

**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 5- Основи теорії примежового шару

**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 5.1: Теорія потоку в'язкої рідини і газу**

### **План лекції:**

- 1 Загальні положення про течію в'язкого потоку рідини і газу.
- 2 Структура примежового шару.
- 3 Умови зміни структури примежового шару. Поняття про число Рейнольдса.

### **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 5.1: ТЕОРІЯ В'ЯЗКОГО ПОТОКУ РІДИНИ І ГАЗУ

#### План лекції:

*5.1.1 Загальні поняття про течію в'язкої рідини і газу*

*5.1.2 Структура примежового шару*

*5.1.3 Умови зміни структури примежового шару.*

*Поняття про число Рейнольдса*

#### 5.1.1 Загальні поняття про течію в'язкої рідини і газу

*Примежовим шаром* називається тонкий шар газу навколо обтікаємого твердого тіла, в якому швидкості руху частинок рідини змінюються від нульового значення до величини рівної місцевої швидкості незбуреного потоку, тобто має місце градієнт швидкості  $\frac{dV_x}{dy}$  по товщині примежового шару (рис 5.1.1).

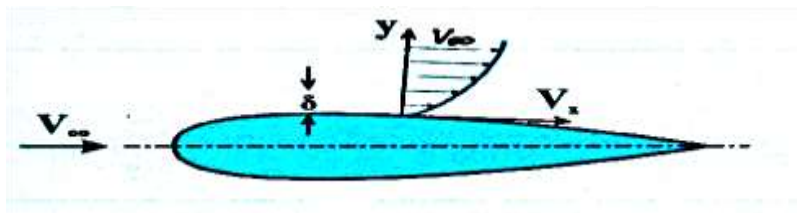


Рис 5.1.1 Схема течії в примежовому шарі

$$V_\delta = 0,99 V_{id.0} \sim V_\infty$$

де

$V_{id.0}$  - швидкість яку мали б частинки газу на межі примежового шару, якби газ був ідеальним.

Внаслідок властивостей в'язкості газу близько розташовані до обтікаємого тіла шари газового потоку гальмуються. Гальмівна дія обтікаємого тіла в міру віддалення шарів газу від його поверхні поступово зменшується і на деякій відстані припиняється практично повністю. Товщина примежового шару на поверхні профілю збільшується від носової частини обтікаємого тіла до хвостової (рис 5.1.2).

Товщина примежового шару залежить від:

- форми обтікаємого тіла; положення тіла в газовому потоці (кута атаки);
- стану поверхні тіла (шорсткості поверхні);
- швидкості газового потоку; масової густини газу і т.д.

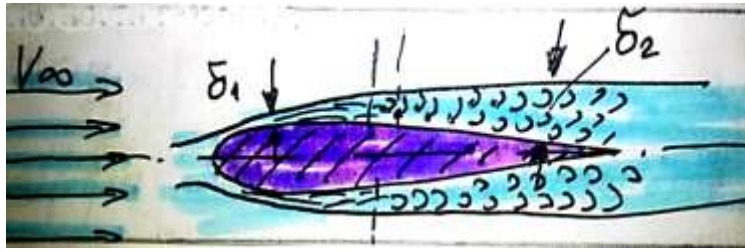


Рис 5.1.2 Схема зміни товщини примежового шару по довжині профілю

Поблизу передньої кромки обтікаємого тіла товщина примежового шару незначна і дорівнює кільком міліметрам, а в хвостовій частині профілю товщина шару збільшується і досягає приблизно **100 мм**. Чим менше швидкість потоку і рівніша поверхня тіла, тим примежовий шар тонше.

Через різницю швидкостей руху струйок над виділеною частинкою і під частинкою виникає пара ковзних сил тертя  $\Delta F_{тр.}$ , що приводить до появи моменту обертання, що визиває привід частинок повітря в обертальний рух, що сприяє утворенню вихорів (рис 5.1.3).

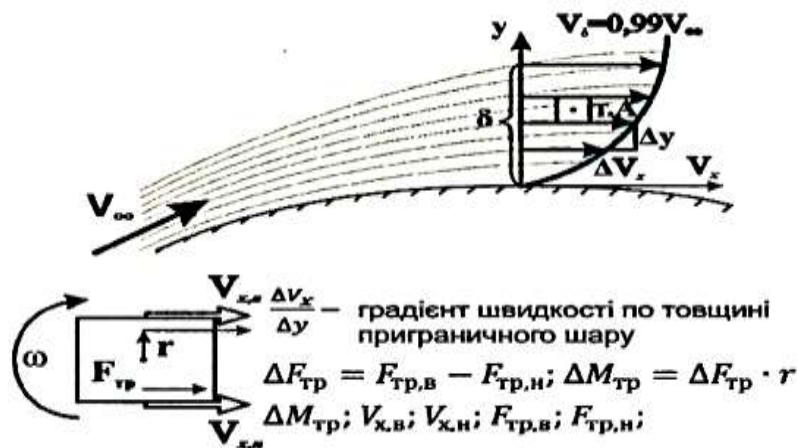


Рис 5.1.3 Схема виникнення вихорового руху в примежовому шарі

Основною характеристикою примежового шару служить градієнт швидкості  $\frac{\Delta V_x}{\Delta y}$ ,

$$\frac{\text{м}}{\text{с} \cdot \text{мм}}$$

де

$\Delta V_x$  - різниця поздовжніх складових швидкостей руху сусідніх шарів потоку повітря, м/с;

$\Delta y$  – відстань між сусідніми шарами повітряного потоку по одній нормалі товщини примежового шару, мм.

Градієнт швидкості характеризує зміну швидкості потоку на **1 мм** товщини примежового шару. Нерівномірність розподілу швидкостей по товщині

примежового шару зберігається і за обтікаємим тілом в вихровому сліді. Швидкість потоку в вихровому сліді в міру віддалення від обтікаємого тіла вирівнюється і стає рівною швидкості незбуреного потоку  $V_\infty$ .

У примежовому шарі внаслідок в'язкості відбувається зміна основних фізичних параметрів газу:  $V_\delta$ ,  $p_\delta$ ,  $T_\delta$ ,  $\rho_\delta$  - швидкість, тиск, температура, масова щільність (рис 5.1.4).

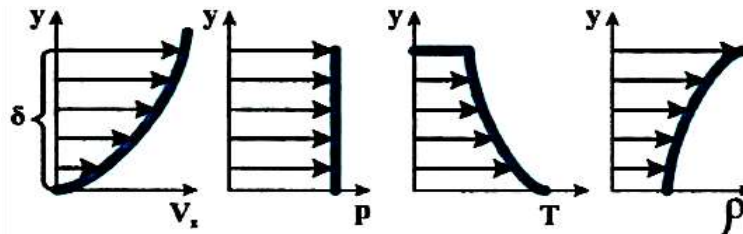


Рис 5.1.4 Характер зміни параметрів повітря по товщині примежового шару

де

$V_\delta$  - зміна швидкості газового потоку по товщині примежового шару відбувається внаслідок властивостей в'язкості, таким чином має місце градієнт швидкості;

$p_\delta$  - тиск газу залишається постійним по товщині примежового шару, з огляду на невелику його товщину;

$T_\delta$  - температура шару збільшується по мірі наближення до обтікаємого тіла, внаслідок гальмування частинок газу. Кінетична енергія прямолінійного руху частинок газу в примежовому шарі переходить в теплову енергію хаотичного руху молекул газу, виникає ефект аеродинамічного нагріву поверхні тіла.

$\rho_\delta$  - розподіл масової густини по товщині примежового шару здійснюється згідно рівняння стану газу за умови постійного тиску ( $p = const$ ).

$$\frac{p_\delta}{\rho_\delta} = R \rightarrow \downarrow T_\delta \rho_\delta = \frac{p_\delta}{RT_\delta \uparrow}$$

По мірі наближення до поверхні обтікаємого тіла густина газу зменшується.

### 1 Задачі: 5.1.1:

- 1) Визначити як зміниться масова витрата рідини при швидкості течії  $V = 70$  см/с, масова густина  $\rho = 820$  кг/м<sup>3</sup> при зміні діаметру трубопроводу від 25 см до 50 см.
- 2) При обтіканні крила повітряним потоком площа струменя зменшилась у 2 рази. Визначити швидкість струменя і швидкісний тиск у найвужчому перерізі, якщо швидкість польоту літака рівняється 480 км/год. на рівні земної поверхні.

### 5.1.2 Структура примежового шару

Розглянемо обтікання твердого тіла газовим потоком. В спектрі обтікання можна виділити 4-и характерні зони течії в примежовому шарі (рис 5.1.5):

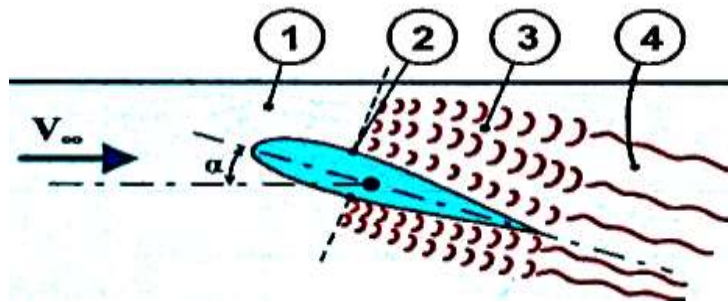


Рис 5.1.5 Схема структури примежового шару

**Зона 1** - від передньої кромки обтікаємого профілю і до його максимальної товщини. У цій зоні товщина шару мінімальна, течія шарувата, струйки газу між собою не перемішуються. Така течія називається *ламінарною*.

**Зона 2** - це область переходу ламінарної структури примежового шару в турбулентний. Лінія «П»- це лінія по товщині примежового шару переходу ламінарної структури в турбулентну.

**Зона 3** - це область примежового шару в якій рух частинок газу обертально - поступальний з перемішуванням частинок газу по товщині примежового шару і носить назву *турбулентної течії*.

**Зона 4** - це область течії за межами обтікаємого тіла, і носить назву спутного струменю (*вихровий слід*).

По мірі руху частинок газу впродовж поверхні тіла вплив в'язкості газу поступово призводить до руйнування ламінарної структури примежового шару, потім відбувається інтенсивне перемішування частинок газу по товщині примежового шару і утворюється турбулентна течія в примежовому шарі. Згідно фізичної природи виникнення ламінарного і турбулентного шарів, розподіл швидкостей потоку газу по товщині примежового шару буде мати різний вигляд (рис 5.1.6).

У ламінарному примежовому шарі рух газу відбувається без взаємного проникнення одного шару в інший.



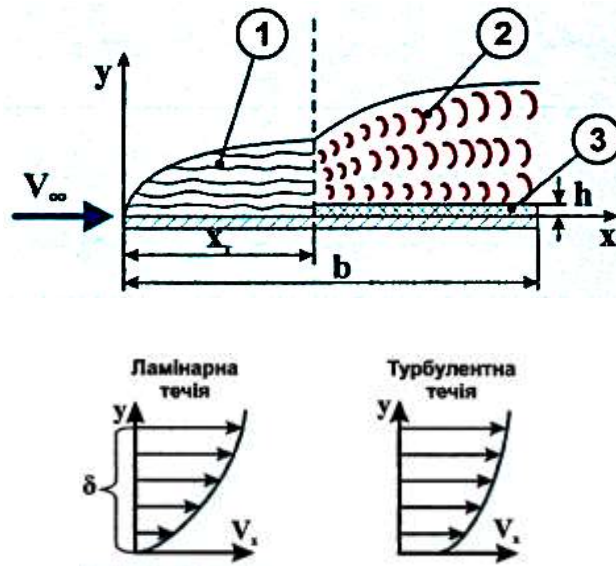


Рис 5.1.6 Схема структури газового потоку в примежовому шарі.

*1* - ламінарний шар; *2* - турбулентний шар; *3* - ламінарний прошарок в турбулентному шарі;  $x_m$  - координата переходу ламінарного течії в турбулентний;  $h$  - товщина ламінарного підшару;  $l(b)$  - довжина пластини (хорда профілю).

Сила тертя залежить від інтенсивності зміни ковзної швидкості потоку по товщині примежового шару, тобто від градієнта швидкості  $\frac{\Delta V_x}{\Delta y}$ .

Ковзну напругу тертя при ламінарному режимі течії можна визначити за формулою закону внутрішнього тертя І. Ньютона:

$$\tau_l = \mu \frac{\Delta V_x}{\Delta y}$$

де

$\mu$  - динамічний коефіцієнт в'язкості, Па с.

У турбулентному примежовому шарі слоїста течія газу руйнується, частки газу крім прямолінійного руху у напрямку потоку мають обертальний рух і переміщення хаотично по товщині примежового шару, в результаті чого частинки газу рухаються по складним траєкторіям. При цьому виникає додатковий опір тертя, пов'язаний з переходом частинок газу з одного режиму течії на інший, що призводить до зміни (зменшення або збільшення) кількості руху рідини.

Ковзна напруга тертя при турбулентному режимі течії:

$$\tau_t = \rho * l^2 * \left(\frac{\Delta V_x}{\Delta y}\right)^2$$

де

$l$  - довжина шляху змішування частинок газового потоку, м;

$\rho$  - масова щільність газу,  $\text{кг} / \text{м}^3$ .

Розглянемо відносну зміну швидкості течії по товщині примежового шару (рис 5.1.7).

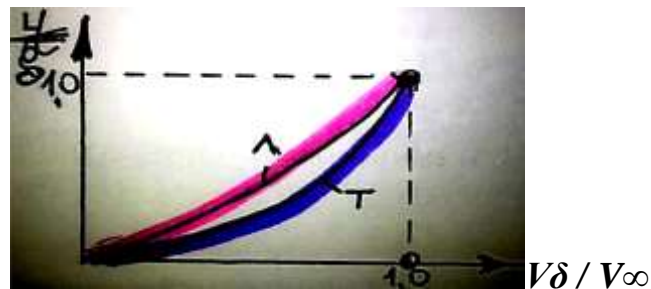


Рис 5.1.7 Схема зміни товщини примежового шару від швидкості течії

Швидкість течії газового потоку при ламінарній і турбулентній течії, можна визначити за формулами:

$$V_L = V\delta \left[ \left( \frac{3}{2} * \left( \frac{y}{\delta} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{y}{\delta} \right)^3 \right) \right]$$

$$V_T = V\delta \left( \frac{y}{\delta} \right)^{\frac{1}{7}}$$

Зміну товщини примежового шару і ковзної напруги тертя можна представити графічно по довжині плоскої пластини (рис 5.1.8):

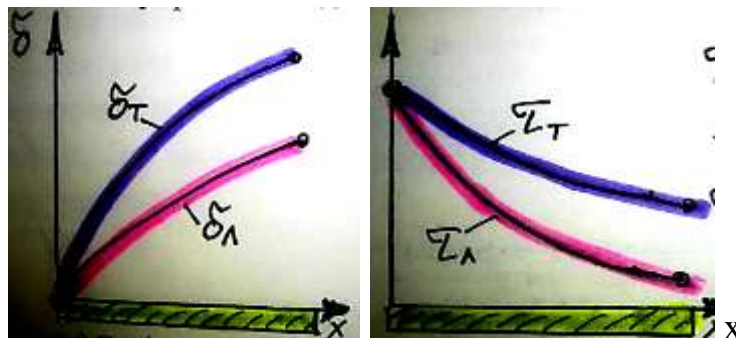


Рис 5.1.8 Графіки залежності товщини і ковзної напруги по довжині пластини

$$\delta_L = 4,64 \sqrt{\frac{\nu * x}{V\delta}} = 4,64, \frac{x}{\sqrt{Re, x}}; \quad \delta_m = 0,37 \sqrt[5]{\frac{\nu * x^4}{V\delta}} = 0,37 \frac{x}{\sqrt[5]{Re, x}}$$

$$\tau_L = \frac{3}{2} \mu \frac{V\delta}{\delta_L^2} = \frac{3}{2} \rho \frac{V\delta^2}{Re, \delta}, \quad \tau_m = 0,0225 \rho V\delta^2 \frac{\nu}{V\delta * \delta T}^{\frac{1}{4}} = 0,0225 \rho V\delta^2 \frac{1}{Re, \delta *}^{\frac{1}{4}}$$

$$Re, x = \frac{V\delta * x}{\nu} \text{ (по довжині пластини); } Re, \delta = \frac{V\delta * \delta}{\nu} \text{ (по товщині примежовому шару)}$$

З формул і графічних залежностей випливає, що товщина прилежого шару від носика пластини до хвостика збільшується пропорційно:

- при ламінарній течії,  $\delta_l \approx \sqrt{x} = (x^{\frac{1}{2}})$
- при турбулентній течії,  $\delta_t \approx \sqrt[5]{x^4} = (x^{\frac{4}{5}})$

При цьому напруження тертя в прилежому шарі змінюється по мірі віддалення від носика обтікаємого тіла:

- при ламінарній течії,  $\tau_l \approx \frac{1}{\sqrt{x}} = (\frac{1}{x^{\frac{1}{2}}})$
- при турбулентній течії,  $\tau_t \approx \frac{1}{\sqrt[5]{x^4}} = (\frac{1}{x^{\frac{4}{5}}})$

## 2 Задачі: 5.1.2:

- 1) Визначити товщину і козну напруження в прилежому шарі при ламінарній структурі течії в місці максимальної товщини профілю при координаті  $x = 0,5 \text{ м}$ , швидкість течії  $V = 120 \text{ км/год}$  на висоті польоту  $H = 1000 \text{ м}$ .
- 2) Визначити товщину і козну напруження в прилежому шарі при турбулентній структурі течії в місці максимальної товщини профілю при координаті  $x = 0,5 \text{ м}$ , швидкість течії  $V = 420 \text{ км/год}$  на висоті польоту  $H = 2000 \text{ м}$ .

## 5.1.3 Умови зміни структури прилежого шару. Характеристика числа Рейнольдса

Перехід ламінарного режиму течії в турбулентний здійснюється в певній зоні або по лінії. Так як ми розглядаємо двомірну течію, то замість зони будемо розглядати точку або лінію переходу ламінарного прилежого шару в турбулентний. Знати положення точки переходу ламінарної течії в турбулентну дуже важливо, тому що опір тертя істотно залежить від типу прилежого шару (рис 5.1.9).

Так наприклад, при числах Рейнольдса  $Re = 1 * 10^6$  опір тертя пластини при турбулентній течії в **14 разів** більше ніж при ламінарній течії.

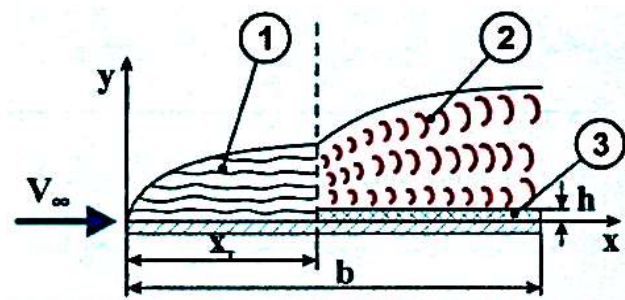


Рис 5.1.9 Схема зміни структури прилежого шару

Основним фактором, який дозволяє визначити положення точки переходу з одного режиму течії на інший є число Рейнольдса. Крім цього на положення точки переходу впливають:

- стан поверхні обтікаємого тіла;
- розподіл нормального тиску по поверхні обтікаємого тіла;
- ступінь турбулентності набігаючого потоку.

При течії потоку від носика пластини до її хвостової частини число Рейнольдса ( $Re$ ) збільшується через збільшення довжини пластини (координати  $x_T$ ). В ході експериментів встановлено, що ламінарний режим течії переходить в турбулентний при певному значенні числа Рейнольдса ( $Re$ ). Це число прийнято називати *критичним* числом Рейнольдса ( $Re_{кр}$ ). Відповідно положення точки переходу залежить від критичного числа Рейнольдса:

$$Re_{ext} = Re_{кр}; \uparrow Re = \frac{V \cdot b \uparrow}{\nu}$$

У дослідженнях встановлено, що при числі Рейнольдса  $Re = 2320$  відбувається зміна структури примежового шару. Дослідним шляхом можна визначити координату точки переходу ( $x_T$ ) і критичне число Рейнольдса ( $Re_{кр}$ ).

Величина критичного числа Рейнольдса ( $Re_{кр}$ ) залежить від:

- шорсткості поверхні обтікаємого тіла; стисливості газу;
- співвідношення температури обтікаємого тіла і незбуреного газового потоку;
- ступеня турбулентності набігаючого потоку.

Знаючи величину ( $Re_{кр}$ ) можна визначити положення точки переходу ( $x_T$ ). При різних швидкостях потоку і параметрах стану газу:

$$x_T = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{V}$$

Відносне значення точки переходу можна визначити:

$$\bar{x}_T = \frac{x_T}{b} = \frac{Re_{кр} \cdot \nu}{V \cdot b} = \frac{Re_{кр}}{Re}$$

Як впливає з формули, точка переходу ламінарного режиму течії в турбулентний при збільшенні швидкості потоку зміщується вперед, тобто збільшується зона турбулентного течії. Фізично число  $Re$  характеризує ступінь впливу сил в'язкості на сили нормального тиску при русі тіл у в'язкому газовому середовищі і є відношенням сил тиску пропорційних ( $\rho V^2$ ) до сил в'язкого тертя пропорційних ( $\mu \frac{V}{l}$ ).

Чим більша в'язкість середовища ( $\nu \uparrow$ ) тим менше число Рейнольдса ( $\downarrow Re = \frac{V \cdot l}{\nu}$ ). Це означає, що при малих числах Рейнольдса ( $Re$ ) роль в'язкості в розгляді аеродинамічних явищ досить велика, при великих числах ( $Re$ ) - ця роль надзвичайно мала.

### 3 Задачі: 5.1.3:

- 1) Визначити коефіцієнт кінематичної в'язкості повітря і число Рейнольдса на висоті **8000 м**, якщо коефіцієнт динамічної в'язкості на цій висоті рівняється  **$1,457 \cdot 10^{-5} \text{ Н с/м}^2$** , швидкість літака рівняється **420 км/год**, діаметр фюзеляжу літака рівняється **5 м**.
- 2) Визначити число Маха і число Рейнольдса на висоті **9000 м**, якщо швидкість літака рівняється **900 км/год**, коефіцієнт динамічної в'язкості на цій висоті рівняється  **$1,457 \cdot 10^{-5} \text{ Н с/м}^2$** , хорда крила рівняється **1,5 м**.
- 3) По трубопроводу діаметром  **$d = 50 \text{ мм}$**  і довжиною  **$l = 10 \text{ м}$**  рухається гас. Визначити напор  **$H$** , при якому виникає зміна ламінарного режиму течії на турбулентний. Коефіцієнт кінематичної в'язкості гасу  **$\nu = 2,5 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$** .
- 4) Визначити діаметр трубопроводу, по якому подається рідина з витратами  **$Q_w = 0,01 \text{ м}^3/\text{с}$**  при умові забезпечення в ньому максимально-можливої швидкості зі збереженням ламінарного режиму течії, коефіцієнт кінематичної в'язкості рідини рівняється  **$\nu = 1 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$** .