

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 3- Рівняння руху газового потоку з врахуванням стисливості
середовища. Теорія сопла Лавалю

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 № 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 3.2: Рівняння постійності масової витрати з врахуванням стисливості. Теорія сопла Лавалю.

План лекції:

- 1 Рівняння постійності масової витрати з врахуванням стисливості.
- 2 Поняття про критичну швидкість потоку. Теорія сопла Лавалю.

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 3.2: РІВНЯННЯ ПОСТІЙНОЇ МАСОВОЇ ВИТРАТИ З УРАХУВАННЯМ СТИСЛИВОСТІ. ТЕОРІЯ СОПЛА ЛАВАЛЯ

План лекції:

3.2.1 Рівняння постійної масової витрати з урахуванням стисливості

3.2.2 Поняття про критичну швидкість потоку. Теорія сопла Лаваля

3.2.1 Рівняння постійної масової витрати рідини або газу з урахуванням стисливості (рис 3.2.1):

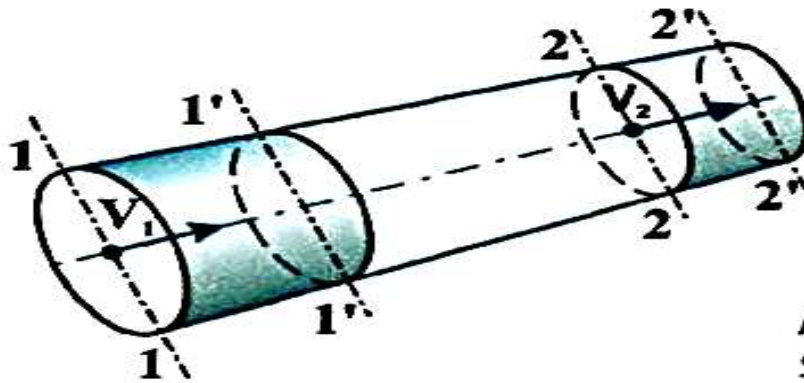


Рис 3.2.1 Схема потоку рідини з урахуванням стисливості

В загальному випадку з урахуванням стисливості рівняння Л. Єйлера має вигляд:

$$\rho VS = \text{const} (Q_m) - \text{масова витрата}$$

В умовах, коли проявляється стисливість газу, для визначення залежності між зміною площі поперечного перерізу, масової щільності і швидкістю потоку газу перетворимо рівняння:

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

З цієї залежності випливає, що зміна швидкості обумовлена зміною площі поперечного перерізу струмка і зміною щільності газу.

Використовуючи співвідношення:

$$\frac{d\rho}{\rho} = -M^2 \frac{dV}{V}$$

Можна зробити наступні основні висновки:

- 1) зміна щільності і швидкості мають різні знаки: при гальмуванні газ ущільнюється, а при розгоні - розріджується;

при $V_2 < V_1 \rightarrow \rho \uparrow$; при $V_2 > V_1 \rightarrow \rho \downarrow$

- 2) відносна зміна щільності потоку при зміні швидкості пропорційна квадрату числа Маха M^2 ;

$$\frac{dp}{\rho} = M^2$$

- 3) при швидкості потоку меншій швидкості звуку $V < a$, темп зміни щільності ρ газу менше темпу зміни швидкості V :

$$\left| \frac{d\rho}{\rho} \right| < \left| \frac{dV}{V} \right|$$

- 4) при швидкості більшій швидкості звуку $V > a$, темп зміни щільності ρ газу набагато більший темпу зміни швидкості V :

$$\left| \frac{d\rho}{\rho} \right| > \left| \frac{dV}{V} \right|$$

Таким чином, при досягненні потоком газу в процесі розгону швидкості, яка дорівнює швидкості звуку, настає якісна зміна співвідношення між відносною зміною швидкості і відносною зміною щільності газу в струмені.

З огляду на співвідношення:

$$\frac{d\rho}{\rho} = -M^2 \frac{dV}{V}$$

можна отримати рівняння сталості масової витрати з урахуванням стисливості в диференціальній формі:

$$\frac{dV}{V} = \frac{1}{M^2 - 1} \cdot \frac{dS}{S}$$

1 Задача: 3.2.1:

- 1) Визначити як зміниться швидкість польоту літака при зміні висоти від $H_1 = 8000 \text{ м}$ до $H_2 = 3000 \text{ м}$ при незмінній вазі літака $G = 100 \text{ кН}$ і площі крила $S = 150 \text{ м}^2$, коефіцієнт підйомної сили $C_{ya} = 0,9$.

3.2.2 Поняття про критичну швидкості потоку. Теорія сопла Лавалля

3.2.2.1 Поняття про критичну швидкості потоку газу

З рівняння нерозривності з урахуванням стисливості газу записаних у вигляді:

$$\frac{dS}{dV} = (M^2 - 1) \cdot \frac{S}{V}$$

впливають певні закономірності:

- 1) при дозвуковій течії газу ($V < a, M < 1$) $\frac{dS}{dV} < 0$, зв'язок між змінами площі поперечного перерізу струмка і швидкості потоку принципово така ж, як і у нестисливої рідини: газ розганяється в звужуючій і гальмується в

розширюючій частині струмка, проте кількісні співвідношення тим більше, ніж більше число M потоку;

2) досягнення швидкості звуку можливо в найвужчому перерізі, ($V = a$) $\frac{dS}{dV} = 0$.

3) при надзвуковій течії ($V > a$, $M > 1$) $\frac{dS}{dV} > 0$, залежність зворотна: газ розганяється в розширюючій частині струмка і гальмується в звужуючій. Це пояснюється більш різким падінням щільності в порівнянні з приростом швидкості;

4) щоб швидкість потоку збільшилася від дозвукової до надзвукової, необхідно спочатку струмінь звужувати, поки газ не збільшить свою швидкість до $V = a$, а потім площу поперечного перерізу необхідно розширювати для отримання надзвукової течії.

Ці закономірності використовуються для отримання надзвукових потоків газу за допомогою спеціально спрофільованих пристроїв в якому вхідна частина звужується, а вихідна частинами – розширюється. Такі пристрої називаються **соплами Лавалю**, по імені шведського інженера, який вперше застосував їх для отримання надзвукової течії без суттєвої затрати енергії.

Швидкість потоку, що дорівнює місцевій швидкості звуку називається **критичною**, переріз струменя, де досягається критична швидкість називається **критичним**.

3.2.2.2 Теорія сопла Лавалю

Для аналізу умов витрати газу по трубці потоку зручно використовувати рівняння питомої масової витрати газу:

$$m = \rho V S \text{ або } \frac{m}{S} = \rho V$$

Розглянемо зміну параметрів газу по довжині сопла Лавалю (рис 3.2.2):

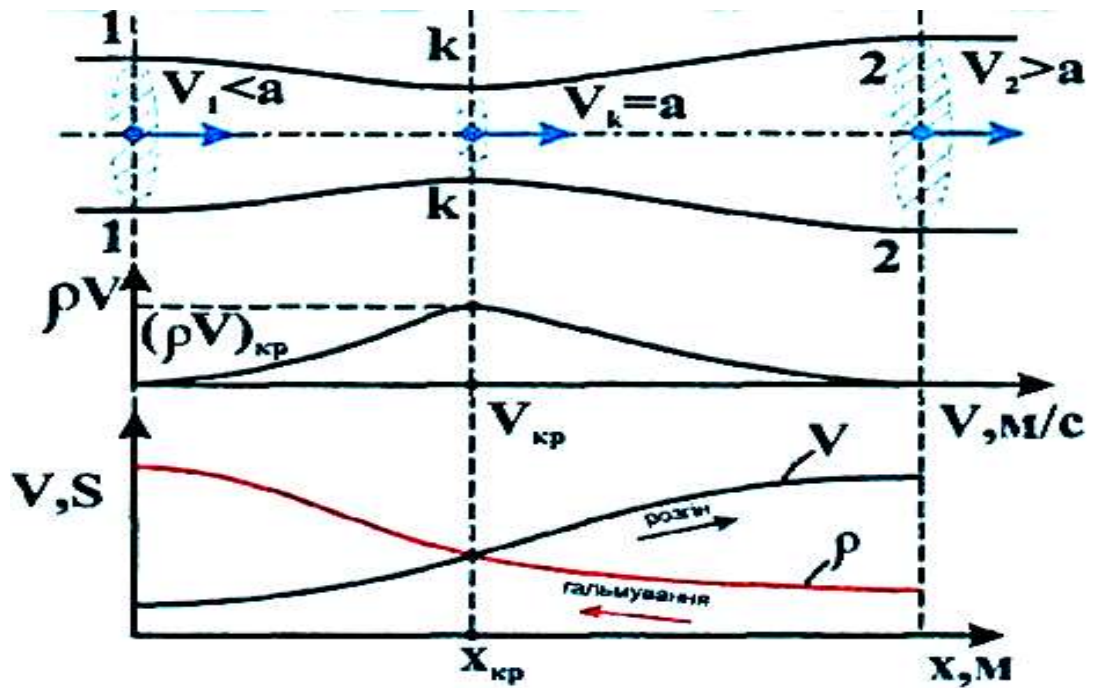


Рис 3.2.2 Схема зміни параметрів потоку по довжині сопла Лавалю

Окремі випадки розв'язування рівняння:

- 1) при відсутності швидкості руху потоку питома витрата дорівнює нулю:

$$V = 0 \rightarrow \rho \cdot V = 0$$

- 2) при швидкості потоку $V < a$: збільшення швидкості течії газового потоку можливо при зменшенні площі поперечного перерізу:

$$C \uparrow V \rightarrow, \text{ при } \rho \approx \text{const} \rightarrow \uparrow \rho V, \text{ тоді } \frac{m}{S} = \rho V \uparrow$$

- 3) швидкість течії газового потоку досягає значення швидкості звуку $V = V_{кр} = a$ при мінімальній площі перерізу $S_{мін}$

$$\uparrow \uparrow V \rightarrow (V\rho)_{\text{макс}} \rightarrow S_{\text{мін}}, \text{ при } \rho = \text{const}$$

$$\frac{m}{S_{\text{мін}}} = (\rho V_{кр})_{\text{макс}}$$

- 4) при швидкості потоку $V > a$: подальше збільшення швидкості надзвукового потоку ($V > a$) можливо при розширенні вихідного перерізу газового потоку через різке зменшення масової щільності газу:

$$\uparrow V > a \rightarrow \downarrow \downarrow \rho * V \uparrow \rightarrow \uparrow S.$$

$$V > a, \quad \frac{m}{S} \uparrow = \downarrow \downarrow \rho * V \uparrow$$

Основні закономірності перебігу газового потоку в соплі Лавалю:

- 1) При $V < a, M < 1$, зв'язок між зміною площі перерізу струйки і швидкістю течії аналогічна як і для нестисливого потоку:

$$V \uparrow \rightarrow \downarrow S;$$

$$V \downarrow \rightarrow \uparrow S$$

2) при $V > a$, $M > 1$ спостерігається зворотна залежність:

$$V \uparrow \rightarrow \uparrow S;$$

$$V \downarrow \rightarrow \downarrow S$$

3) Щоб збільшити швидкість потоку від дозвуковій до надзвуковий необхідно:

- спочатку звужувати поперечний переріз струменя, до тих пір, поки швидкість потоку не досягне швидкості звуку;
- потім розширювати переріз струменя, що призведе до ще більшого збільшення надзвукової швидкості газового потоку.

Сопло Лавалю застосовується в авіаційній техніці:

- у вигляді соплових апаратів реактивних двигунів;
- в аеродинамічних трубах для отримання надзвукових швидкостей течії при проведенні досліджень.