зменшенні площі поперечного перерізу струйки швидкість течії зростає, і навпаки.

У разі руху з великою дозвуковою, трансзвуковою і надзвуковою швидкістю, коли проявляється властивість стисливості, зміна швидкості залежить не тільки від

площі поперечного перерізу, але і від зміни масової щільності. Тоді вираз набуде вигляду: $\rho = f(V)$

$$V_2 = V_1 \frac{\rho_1 * S_1}{\rho_2 * S_2}$$

При надзвуковій швидкості потоку внаслідок особливостей зміни фізичних характеристик щільність газу змінюється швидше, ніж швидкість течії. Тому для отримання надзвукової швидкості і її збільшення необхідно розширювати струйку, збільшувати площу її поперечного перерізу за певним законом. Безперервне збільшення швидкості потоку від дозвукової до надзвукової можливо лише в струмку, що має форму сопла Лаваля (рис 2.3.2).

При великих швидкостях потоку на стисливість повітря впливає не тільки швидкість потоку, а й швидкість звуку в потоці. Як критерій стисливості рухомого повітря використовується число Маха $M = \frac{V}{a}$. Чим більше швидкість потоку повітря тим більше його стисливість.

Таким чином, рівняння сталої витрати, будучи відповідним вираженням закону збереження матерії стосовно струмка газу, пов'язує між собою швидкість, масову густину і площу того поперечного перерізу струмка, в якому розглядаються ці характеристики.

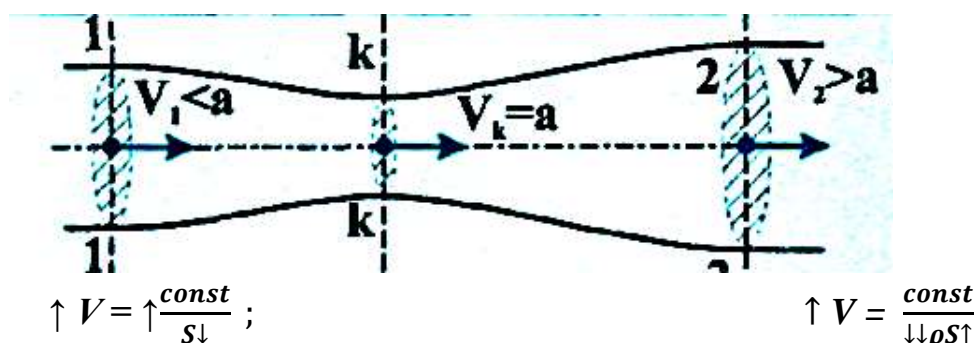


Рис 2.3.2 Схема течії потоку повітря в соплі Лаваля

2 Задачі: 2.3.2:

- 1) Визначити розмір швидкісного тиску, повний тиск і число Маха на висоті $H = 4000 \text{ м}$, при швидкості 400 км/год .
- 2) При обтіканні крила повітряним потоком площа струменю зменшилась у 2 рази. Визначити швидкість струменю і швидкісний тиск у найвужчому перерізі, якщо швидкість польоту літака рівняється 480 км/год на рівні земної поверхні.
- 3) Визначити, як зміниться розмір швидкісного тиску на елементи конструкції літака, який летить при швидкості $V = 720 \text{ км/год}$, при зміні висоти з $H_1 = 2 \text{ км}$ до $H_2 = 4000 \text{ м}$.

- 4) Визначити, як зміниться швидкість і швидкісний тиск в струменях над і під профілем крила, якщо на висоті польоту $H = 3000 \text{ м}$ при швидкості 320 км/год площа поперечного перерізу струменя перед профілем рівняється $S = 50 \text{ см}^2$ і змінюється таким чином: над профілем зменшується на 20% , а під профілем збільшується на 40% .