

**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 2.1: Поняття про потік рідини і газу, види руху і його основні властивості і елементи**

### **План лекції:**

- 1 Поняття про потік рідини і газу.
- 2 Прямолінійний рівномірний рух рідини і газу.
- 3 Поняття про обертальний рух рідини і газу.
- 4 Теоретичні моделі моделювання обтікання тіл потоком рідини і газу
- 5 Фізична картина обтікання твердих тіл потоком рідини і газу

### **Рекомендована література:**

#### **Основна:**

1. Котельников 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 2.1: ПОНЯТТЯ ПРО ПОТІК РІДИНИ І ГАЗІВ, ВИДИ РУХУ ТА ЙОГО ВЛАСТИВОСТІ

#### План лекції:

##### *2.1.1 Поняття про потік рідини і газу*

##### *2.1.2 Прямолінійний рівномірний рух рідини і газів*

##### *2.1.3 Поняття про обертальний рух рідини і газу*

#### 2.1.1 Поняття про потік рідини і газу

##### *2.1.1.1 Місце теорії у вивченні середовища*

Аерогідрогазодинаміка як наука вивчає явища, які пов'язані з рухом рідини і газу. Вивчення законів руху рідини і газу, їх взаємодія з твердими тілами можливо на основі теоретичних знань.

Яка ж роль теорії в пізнанні навколишнього нас середовища ?

**1 По-перше**, теорія повинна об'єднувати сукупність явищ, приводячи їх до деякого простішого вигляду, який дозволяє застосування математичного методу досліджень.

**2 По-друге**, теорія дає можливість проводити різні практичні розрахунки і визначати, *наприклад*, раціональні форми, компонування і розміри сучасних *ЛА*, а також призначення і склад авіаційного обладнання.

**3 В-третьх**, правильна теорія відображає об'єктивну істину і тому її розвиток може передбачати нові явища, які ще невідомі, незнайомі і не вивчені.

##### ***Коротка характеристика розвитку теорії пізнання істини.***

Спочатку з'явилася теорія І. Ньютона, яка розглядала середовище як дискретну структуру, що складається з окремих частинок рідини чи газу, незв'язаних між собою, так званих «корпускулами».

Потім теорію доповнив Л. Ейлер, який запропонував розглядати середовище суцільною ідеальною рідиною, позбавленою в'язкості і стисливості, здатної передавати тільки нормальний тиск на поверхні обтікаємого тіла. Ця теорія дозволяла скласти систему диференціальних рівнянь і визначати швидкості і тиск будь-якій точці потоку рідини.

Пізніше з'явилася теорія про в'язке середовище, запропонована Л. Прандтлем, яка дозволила враховувати сили тертя, викликані властивістю в'язкості і створити теорію про примежовий шар.

В середині 20 століття з'явилася нова теорія - теорія газів, яка була розроблена не на основі корпускулярної теорії І. Ньютона, а на основі теорії надшвидкого руху

окремих частинок матерії, що рухаються і соударяються з тілами відповідно до кінетичної-молекулярної теорії газів.

Таким чином, теорія пізнання фізичних явищ і природи не стоїть на місці, а постійно розвивається, удосконалюється і збагачується.

### 2.1.1.2 Поняття про потік рідини і газу

Потоком рідини і газу називається спрямоване переміщення частинок маси речовини в просторі з певними швидкостями і в заданому напрямку. Розрізняють *усталені* і *неусталені* потоки.

**Сталим потоком** називається такий потік, в якому напрям і величина швидкостей частинок рідини і газу, а так само фізичних параметрів стану середовища  $(p, \rho, T, a)$  з часом не змінюються. Такий потік носить назву - *стаціонарний потік* ( $V = f(x, y, z)$ ).

**Не сталим потоком** називається такий потік в якому напрямок і величина швидкостей частинок рідини і газу, а також фізичні параметри стану середовища  $(p, \rho, T, a)$  з часом змінюються. Такий потік носить назва - *не стаціонарний потік* ( $V = f(x, y, z, t)$ ).

### 2.1.1.3 Види руху рідини і газу

Рух рідини характеризується напрямком і швидкістю частинок рідини в окремих точках потоку, загальною формою і фізичними параметрами потоку. Спостерігаючи за рухом частинок, можна переконатися, що швидкість руху в різні моменти часу і в різних точках потоку можуть сильно відрізнятись. При цьому методи спостереження за рухом частинок потоку рідини можуть бути різними.

В науці відомі два основних методи вивчення руху частинок рідини і реєстрації параметрів середовища: методи **Лагранжа** і **Ейлера**.

**1 За першим методом**, можна вибрати в масі рідини, що рухається і газі, одну якусь частинку і рухаючись разом з нею спостерігати за її швидкістю в різних точках траєкторії і вимірювати всі параметри стану рухомого середовища (*метод Лагранжа*) (рис 2.1.1).

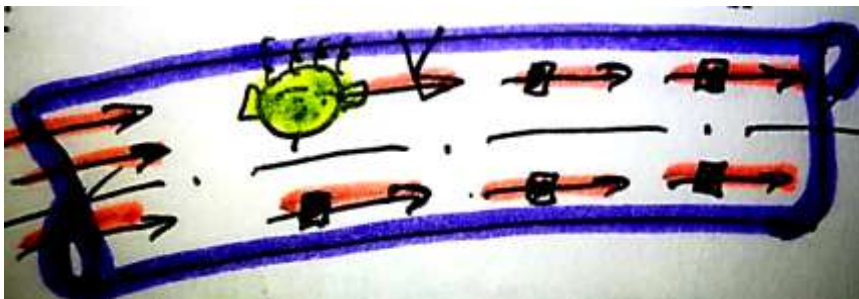


Рис 2.1.1 Схема спостерігання за параметрами потоку за методом Лагранжа

**2 За другим методом**, можна вибрати одну яку - небудь точку поруч з потоком і залишаючись нерухомим, спостерігати за швидкостями різних частинок рідини, які протікають повз цієї точки і вимірювати параметри стану рухомого середовища (**метод Л. Ейлера**) (рис 2.1.2).

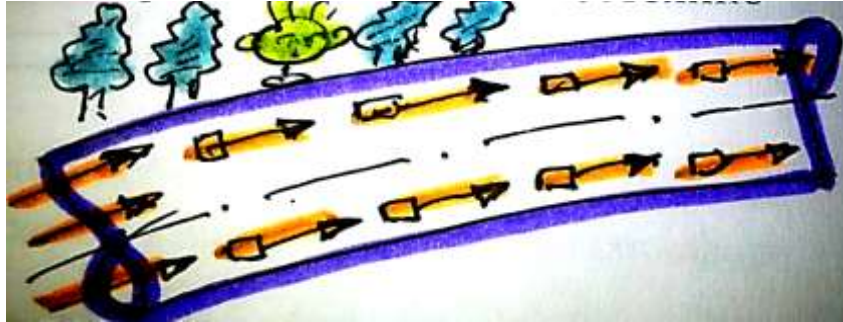


Рис 2.1.2 Схема спостерігання за параметрами потоку за методом Ейлера

Застосування методу Л. Ейлера спрощує дослідження обтікання тіл на підставі вивчення законів руху рідин і газів повз нерухомої точки, і дозволяє використовувати більш простий апарат математичного моделювання та аналізу.

Крім цього, в рідині поряд з поступальним рухом можливі і обертальні рухи частинок. Потік в якому частинки рідини або газу обертаються навколо свого центру мас (або геометричного центру) з деякою кутовою швидкістю ( $\omega$ ) називається вихровим. Кутова швидкість обертання частинок рідини чи газу має місце там, де є градієнт швидкості по товщині течії потоку ( $\frac{dV_x}{dy}$ ).

**Таким чином, в загальному випадку рух рідини і газу включає в себе: прямолінійний рух, обертальний рух, деформацію частинок потоку і їх хаотичний рух по перетину потоку рідини.**

### 2.1.2 Прямолінійний рівномірний рух рідини і газів

Розглянемо виникнення швидкостей і прискорень при дослідженні руху рідини за методом Л. Ейлера (рис 2.1.3).

Визначимо в певний момент часу ( $t$ ) невеличку частинку, яка знаходиться в  $m.A$  з координатами ( $x, y, z$ ). В момент часу ( $t + \Delta t$ ) точка переміститься в  $m.B$  і координати зміняться ( $x + \Delta x; y + \Delta y; z + \Delta z$ ). Можна записати і складові швидкості частинок по осях  $ox; oy; oz$ .

$$V_x = \frac{dx}{dt}; V_y = \frac{dy}{dt} V_z = \frac{dz}{dt}$$

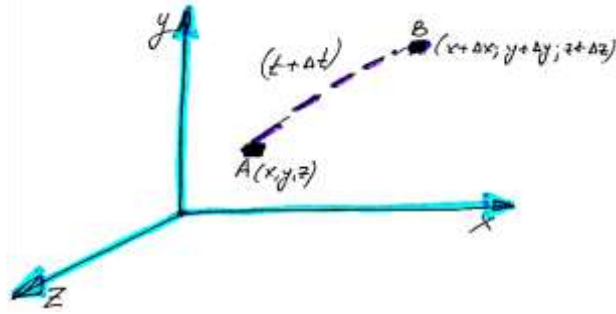


Рис 2.1.3 Схема просторового переміщення частинок повітря

Визначивши швидкості в довільній точці простору можна зробити висновок, що їх можна виразити у вигляді функції координат і часу (*метод Ейлера*).

$$V = V(x; y; z; t)$$

$$V_x = V_x(x; y; z; t)$$

$$V_y = V_y(x; y; z; t)$$

$$V_z = V_z(x; y; z; t)$$

При переміщенні з  $m.A$  в  $m.B$  змінюються координати частинок рідини і газу протягом деякого часу ( $t$ ), а значить і змінюються їх швидкості і прискорення, і як наслідок це призведе до зміни інших фізичних параметрів ( $p, \rho, T, a$ ).

$$dV_x = \frac{\partial V_x}{\partial x} * dx + \frac{\partial V_x}{\partial y} * dy + \frac{\partial V_x}{\partial z} * dz + \frac{\partial V_x}{\partial t} * dt$$

$$dV_y = \frac{\partial V_y}{\partial x} * dx + \frac{\partial V_y}{\partial y} * dy + \frac{\partial V_y}{\partial z} * dz + \frac{\partial V_y}{\partial t} * dt$$

$$dV_z = \frac{\partial V_z}{\partial x} * dx + \frac{\partial V_z}{\partial y} * dy + \frac{\partial V_z}{\partial z} * dz + \frac{\partial V_z}{\partial t} * dt$$

Розділимо обидві частини рівняння на  $dt$  і отримаємо:

$$w_x = \frac{dV_x}{dt} = \frac{\partial V_x}{\partial x} * V_x + \frac{\partial V_x}{\partial y} * V_y + \frac{\partial V_x}{\partial z} * V_z + \frac{\partial V_x}{\partial t}$$

$$w_y = \frac{dV_y}{dt} = \frac{\partial V_y}{\partial x} * V_x + \frac{\partial V_y}{\partial y} * V_y + \frac{\partial V_y}{\partial z} * V_z + \frac{\partial V_y}{\partial t}$$

$$w_z = \frac{dV_z}{dt} = \frac{\partial V_z}{\partial x} * V_x + \frac{\partial V_z}{\partial y} * V_y + \frac{\partial V_z}{\partial z} * V_z + \frac{\partial V_z}{\partial t}$$

Аналогічно отримаємо рівняння зміни інших параметрів стану повітря:

$$\frac{dp}{dt} = \frac{\partial p}{\partial x} * V_x + \frac{\partial p}{\partial y} * V_y + \frac{\partial p}{\partial z} * V_z + \frac{\partial p}{\partial t}$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \frac{\partial \rho}{\partial x} * V_x + \frac{\partial \rho}{\partial y} * V_y + \frac{\partial \rho}{\partial z} * V_z + \frac{\partial \rho}{\partial t}$$

У разі сталого потоку в фіксованих перерізах параметри стану повітря з часом не змінюються:



$$\frac{\partial V_x}{\partial t} + \frac{\partial V_y}{\partial t} + \frac{\partial V_z}{\partial t} + \frac{\partial V_p}{\partial t} + \frac{\partial V_\rho}{\partial x} = 0$$

При сталому русі потоку швидкість, тиск і щільність є лише функціями координат точки. Це означає, що через дану точку простору всі частинки потоку проходять з однаковою швидкістю.

Потік рідини і газу характеризується певними поняттями і визначеннями, які використовуються в аерогідрогазодинаміці.

### 1 Траєкторія

Траєкторією називається лінія, що представляє собою геометричне місце точок, послідовно проходящих однієї і тієї ж частинкою рідини при її русі в просторі і являє собою як би слід рухомої частинки в середовищі (рис 2.1.4).

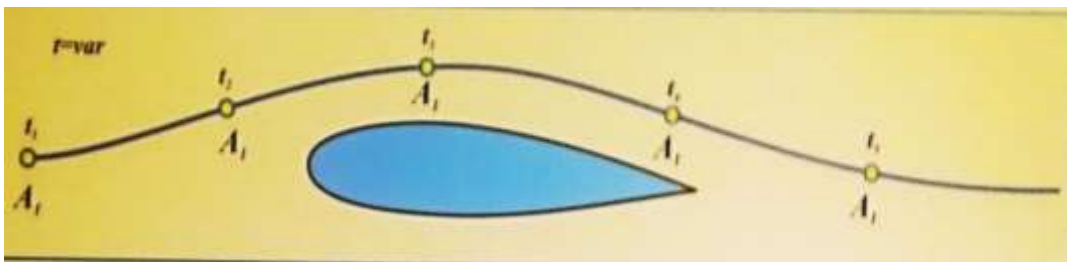


Рис 2.1.4 Схема траєкторії частинок рідини

### 2 Лінія струму

Лінією струменя називається така лінія проведена в потоці рідини, в кожній точці якої в певний момент часу вектор швидкості руху частинок збігається з напрямком дотичної до цієї лінії (рис 2.1.5).

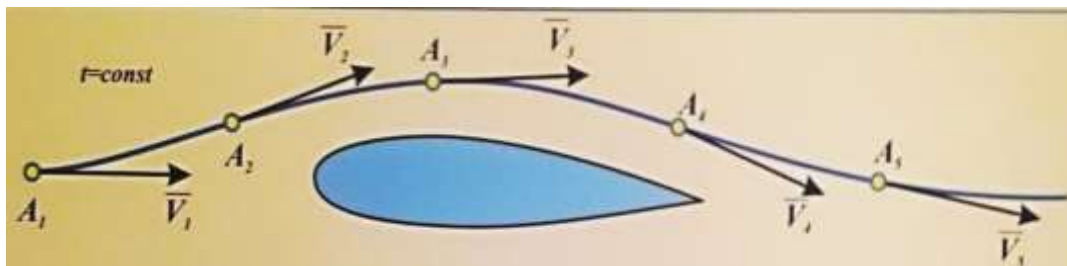


Рис 2.1.5 Схема лінії струменю

### 3 Трубка потоку

Трубною потоку називається об'ємна поверхня утворена лініями струмків, що проходять через деякий нескінченно малий замкнутий контур (рис 2.1.6).

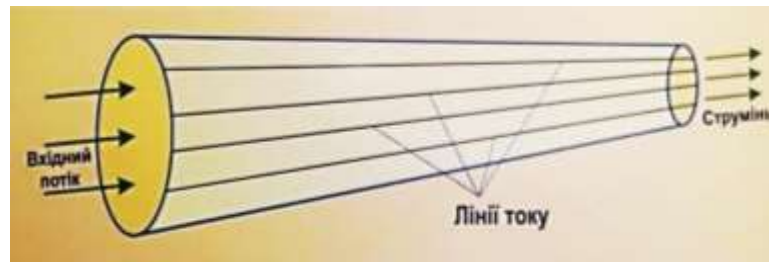


Рис 2.1.6 Схема трубки току

#### 4 Струйка

*Струйкою називається частина потоку рідини що рухається всередині трубки потоку. Через бічну поверхню трубки потоку відсутня витрата рідини.*

Якщо течія усталена, то конфігурація ліній струйок не змінюється з часом і в цьому випадку лінії струйок збігаються з траєкторією. У сталому потоці трубка потоку зберігає незмінне положення в просторі.

Картину, яка показує розподіл ліній струйок навколо обтікаємого тіла, називають спектром обтікання цього тіла. Щоб отримати спектр обтікання дослідним шляхом, необхідно зробити видимим рух частинок рідини в потоці. Це можна досягти або введенням в потік газу струйок диму або тонких шовкових ниток, а в потік рідини вводяться підфарбовані рідини або використовуються інші методи візуалізації потоку (рис 2.1.7).

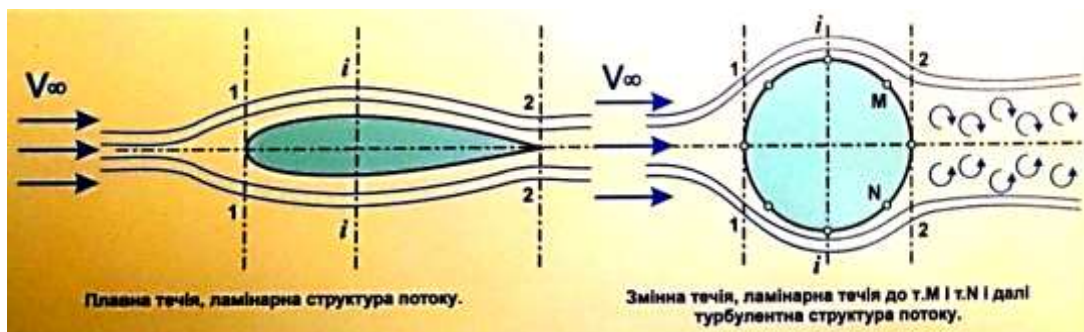


Рис 2.1.7 Схема спектрів обтікання твердих тіл потоком повітря

#### 2.1.3 Поняття про обертальний рух рідини і газу

Іноді рідина приходить в обертальний рух, який називається вихровим рухом подібно до того, як рухається вода в річкових вирах. Умови для завихрення створюються, *наприклад*, при обтіканні тіл з гострими поперечними ребрами або затупленою задньою кромкою. Струйки, обтікаючи погано обтікаємі тіла не можуть різко під кутом, змінювати напрямок свого руху, тому з цих струйок і

підсмоктується з застійної зони рідини формуються вихори, що зриваються з гострих кромek або областей різкої зміни напрямку руху, які зноється потоком.

Потік рідини (газу) в якому частинки обертаються навколо свого центру мас з деякою кутовою швидкістю ( $\vec{\omega}$ ) **називається вихровим**.

Для теоретичних міркувань про вплив вихорів використовується основні поняття руху вихрового потоку.

### **1 Кутові швидкості обертання**

В загальному випадку рухається частинка газу, що рухається, переміщається прямолінійно, обертається навколо своєї осі і деформується. Розглядаючи рух і обертання елементарної частинки з урахуванням деформації можна отримати розрахункові формули для кутової швидкості  $\vec{\omega}$ .

$$\vec{\omega} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} i & j & k \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ V_x & V_y & V_z \end{pmatrix}$$

Розкриваючи матрицю можна отримати розрахункові формули для визначення кутової швидкості в проекціях на осі координат.

$$\omega_x = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_z}{\partial y} - \frac{\partial V_y}{\partial z} \right)$$

$$\omega_y = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_x}{\partial z} - \frac{\partial V_z}{\partial x} \right)$$

$$\omega_z = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial V_y}{\partial x} - \frac{\partial V_x}{\partial y} \right)$$

Кутова швидкість обертання частинок рідини мають місце там, де є градієнт швидкості течії по перерізу потоку рідини.

### **2 Вихрова лінія, вихрова трубка, вихровий шнур**

**2.1 Вихровий лінією** називається лінія, в кожній точці якої в даний момент часу ( $t$ ), вектор кутової швидкості обертання частинок рідини спрямований по дотичній до неї (рис 2.1.8).

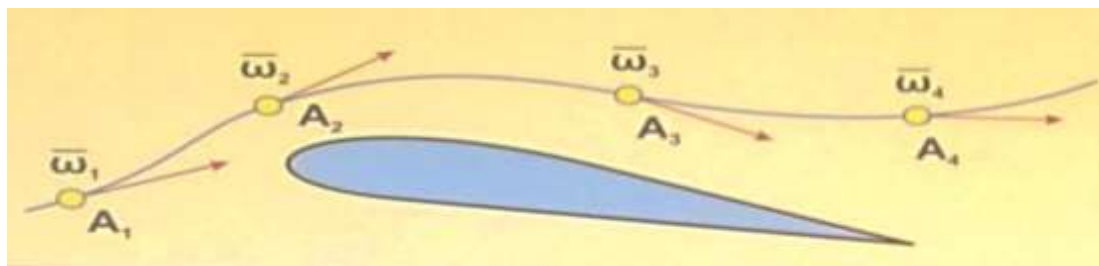


Рис 2.1.8 Схема вихрової лінії

Якщо через всі крапки замкнутого контуру поперечного перерізу вихору провести вихрові лінії, то отримаємо поверхню, що називається вихровою трубкою.

**2.2 Вихровою трубкою** називається об'ємна поверхня утворена вихровими лініями, що проходять через деякий нескінченно малий контур в просторі. Всередині вихрової трубки частинки здійснюють обертально - поступальний рух. Ці частинки утворюють вихровий шнур (рис 2.1.9).

**2.3 Вихровим шнуром** називається частина потоку рідини, що рухається всередині вихрової трубки.

Нескінченно тонкий вихровий шнур в аеродинаміці називається вихровою ниткою.

На практиці вихрові шнури мають місце при перетіканні повітря на кінцях консолей крила з нижньої поверхні на верхню, а саме здійснюється перетікання повітря з області високого тиску під крилом в область низького тиску над крилом (рис 2.1.10). Крім цього вихровий рух виникає при обтіканні виступаючих в потоці твердих тіл з гострими крайками.

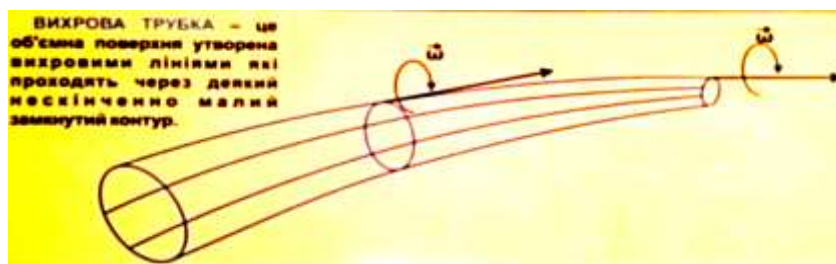


Рис 2.1.9 Схема вихрової трубки току

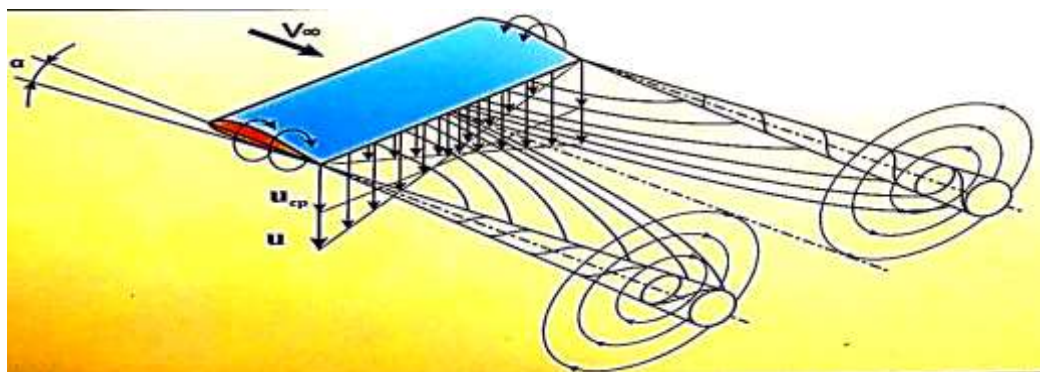


Рис 2.1.10 Схема утворення вихрового сліду за крилом