

## «Інженер БПЛА. Базовий курс»

### Модуль 1. Теоретична база для майбутнього інженера БПЛА

#### 1.1. Основи аеродинаміки: визначення, основні принципи, поняття та гіпотези

**Автор: Володимир Петрович Харченко, доктор технічних наук, професор, заслужений діяч науки і техніки України, лауреат Державної премії України в галузі науки і техніки**

Вітаю, у цьому модулі ми розглянемо основи аеродинаміки, метеорології, та сучасну класифікацію БПЛА. Спочатку згадаємо основні відомості з аеродинаміки та динаміки польоту, які будуть викладені у максимально спрощеному і зрозумілому форматі.

Не всі з вас знайомі з математичним апаратом, необхідним для фундаментального вивчення цих наук. Проте, щоб коректно вирішувати завдання поліпшення ефективності літальних апаратів (ЛА), що стоятимуть перед вами у майбутньому, необхідно володіти запропонованим у цьому курсі матеріалом.

Для початку розберімося, що ж таке аеродинаміка. Ця наука вивчає:

- поведінку повітря та його взаємодію з твердими рухомими об'єктами,
- сили, які впливають на об'єкт, зокрема підйомну силу, опір і тягу,
- як на зазначені сили впливають форма об'єкта й параметри обтікання.

Аеродинаміка вивчає взаємодію повітря з рухомими об'єктами – крилами, фюзеляжем, та іншими елементами літака або БПЛА.

**Мета аеродинаміки** – аналіз форми та особливостей об'єктів для оптимізації їх характеристик так, щоб зменшити лобовий опір, покращити підйомну силу, підвищити загальну ефективність та продуктивність польоту. Аеродинаміка застосовується в багатьох галузях, зокрема проектування літаків, ракет, автомобілів, спортивного обладнання, та навіть будівель.

Аеродинаміка як будь-яка наука, що вивчає фізику явищ, використовує моделі й гіпотези для спрощення, але прагне зберегти істотні властивості явищ та відкинути незначні. Візьмемо для прикладу принцип обертального руху та гіпотезу суцільності середовища.

#### Принцип обертання руху

Для зручності в аеродинаміці часто застосовують **принцип обертання руху, тобто** розглядають не політ ЛА в нерухомому повітрі, а обтікання нерухомого ЛА потоком зустрічного повітря. Цей потік протилежний за напрямком і має швидкість, що дорівнює швидкості польоту ЛА. Водночас обертання руху не змінює силову і теплову взаємодію апарату з повітрям, тому ми будемо надалі використовувати цей принцип, без додаткових зауважень.

## Гіпотеза суцільності середовища

Розглянемо **гіпотезу суцільності середовища**. Повітря – це сукупність молекул, що хаотично переміщуються в просторі. Концентрація молекул в нижніх шарах атмосфери (у тропосфері), де відбуваються польоти ЛА цивільної авіації достатньо висока. Звідси впливає **гіпотеза суцільності**, відповідно до якої повітря – це усталене середовище з речовинами, що постійно ширяться простором.

Застосування практично будь-якої наукової гіпотези обмежується умовами, за яких її використання стає некоректним. Для оцінки можливостей застосування гіпотези суцільності середовища використовується **критерій Кнудсена**:

$$Kn = \frac{l}{L} \quad , \quad (1)$$

де

$l$  – середня довжина вільного пробігу молекул;

$L$  – характерний лінійний розмір обтікаючого тіла.

Якщо  $Kn < 0,01$ , повітря вважається суцільним середовищем.

Ця умова завжди виконується для висот, на яких літають сучасні ЛА цивільної авіації.

**Окрім загальних принципів, відомі також ключові поняття аеродинаміки – аеродинамічний опір, підйомна сила та інші, про які ми поговоримо далі.**



**Аеродинамічний опір**

**Аеродинамічний опір** – сила опору, яка протидіє руху об'єкта в повітрі й викликана тертям повітря об поверхні літального апарату. Ця сила діє в напрямку, протилежному руху літака або БПЛА, сповільнюючи його та потребуючи додаткової потужності від двигунів для збереження заданої швидкості або висоти.

Величина аеродинамічного опору залежить від:

- форми літака або БПЛА,
- характеристик його поверхонь,
- швидкості руху,
- густини повітря.

Зменшення лобового опору має вирішальне значення для підвищення швидкості та паливної ефективності транспортних засобів.

Інженери застосовують різні можливості для мінімізації аеродинамічного опору та підвищення аеродинамічної ефективності: експериментують із формою обтікання, текстурою гладких поверхонь, оптимізують конструкцію крил.

### **Підйомна сила**

**Підйомна сила** – сила, завдяки якій літак або БПЛА піднімається в повітря. Вона створюється формою крил і різницею тиску між його верхньою і нижньою поверхнями.

Величина підйомної сили залежить від декількох чинників, серед яких:

- форма (профіль) крила,
- площа його поверхні,
- швидкість літального апарату,
- кут атаки (між хордою крила і відносним вітром),
- щільність повітря.

БПЛА, як і будь-який інший літальний апарат, використовує підйомну силу, щоб протидіяти силі тяжіння і залишатися в повітрі. Для рівного польоту або підйому, ця сила має дорівнювати чи перевищувати вагу БПЛА. Якщо підйомної сили недостатньо, БПЛА буде знижуватися, або втрачати висоту.

На **рис. 2** показано, як аеродинамічні сили впливають на процес польоту ЛА:

**Рис. 2. Вплив аеродинамічних сил на політ ЛА.**



Умови польоту	Ефект
Підйом > Вага	ЛА піднімається
Вага > Підйом	ЛА падає
Опір > Тяга	ЛА сповільнюється
Тяга > Опір	ЛА прискорюється

**Рис. 2. Вплив аеродинамічних сил на політ ЛА.**

Інженери БПЛА ретельно продумують конструкцію крила та інші аеродинамічні характеристики, щоб оптимізувати підйомну силу і забезпечити стабільний політ. Пілоти та оператори/дистанційні пілоти БПЛА регулюють кут атаки та механізми керування (елерони,

елеватори – керма висоти, керма напрямку), щоб контролювати величину підйомної сили та підтримувати бажані траєкторію польоту та висоту.

### Принцип Бернуллі

Цей принцип описує взаємозв'язок між тиском і швидкістю рідини. Його часто застосовують, щоб пояснити, як виникає підйомна сила на крилі літака.

Принцип Бернуллі – це фундаментальне поняття гідродинаміки, назване на честь швейцарського математика і фізика Даніеля Бернуллі, який сформулював його у 18 столітті. Принцип Бернуллі стверджує, що повна енергія рідини залишається постійною вздовж лінії течії в потоці невязкої та нестисливої рідини. Іншими словами, зі збільшенням швидкості рідини її тиск зменшується, а повна енергія, навпаки, залишається незмінною.

$$m = \rho VF = \text{Const}, (2)$$

де

$m$  – маса повітря, що проходить через поперечний переріз струменя потоку (СП), за одиницю часу;

$\rho$  – густина повітря в цьому перерізі СП;

$V$  – швидкість повітря в цьому перерізі СП;

$F$  – площа поперечного перерізу СП.

### Математично цей принцип можна окреслити так:

Рівняння Бернуллі для газу без урахування його стисливості має вигляд:

$$p + \rho gh + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const}, (3)$$

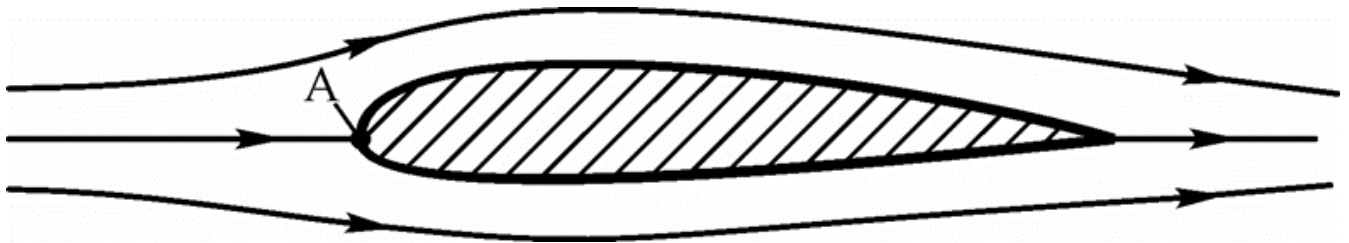
Якщо знехтувати дією сили тяжіння або припустити, що рух повітря відбувається в горизонтальній площині, тоді потенційна енергія маси повітря не зміниться, а добуток можна виключити з формули (3):

$$p + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const}, (3a)$$

Доданок  $p$  – **статичний тиск**, доданок  $\frac{\rho V^2}{2}$  – **динамічний тиск** (або **швидкісний натиск**), а сума статичного та динамічного тисків – це повний тиск, який позначається  $p_0$ :

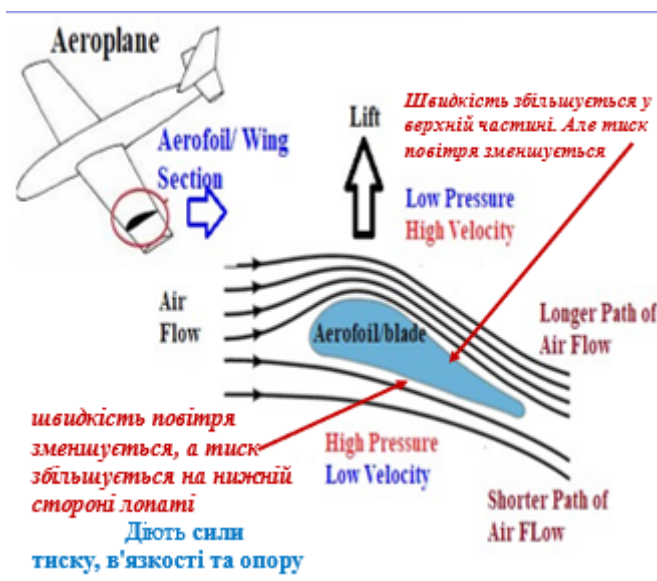
$$p_0 = p + \frac{\rho V^2}{2} = \text{const}, (4)$$

При уважному розгляді рівняння Бернуллі можна помітити, що при збільшенні швидкості потоку динамічний тиск буде зростати, а статичний відповідно – спадати, оскільки їх сума незмінна.



**Рис. 3. Обтікання тіла потоком, що набігає**

Отже, при обтіканні тіла зустрічним потоком повітря, як на схемі (Рис. 3), бачимо на носі точку **A** (критичну точку), в якій швидкість потоку при повному гальмуванні дорівнює **0**. У цій точці динамічний складник дорівнює нулю, а статичний тиск максимальний та дорівнює повному тиску. В будь-якій іншій частині поверхні тіла швидкість потоку буде більшою за **0**, а це означає, що статичний тиск буде меншим, ніж у критичній точці.



**Рис. 4. Як формується підйомна сила крила/лопаті**

Згідно з принципом Бернуллі, коли повітря обтікає вигнуту верхню поверхню крила, воно прискорюється, а його тиск зменшується. Водночас повітря, що протікає під плоскою нижньою поверхнею крила, рухається повільніше і зазнає більшого тиску. Ця різниця тиску створює висхідну силу, що і називається підйомною силою (Рис. 4).

### Пограничний шар

**Пограничний шар** – це тонкий шар повітря, що прилягає до твердої поверхні, в якому швидкість повітря змінюється від нуля (поряд із поверхнею) до швидкості вільного потоку (далі від поверхні). Розуміння і контроль пограничного шару мають вирішальне значення в аеродинамічному дизайні.

Відомі два основних типи пограничних шарів:

1. У **ламінарному** пограничному шарі рідина тече плавно, паралельними шарами з мінімальним перемішуванням і збуренням. Потік відносно передбачуваний і стабільний. Однак, коли рідина рухається вздовж поверхні, швидкість збільшується, що зрештою призводить до переходу в турбулентний граничний шар.

2. У **турбулентному** пограничному шарі рідина зазнає хаотичного, обертального руху, що спричинює значне перемішування і тертя. Турбулентні пограничні шари менш передбачувані, та зазвичай, створюють більший опір на поверхні твердого тіла порівняно з ламинарними граничними шарами. Це відбувається через посилене перемішування та втрату енергії.

**Пограничний шар дуже важливий для аеродинаміки й техніки:**

1. Він відіграє ключову роль у визначенні величини опору, якого зазнає об'єкт, що рухається повітрям. Зменшення поверхневого тертя – важливий аспект аеродинамічного дизайну для підвищення ефективності літальних апаратів.
2. Характеристики пограничного шару важливі для розуміння, як підйомна сила виникає на крилах. Наприклад, турбулентний пограничний шар може затримати або запобігти поділу потоку, тобто збільшити підйомну силу.
3. Пограничний шар впливає на теплопередачу між твердою поверхнею та рідиною. Це важливо для проєктування аеродинамічних крил.
4. Перехід від ламінарного до турбулентного пограничного шару – те, від чого також залежить поведінка потоку повітря. Розуміння чинників, що впливають на цей перехід, надзвичайно необхідне для оптимізації аеродинаміки.

Інженери використовують різні методи керування пограничним шаром, серед яких створення шорсткості або спеціальна обробка поверхонь для затримки переходу до турбулентності або скорочення відриву.

**Число Рейнольдса**

**Число Рейнольдса** – безрозмірна величина, що використовується для прогнозування типу потоку (ламінарного або турбулентного) відповідно до розміру обтічного об'єкта, швидкості та властивостей рідини. Число Рейнольдса названо на честь британського інженера і фізика Осборна Рейнольдса, який увів його наприкінці XIX століття. Це число допомагає інженерам зрозуміти та проаналізувати поведінку рідин відповідно до галузей застосування.

Число Рейнольдса (Re) обчислюється за такою формулою:

$$Re = (\rho * V * L) / \mu, \quad (5)$$

де:

- $\rho$  – густина рідини;
- $V$  – швидкість об'єкта відносно рідини;
- $L$  – характерна довжина об'єкта, зазвичай, довжина хорди, діаметр або інший відповідний розмір;
- $\mu$  – динамічна в'язкість рідини.

Число Рейнольдса кількісно визначає співвідношення сил інерції та сил в'язкості в потоці рідини. Тобто характеризує, наскільки «гладкий» або «хаотичний» потік:

- Якщо число Рейнольдса відносно невелике ( $Re < 2000$ ), потік вважається **ламінарним**. У ньому рідина рухається гладкими паралельними шарами. Вона майже не перемішується, тож потік дуже передбачуваний і стабільний.
- При числі Рейнольдса  $2000 < Re < 4000$  потік **перехідний** – між ламинарним і турбулентним. Потік характеризується як складний, із переривчастою турбулентністю.
- Коли число Рейнольдса велике ( $Re > 4000$ ), потік стає **турбулентним**. У ньому рідина рухається хаотично, обертається, тож енергія значно перемішується, розсіюється. Турбулентний потік менш передбачуваний, що призводить до збільшення опору і втрат енергії.

Розуміння числа Рейнольдса важливе для різних інженерних завдань, особливо при проектуванні транспортних засобів, літаків. Воно, наприклад, допомагає визначити оптимальну форму і конструкцію об'єктів для досягнення максимальної ефективності та продуктивності залежно від типів потоку.

## Число Маха

**Число Маха** – це безрозмірна величина, що відображає швидкість об'єкта відповідно до швидкості звуку в повітрі, що його оточує. Число Маха (M) назване на честь австрійського фізика Ернста Маха, і важливе для високошвидкісної аеродинаміки. Швидкість звуку в газі змінюється відповідно до його природи й температури, а M залежить від місцевих умов та не прив'язане до швидкості. Воно визначає ступінь стиснення повітря і характер пов'язаних з цим змін в обтіканні літака зустрічним потоком. Оскільки з підйомом на висоту швидкість звуку зменшується, польотам з однією і тією ж швидкістю на різних висотах відповідають різні числа M.

$$M=V/a, \quad (6)$$



де:

$V$  – швидкість тіла відносно потоку;

$a$  – швидкість звуку.

Процеси, для яких **число Маха більше за 1**, називають **надзвуковими**.

**Число Маха – це одиниця швидкості в аеродинаміці**. На відміну від інших, позначка «**M**» ставиться перед величиною, що позначає швидкість. Так, наприклад, **M2** для літака означає швидкість, вдвічі більшу за швидкість звуку.

За температури 15°C швидкість 1 Мах в атмосфері дорівнює 340,3 м/с (1225 км/год).

Число Маха – змінна величина, оскільки залежить від температури. Через це в [стратосфері](#) воно помітно не змінюється з висотою, навіть коли тиск повітря постійно однаковий.

Число Маха допомагає визначити тип потоку навколо об'єкта відповідно до співвідношення його швидкості та швидкості звуку:

- Коли число Маха менше за 1 ( **$Ma < 1$** ), потік вважається **дозвуковим**. У ньому швидкість об'єкта менша за швидкість звуку. Потік поводить себе більш традиційно, з передбачуваними й відносно плавними формами повітряних потоків.
- Режим потоку між дозвуковим і надзвуковим, для якого  **$0,8 < Ma < 1,2$** , називають **трансзвуковим**. У цьому діапазоні характеристики потоку складніші, навколо об'єкта можуть співіснувати дозвуковий і надзвуковий потоки.
- Коли число Маха більше за 1 ( **$Ma > 1$** ), потік вважається **надзвуковим**. У ньому швидкість об'єкта перевищує швидкість звуку. Потік характеризується ударними хвилями, у ньому наявні часточки стисненого повітря, відомі як ударні конуси.
- У **гіперзвуковому** потоці число Маха набагато більше за 5 ( **$Ma > 5$** ). Поведінка потоку ще складніша: спостерігаються сильні ударні хвилі та надзвичайно високі температури (через аеродинамічний нагрів).

Розуміння числа Маха має вирішальне при проектуванні та аналізі високошвидкісних літаків, ракет та інших транспортних засобів, що рухаються зі швидкістю звуку або швидше. Поведінка повітряного потоку навколо об'єкта суттєво змінюється зі зміною числа Маха, що впливає на аеродинамічні характеристики, лобовий опір, підйомну силу та інші льотні показники.

Тож, **аеродинаміка відіграє фундаментальну роль в авіації**, та допомагає проектувати економніші та більш стабільні літальні апарати, зокрема БПЛА. У наступній лекції ми детальніше розглянемо основи аеродинаміки і динаміки польоту, а також їх основні відмінності.