

**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 7- Аеродинамічні характеристики профілю і несучих поверхонь  
літальних апаратів

**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 7.4: Сила лобового опору і його складові частини**

### **План лекції:**

- 1 Загальні поняття про лобовий опір і його складові частини.
- 2 Профільний опір і його складові частини.

### **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 7.4: СИЛА ЛОБОВОГО ОПОРУ ТА ЙОГО СКЛАДОВІ ЧАСТИНИ

#### План лекції:

##### *7.4.1 Загальні поняття про лобовий опір і його складові частини*

##### *7.4.2 Профільний опір і його складові частини*

#### **7.4.1 Загальні поняття про лобовий опір і його складові частини**

Несучі поверхні *ЛА* створюють не тільки підйомну силу, а й лобовий опір. Фізична сутність виникнення сили лобового опору дуже складна. Лобовий опір несучої поверхні представляє собою суму сил опору, що викликаються різними причинами.

Сила лобового опору завжди спрямована по повітряному потоку (*проти напрямку польоту ЛА*), перешкоджає руху *ЛА* і виникає через:

- різниці тисків перед і за несучою поверхнею *ЛА*, (**опір тиску**);
- дії сил тертя в примежовому шарі, внаслідок в'язкості повітря, (**опір тертя**);
- скосу потоку, викликаного перетіканням повітря через кінці несучої поверхні *ЛА*, (**індуктивний опір**);
- виникнення стрибків ущільнення на поверхні профілю при числах Маха  $M > M_{кр}$ . (**хвильовий опір**)

Для зручності аналізу лобовий опір умовно розділяється на відповідні складові частини, які для зручності будуть розглядатися окремо.

#### **7.4.2 Профільний опір і його складові частини**

##### *7.4.2.1 Загальне поняття про профільний опір*

**Профільний опір** – це частина лобового опору, який створює крило нескінченного розмаху. Умовно вважається, що всі перерізи крила обтіаються однаково і відсутнє перетікання повітря на кінцях крила через різницю тисків під крилом і над ним. При цьому опір крила нескінченного розмаху не залежить від форми крила в плані, а визначається тільки формою профілю крила. Профільний опір виникає внаслідок нерівномірного розподілу тиску по поверхні профілю крила і тертям повітря об його поверхню.

Профільний опір умовно розділяється на дві складові опору: опір тиску і опір тертя

$$X_p = X_{\text{тиску}} + X_{\text{тертя}}$$

де

$X_{\text{тиску}}$  - опір тиску, який виникає через різницю тисків перед і за профілем крила, Н;

$X_{\text{тертя}}$  - опір тертя, який виникає через прояви впливу властивостей в'язкості повітря в примежовому шарі, Н.

#### 7.4.2.2 Опір тиску (рис 7.4.1):

$$C_{\text{ха,тиску}} = (\vec{p}_n - \vec{p}_z) \frac{S_M}{S}$$

де

$S_M$  - площа міделевого (самого найбільшого) перерізу профілю крила,  $\text{м}^2$ ;

$S$  - площа поверхності профілю крила,  $\text{м}^2$ ;

$\vec{p}_n, \vec{p}_z$  - відносний тиск повітряного потоку перед і за профілем.

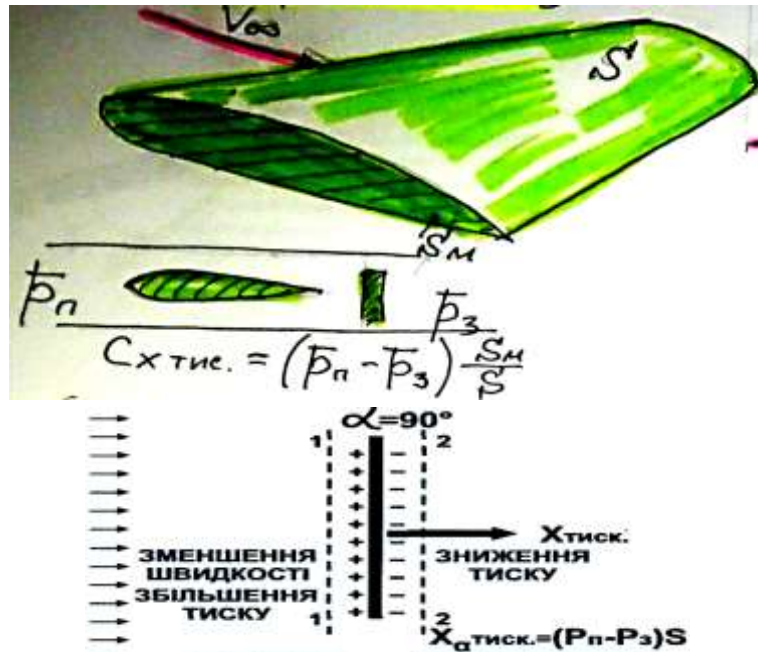


Рис 7.4.1 Схема виникнення опору тиску

Розмір різниці тисків перед і за профілем крила залежить від форми профілю, яка характеризується:

- товщиною ( $C$ );
- кривизною ( $f$ ) профілю.

Чим більші товщина і кривизна профілю крила, тим сильніше підвищується тиск при гальмуванні потоку перед профілем крила і тим більше опір тиску.

Вплив кута атаки на опір тиску суттєво проявляється тільки на великих кутах атаки, коли потік сильно деформується і плавність потоку порушується.

### 1 Задача: 7.4.1:

- 1) Визначити коефіцієнт опору тиску і силу опору тиску, якщо відносний тиск перед профілем рівняється **0,015**, а за профілем - **0,007**, площа міделевого перерізу складає **1,5 м<sup>2</sup>**, площа поверхні профілю - **2 м<sup>2</sup>**, швидкість повітряного потоку **360 км/год**, площа крила рівняється **40 м<sup>2</sup>**, висота польоту - **1000 м**.

#### 7.4.2.2 Опір тертя

Величина сили тертя залежить від характеру перебігу повітря в примежовому шарі (рис 7.3.2). При ламінарному примежовому шарі сили тертя менше, ніж в турбулентному. Тому розмір сили опору тертя залежить від положення точки переходу ламінарного примежового шару в турбулентний.

На розташування точки переходу впливають такі чинники:

- швидкість потоку, що набігає; шорсткість поверхні профілю;
- форма профілю; вид примежового шару;
- число Рейнольдса.

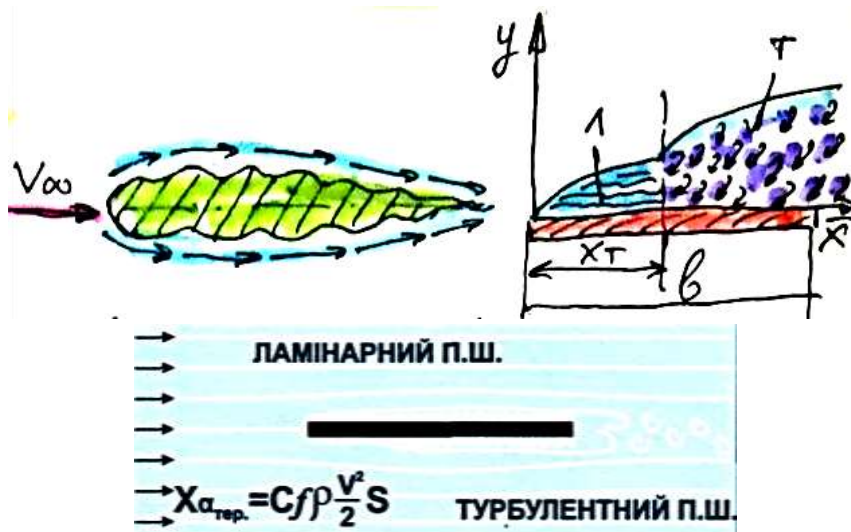


Рис 7.4.2 Схема виникнення опору тертя

Для зручності аналізу профільний опір розглядається у вигляді коефіцієнтів опору:

$$C_{x,p} = C_{x,тиску} + C_{x,тертя}$$

Практично коефіцієнт профільного опору в межах малих кутів атаки не змінюється при незначному збільшенні кута атаки. Так до **80%** профільний опір складається з складової сили тертя, яка не залежить від зміни кута атаки. При великих кутах атаки, через зрив потоку з поверхні профілю опору тиску починає

збільшується. Величина коефіцієнта профільного опору коливається в межах  $C_{x,p} = 0,007 \dots 0,01$ .

У аеродинаміці прийнято спрощення: сили опору тертя будь-якого обтікаемого тіла умовно приводяться до опору тертя плоскої пластини, що має подвійну поверхню  $2S_{нов}$ , рівновелику поверхні реального тіла, а коефіцієнт тертя визначається за формулою:

$$C_{f_l} = \frac{2,66}{\sqrt{Re}} - \text{ламинарное течение};$$

$$C_{f_t} = \frac{0,144}{\sqrt[5]{Re}} - \text{турбулентное течение};$$

$$C_{x_{\text{тертя}}} = C_f \cdot \frac{S_n}{S};$$

де

$S_n$  - площа поверхні пластини, обтікаєма потоком,  $\text{м}^2$ ;

$S$  - площа поверхні профілю,  $\text{м}^2$ .

$$X_{a,\text{тертя}} = C_{x_{\text{тертя}}} \cdot \frac{\rho V^2}{2} \cdot S$$

## 2 Задача: 7.4.2:

- 1) Визначити коефіцієнт опору тертя і силу опору тертя, якщо число Рейнольдса рівняється **2300**, площа поверхні плоскої пластини - **0,5  $\text{м}^2$** , площа поверхні профіля - **1,0  $\text{м}^2$** , площа крила - **40  $\text{м}^2$** , політ літака здійснюється на висоті - **1000 м** при швидкості **480 км/год**.