

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 4- Закономірності вихрового руху потоку.
Теорема М. Є. Жуковського про підйомну силу крила

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.

ЛЕКЦИЯ 4.1: Закономірності вихрового руху потоку рідини і газу. Основні теореми про вихри.

План лекції:

- 1 Закономірності вихрового руху потоку рідини і газу.
- 2 Основні теореми про вихорі.

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 4.1: ЗАКОНОМІРНОСТІ ВИХРОВОГО РУХУ ГАЗОВОГО ПОТОКУ. ОСНОВНІ ТЕОРЕМИ ПРО ВИХОРИ

План лекції:

4.1.1 Закономірності вихрового руху потоку рідини і газів

4.1.2 Основні теореми про вихори

4.1.1 Закономірності вихрового руху потоку рідини і газів

При обтіканні аеродинамічних тел повітряним потоком, швидкість течії в струмках потоку змінюється в міру віддалення від поверхні обтікаємого тіла. У реальному повітряному потоці відмінність швидкостей між сусідніми струйками призводить до виникнення дотичних сил тертя, розмір яких пропорційний градієнту швидкості по товщині шару повітряного потоку (рис 4.1.1).

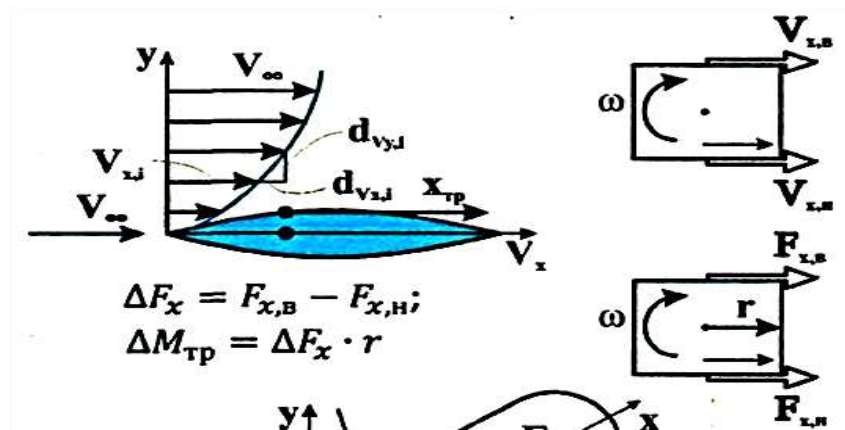


Рис 4.1.1 Схема виникнення вихрового руху частинок

$$\tau = \mu \frac{dv_x}{dy}; X_{TP} = \tau * S; M_{TP} = X_{TP} * r; \omega = f(M_{TP})$$

Внаслідок властивостей в'язкості між слоями стуйки виникають сили тертя. При цьому слої струйки з великими швидкостями захоплюють за собою уповільнені слої, а слої струйок з меншими швидкостями гальмують слої, які рухаються з великими швидкостями. У свою чергу великі швидкості викликають великі сили тертя.

Таким чином, виникає пара сил тертя, які на радіусі до центру мас (або геометричного центру) частинок викликають появу моменту тертя і як наслідок призводять до виникнення обертального руху частинок, яке називається вихровим рухом.

В реальному потоці вихрова течія повітря утворюється при обтіканні тіл з затупленою задньою крайкою або з гострими поперечними кромками (рис 4.1.2). Вихори, в залежності від їх інтенсивності, при обертанні з деякою кутовою швидкістю, втягують в обертальний рух сусідні стуйки рідини або газу, які були нерухомими або рухалися прямолінійно і рівномірно, таким чином викликають обертальний рух в додатковій масі навколишнього середовища.

Положення вихорів в просторі визначається вихровими лініями. Потужність вихорів оцінюється їх **напругою** (або *інтенсивністю*).

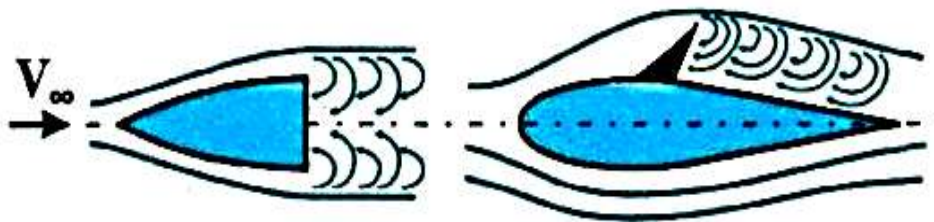


Рис 4.1.2 Схема джерел вихрового руху

У загальному випадку напруга вихору визначається рівнянням (рис 4.1.3):

$$\Gamma = 2 \iint \omega \cdot dS, \text{ для загального випадку, коли } \omega = f(t)$$

Напругою вихору (Γ) називається фізична величина яка рівняється удвоєному подвійному інтегралу добутку кутової швидкості обертання вихору на площу поперечного перерізу вихору.

Для окремого випадку, коли: $\omega = \text{const}$, рівняння напруги вихору має вигляд:

$$\Gamma = 2 \cdot \omega_n \cdot S$$

де

ω_n — нормальна складова результуючого вектора кутової швидкості обертання вихору, $1/\text{с}$;

S — площа поперечного перерізу вихору, м^2 .

Всередині кожного вихору окружна швидкість обертання частинок рідини чи газу пропорційна кутовий швидкості обертання і відстані від центру вихору до кола вихору $U = \omega \cdot r$

В навколишньому середовищу вихор збуджує обертальний рух раніше нерухомих частинок рідини чи газу (рис 4.1.3).

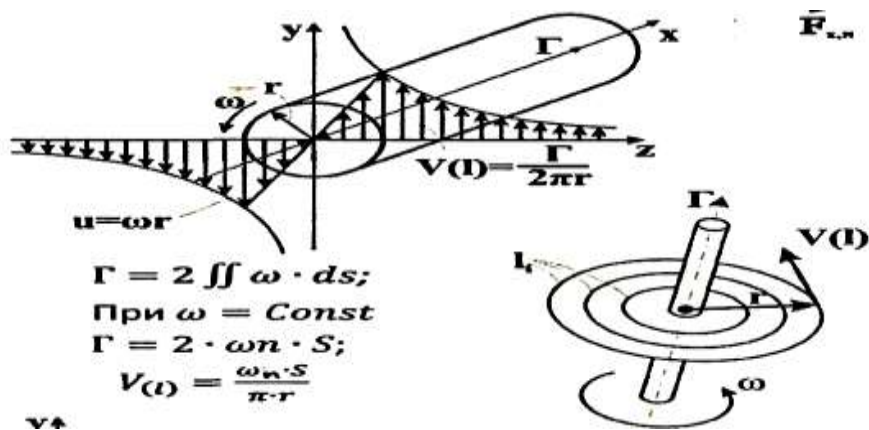


Рис 4.1.3 Схема виникнення індукованої вихором збуреної швидкості де

V_ℓ – індукуюваною вихором колова швидкість на довільному замкнутому контуру (ℓ), м / с;

$U = \omega \cdot r$ – колова швидкість по площі вихору, м / с.

Колова швидкість, індукована нескінченним прямолінійним вихровим шнуром, можна визначити за формулою:

$$V_\ell = \frac{2 \iint \omega \cdot d\mathbf{S}}{2\pi r}, \text{ для } \omega = f(t)$$

$$V(\ell) = \frac{\Gamma}{2\pi r} = \frac{2\omega_n \cdot S}{2\pi r} = \frac{\omega_n \cdot S}{\pi r}, \text{ для } \omega_n = \text{const}$$

Вихровий рух характеризується поняттям циркуляції швидкості по довільному замкнутому контуру (рис 4.1.4):

$$J(\ell) = \oint V_\ell \cdot d\ell$$

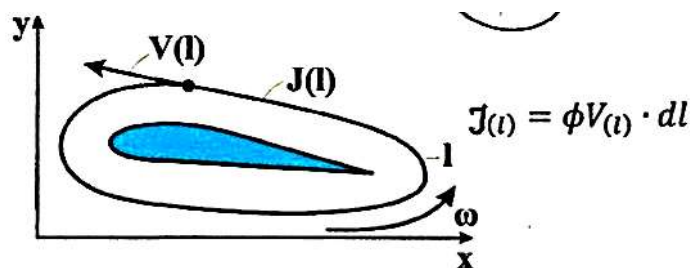


Рис 4.1.4 Схема виникнення циркуляції швидкості по замкнутому контуру

Циркуляцією швидкості по замкнутому контуру ($J(l)$) називається величина, яка визначається криволінійним інтегралом добутку дотичної складової індукованої вихором швидкості на довжину замкнутого контуру.

1 Задачі: 4.1.1:

- 1) Визначити для нескінченного вихору напругу, індуктивну швидкість і колову швидкість на перерізі вихору якщо частота обертання вихору рівняється $\omega_0 = 25 \text{ }^1/\text{с}$, площа перерізу вихору $S_0 = 80 \text{ см}^2$, радіус кола, що охоплює вихор рівняється $R = 40 \text{ см}$.
- 2) Визначити, як зміниться повний тиск в критичній точці носової частини фюзеляжу літака при зміні висоти польоту з $H_1 = 1000 \text{ м}$ до $H_2 = 5000 \text{ м}$ при швидкості $V = 720 \text{ км/год}$.

4.1.2 Основні теореми про вихори

У загальному вигляді вихор характеризується певними геометричними параметрами: площею поперечного перерізу вихору і довжиною, а також кінематичними параметрами: кутовий швидкістю обертання вихору і його напругою (рис 4.1.5).

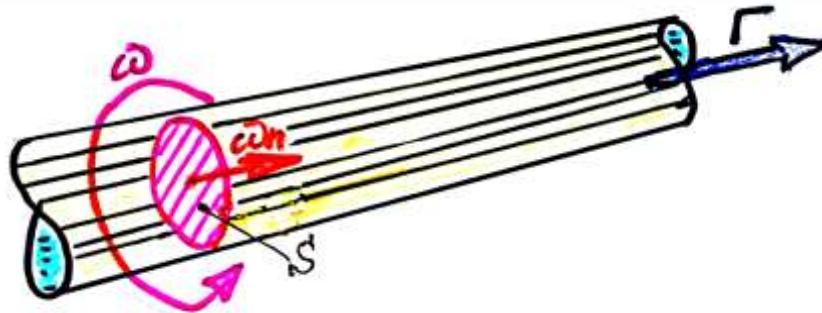
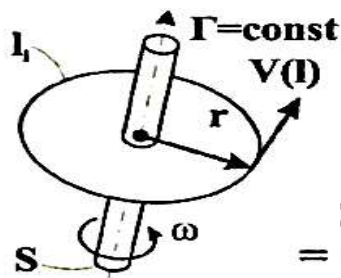


Рис 4.1.5 Схема кінематичних параметрів вихору

4.1.2.1 Теорема Гельмгольца

Визначення: напруга (інтенсивність) вихору по його довжині не змінюється в часі і є величиною постійною (рис 4.1.6):



Напруга по довжині вихора не змінюється з часом. Вихрові шнури повинні бути замкнутими, спиратись на тверді поверхні або менш нескінченну довжину

$$\mathcal{I}(t) = \oint V(t) \cdot dl =$$
$$= \oint (V_x \cdot dx + V_y \cdot dy + V_z \cdot dz)$$

Рис 4.1.6 Кінематична схема вихору

В ідеальній рідині несучі поверхні можна моделювати вихорами, які дозволяють визначати збурені швидкості і тиск і як наслідок розраховувати аеродинамічні сили на моделюємому вихорами тілі.

Слідство теореми:

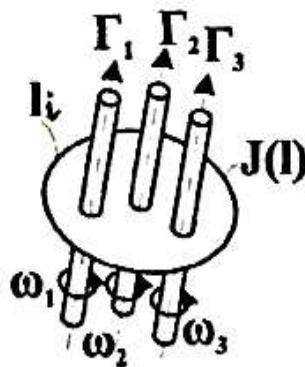
- вихрові шнури повинні бути замкнутими по контуру;
- вихрові шнури повинні спиратися на будь-які тверді поверхні;
- вихрові шнури повинні мати нескінченну довжину.

Якщо розглянути довільний замкнутий контур, то циркуляцію швидкості по цьому контуру можна представляти як проекції результуючої циркуляції швидкості на відповідні вісі координат:

$$J(\ell) = \oint_{\ell} \mathbf{v} \cdot d\ell = \oint_{\ell} (V_x \cdot dx + V_y \cdot dy + V_z \cdot dz)$$

4.1.2.2 Теорема Стокса

Визначення: циркуляція швидкості по замкнутому контуру (ℓ) дорівнює сумарній напрузі всіх вихорів, які охоплюються цим контуром (рис 4.1.7).



$$\Gamma_{\Sigma} = \Gamma_1 + \Gamma_2 + \Gamma_3;$$

$$J(l) = \Gamma_{\Sigma} = \sum \Gamma_i;$$

Циркуляція швидкості по замкнутому контуру дорівнює сумі напруг вихорів, які охоплені цим контуром

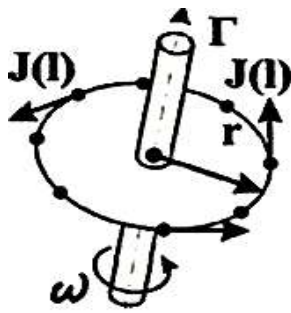
Рис 4.1.7 Схема сумарної напруги вихорів

Теорема використовується при моделюванні несучих поверхонь декількома прямолінійними вихорами, які створюють сумарну циркуляцію швидкості по довільному контуру, що охоплює вихрові шнури.

4.1.2.3 Теорема Томпсона

Визначення: циркуляція швидкості по замкнутому контуру, що проходить через одні й ті ж точки в просторі і з часом не змінюється (рис 4.1.8).

$$J(\ell)_t = \Gamma_t = \text{const}$$



$\mathcal{J}(t).t = F_t = \text{Const}$
 Циркуляція швидкості
 по замкнутому контуру, який
 проходить через одні і ті ж частки
 середовища, з часом не
 змінюється

Рис 4.1.8 Схема циркуляції швидкості по замкнутому контуру

Слідство теореми: Якщо в ідеальній рідині циркуляція швидкості по замкнутому контуру з часом дорівнює нулю (тобто рух невихровий), то воно буде невихровим і в наступні моменти часу.

2 Задачі: 4.1.2:

- 1) Визначити приладову і повітряну швидкості та швидкісний тиск на висоті $H = 6000 \text{ м}$, якщо повний тиск рівняється $p^* = 1,1 \cdot 10^5 \text{ Па}$.
- 2) Визначити, як зміниться масова витрата повітря при швидкості $V = 720 \text{ км/год}$ на висоті $H = 3000 \text{ м}$ при зміні діаметру повітряного потоку з $d_1 = 50 \text{ см}$ до $d_2 = 0,9 \text{ м}$.