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 6. «Стрибки ущільнення і характеристики розширення в газовому середовищі»

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.

ЛЕКЦІЯ 6.2: Основні рівняння рухомого газового середовища і зміна фізичних параметрів на стрибку ущільнення

План лекції:

1 Основні рівняння рухомого газового потоку на стрибку ущільнення.

2 Зміна параметрів газового потоку на стрибку ущільнення.

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 І, «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 ІІ, «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 І «Аеродинаміка вертольоту». Автор: Пчельников С. І.

5 Опорний конспект з навчальної дисципліни «Аеродинаміка, динаміка польоту та практична аеродинаміка». Частина ІІ «Динаміка польоту». Автор: Пчельников С.І.

6 Ародинаміка 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., Вертоліт 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.: ВПІА ім. М. Є. Жуковского, 1957. – 350 с.
9 Вотяков В. Д., Аеродинаміка ЛА і гідравліка їх систем, Ч.1. Аеродинаміка. Підручник. - М.: ВПІА ім. М. Є. Жуковского, 1972. – 652 с.
10 Дьяченко А. А., Літальні апарати і безпека польоту. Підручник. - М.: ВПІА ім. М. Є. Жуковского, 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 Аерокоптер, 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.: КІІЦА, 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. Видавництво стандартів, 1976.

ЛЕКЦІЯ 6.2: ОСНОВНІ РІВНЯННЯ РУХОМОГО ГАЗОВОГО СЕРЕДОВИЩА І ЗМІНА ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НА СТРИБКУ УЩІЛЬНЕННЯ

План лекції:

6.2.1 Основні рівняння рухомого газового потоку на стрибку ущільнення

6.2.2 Зміна параметрів газу на стрибку ущільнення

6.2.1 Основні рівняння рухомого газового потоку на стрибку ущільнення

Для розгляду якісного стану параметрів газового потоку позначимо їх: до стрибка - "б*ез індексу*" і за стрибком з індексом "***1***" (*рис 6.2.1*).

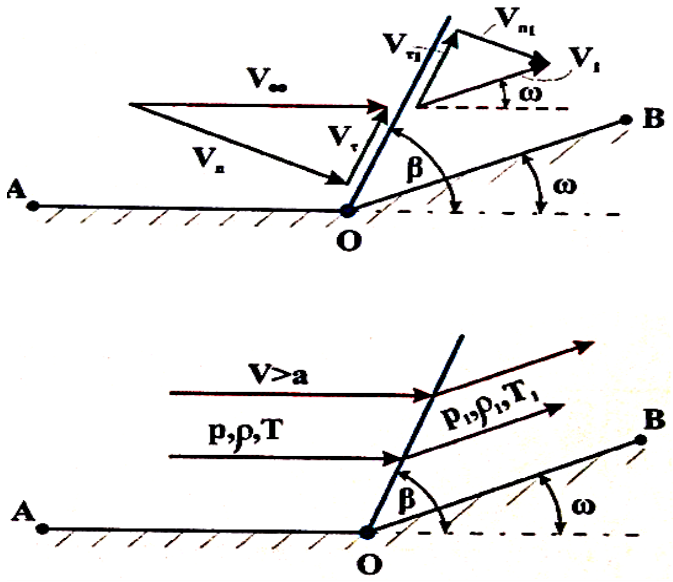


Рис 6.2.1 Схема зміни параметрів стану газового потоку на стрибку ущільнення

При переході через стрибок ущільнення змінюється швидкість не тільки за величиною, а за напрямком. Кут повороту сторони внутрішнього двостороннього кута позначимо ($\boldsymbol{\omega}$). Розкладемо швидкість набігаючого потоку $\boldsymbol{V}$ на дві складові: нормальну і дотичну.$\boldsymbol{V_n}$ і $\boldsymbol{V_\tau}$

Розглянемо трикутник швидкостей, і тоді отримаємо співвідношення:

$$V_n = \text{V} * ; = \text{V} * \text{Sin}\,\beta \qquad V_\tau\ \text{Cos}\,\beta; \quad \frac{V_n}{V_\tau} = tan\,\beta$$

Відповідно за стрибком ущільнення отримаємо наступні співвідношення:

$$V_{n1} = V_1 * \text{Sin}(\beta - \omega) \quad V_{\tau 1} = V_1 * \text{Cos}(\beta - \omega); \frac{V_{n1}}{V_{\tau 1}} = \text{tan}(\beta - \omega)$$

Рух газу через стрибок ущільнення підпорядковується відомим законам механіки, а саме:

- закону збереження маси;
- закону збереження енергії;
- закону зміни кількості руху.

1 Задача: 6.2.1:

1) Визначити нормальні і дотичні швидкості течії перед стрибком ущільнення і після, якщо швидкість незбуреного потоку рівняється **V∞ = 350 м/**с, кут відхилення сторони внутрішнього двухстороннього кута рівняється **ω = 30⁰**, а кут нахилу стрибка ущільнення рівняється **β = 6⁰**.

1 Рівняння збереження маси при переході через стрибок ущільнення

При переході через стрибок ущільнення потік не розривається. Тому згідно закону збереження маси (*рівняння нерозривності*) секундна масова витрата газу через площу стрибка (***S***) залишається постійною:

$$\rho * S * V * \sin\beta = \rho_1 * S_1 * V_1 * \sin(\beta - \omega)$$

Так як, $S = S_1$ - площа стрибка не змінюється, то рівняння збереження маси на стрибку ущільнення матиме вигляд:

$$\rho \cdot Vn = \rho_1 \cdot Vn_1$$

2 Рівняння зміни кількості руху на стрибку ущільнення

Рух газу через стрибок ущільнення відповідає закону про зміну кількості руху рухомої маси газу. Зміна кількості руху при переході через стрибок по нормалі до нього в секунду дорівнює:

$$m\ (V_n - V_{n1}) = (p_1 - p) * S_1,$$

так як $m = \rho * V_n * S$, то отримаємо рівняння зміни кількості руху:

$$\rho * V_n(V_n - V_{n1}) = p_1 - p$$

Зміни кількості руху вздовж стрибка ущільнення не відбувається:

$m\ (V_\tau - V_{\tau 1}) = 0$, тоді $V_\tau = V_{\tau 1}$

3 Рівняння збереження енергії на стрибку ущільнення

При переході струйки газу через стрибок ущільнення загальний баланс енергії не змінюється внаслідок адіабатичного процесу, тому справедливо рівняння у вигляді:

$$\frac{V^2}{2} + i = \frac{{V_1}^2}{2}\ i_1 = i^*$$

де,

i і i_1 – ентальпія газу перед стрибком і за ним.

6.2.2 Зміни параметрів газу на стрибку ущільнення

1 Зміни нормальної складової швидкості

Скористаємося рівнянням зміни кількості руху газового потоку і розділимо його складові на масу:

$p_1 - p = \rho * V_n(V_n - V_{n1})$ поділимо на $p * V_n$S =$p_1 * V_{n1}S$, і отримаємо:

$$\frac{p_1}{\rho_1 * V_{n1}} - = \frac{p}{\rho * V_n}\ V_n - V_{n1}$$

Після проведення відповідних перетворень отримаємо рівняння співвідношення нормальних швидкостей на стрибку ущільнення:

$V_{n^*}\ V_{n1} =\ {a_{\text{кр}}}^2\ \frac{k-1}{k+1} * {V_\tau}^2$, або після перетворення

${a_{\text{кр}}}^2 = \frac{k-1}{k+1}({V_{\text{пр}}}^2 - {V_\tau}^2)$, де $V_n * V_{n1} = V_{пр}$ - гранична швидкість

Для прямого стрибка ущільнення:,$V_n = V,\ V_{n1} = V_1\ \ V_\tau = 0$

Тоді формула спрощується і для прямого стрибка ущільнення має вигляд:

$$V * V_1 = {a_{\text{кр}}}^2$$

Якщо швидкість газового потоку перед прямим стрибком ущільнення більше швидкості звуку (a), то за прямим стрибком швидкість завжди буде дозвуковою і її значення можна визначити за формулою:

$V_1 = \frac{{a_{\text{кр}}}^2}{V}$, для прямого стрибка

2 Зміни масової щільності газового потоку

Якщо відома нормальна складова швидкості V_{n1} за стрибком ущільнення, то можна визначити всі інші основні параметри газу за стрибком.

Для визначення співвідношення масової щільності використовуємо рівняння збереження маси газу:

$\rho_1 * V_{n1} = \rho * V_n$звідси

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \frac{V_{n1}}{V_n}$$

Після виконання необхідних перетворень отримаємо кінцеву формулу:

$$\frac{\rho}{\rho_1} = \frac{2}{k+1} * \frac{1}{M^{2*\,\text{Sin}^2\,\beta}} + \frac{k-1}{k+1}$$

Таким чином, відношення масової щільності при переході через стрибок ущільнення залежить лише від одного параметра $M *. Sin\,\beta$

Аналізуючи формулу можна зробити висновок: що щільність газу не може збільшуватися безмежно, а прагне зі збільшенням числа Маха до деякої кінцевої межі:

$$\boldsymbol{\rho_1 = \frac{k+1}{k-1} * \rho}$$

Для повітря при $\boldsymbol{k = 1{,}4}$, тоді. згідно формули $\boldsymbol{\rho_1 = 6\rho}$

2 Задача: 6.2.2:

1) Визначити нормальну складову швидкості течії перед стрибком ущільнення і після, а також масову густину за стрибком ущільнення, якщо швидкість незбуреного потоку рівняється **V∞ = 400 м/с**, кут відхилення сторони внутрішнього двухстороннього кута рівняється **ω = 5^0**, а кут нахилу стрибка ущільнення рівняється **β = 8^0**, політ здійснюється на висоті **H = 2000 м.**

3 Зміна тиску і температури газового потоку на стрибку ущільнення

Використовуючи теорему механіки про імпульс сили:

$$\boldsymbol{p_1 - p = \rho * V_n(V_n - V_{n1})}$$

після проведення відповідних перетворень і підстановок отримаємо кінцеву формулу для визначення співвідношення тисків за стрибком ущільнення і до стрибка:

$$\boldsymbol{\frac{p_1}{p} = \frac{2k}{k+1} * M2 * Sin2\,\beta - \frac{k-1}{k+1}}$$

Зміна температури на стрибку ущільнення визначається виходячи з рівняння стану газу: перед стрибком $\boldsymbol{\frac{p}{p} = RT}$ і за стрибком $\boldsymbol{\frac{p_1}{\rho} = RT_1}$, тоді отримаємо:

$$\boldsymbol{\frac{T_1}{T} = \frac{p_1}{p}\frac{\rho}{\rho_1}}$$

Таким чином, можна зробити висновок, що відношення $\boldsymbol{\frac{\rho}{\rho_1}; ; \frac{p_1}{p}; \frac{T_1}{T}}$ до і після стрибка ущільнення залежать лише від параметра $\boldsymbol{M * Sin\,\beta}$

Залежність основних параметрів від $\boldsymbol{M * Sin\,\beta}$ можна представити графічно (*рис 6.2.2*).

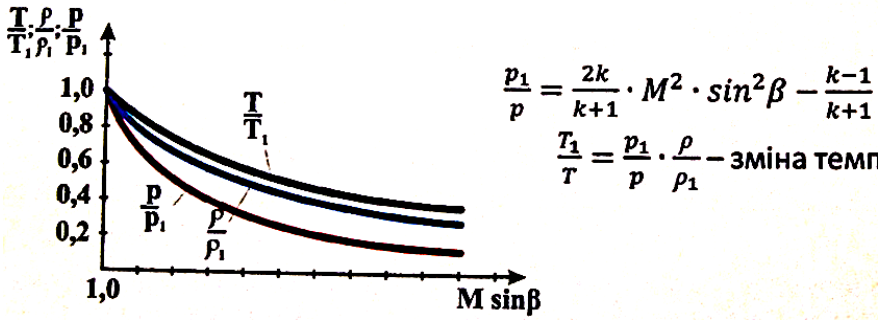
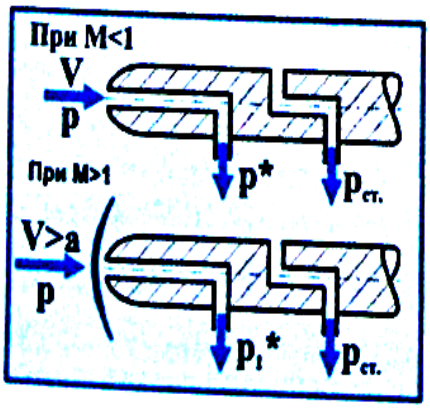


Рис 6.2.2 Графік залежності параметрів газового потоку від параметра $M * sin\,\beta$

4 Принцип вимірювання числа М і швидкості надзвукового газового потоку

4.1 При швидкості польоту $M < 1$, принцип вимірювання числа Маха і швидкості ***(M і V)*** снований на вимірюванні відносних тисків: повного до тиску незбуреного потоку - ***p*/p*** (*рис 6.2.3*):



$$\frac{p^*}{p} = \left(1 + \frac{k-1}{2} \cdot M^2\right)^{\frac{k}{k-1}};$$

$$\frac{p_1^*}{p} = \frac{p_1^* * p^*}{p^* \cdot p} = \sigma\frac{p^*}{p};\ \sigma = \frac{p_1^*}{p^*}$$

Рис 6.2.3 Схема трубки ППТ при дозвуковій і надзвуковій течії газового потоку

$$\frac{p^*}{p} = (1 + \frac{k-1}{2} M^2)^{\frac{k}{k-1}}.$$

4.2 При швидкості польоту $M > 1$ принцип вимірювання ***M і V*** оснований на вимірюванні відносних тисків: повного за стрибком ущільнення до тиску незбуреного потоку – p_1^*/p

$$\frac{p_1^*}{p} = \frac{p_1^*}{p^*} * \frac{p^*}{p} = \sigma\frac{p^*}{p}$$

де

$\sigma = \frac{p_1^*}{p^*}$ - коефіцієнт відновлення повного тиску

Тоді визначення числа Маха здійснюється за формулою Релея (*для прямого стрибка*):

$$\frac{{p_1}^*}{p^*} = \frac{(\frac{k+1}{2} M^2)^{\frac{k}{k-1}}}{(\frac{2k}{k+1} M^2 - \frac{k-1}{k+1})^{\frac{k}{k-1}}}$$