

Основи аеродинаміки

Вступ

Для грамотного засвоєння летунських ділянок важливо добре орієнтуватися в фізичних явищах, які відбуваються з літальним апаратом у повітрі, розуміти фізичні процеси та закони природи, що дозволяють літальним апаратам здійснювати у повітрі і, врешті решт, дати собі відповідь на питання: як і чому тонни металу здатні літати.

Курс гутірок з аеродинаміки повинен у цьому допомогти.

Деякі закони механіки.

Аеродинаміка – (аеро – повітря, динаміка – рух) – наука про рух тіл в повітрі та взаємодію твердих тіл з текучими середовищами (рідини, газу), наука, що вивчає процеси обтікання твердих тіл в повітрі.

Аеродинаміка належить до Механіки – науки про механічний рух тіл, його причини та інші механічні взаємодії. Мета цього розділу – розглянути деякі закони механіки (у короткій конспективній формі), розуміння яких є необхідним для початку вивчення аеродинаміки.

Почнемо з деяких визначень:

Матеріальна точка – тіло, розмірами якого можна знехтувати в умовах даної задачі.

Механічний рух – зміна положення тіла у просторі. Механічний рух буває поступальним (всі точки тіла рухаються по паралельних траєкторіях), обертальним (точки тіла рухаються по колах зі спільним центром), коливальним (точки тіла здійснюють рухи, що періодично повторюються).

Траєкторія – лінія, вздовж якої рухається тіло.

- Шлях (l) – довжина траєкторії.
- Переміщення (s) – відрізок, що сполучає початкову та кінцеву точки траєкторії.
- Швидкість (v) – зміна шляху за одиницю часу.

Важливим є поняття відносності руху. Воно означає по суті те, що рухомий предмет рухається повз нерухомий предмет з точно такою ж швидкістю як і нерухомий повз рухомий. (наприклад Земля рухається навколо Сонця з такою ж швидкістю як Сонце навколо Землі). Все залежить від того, де знаходиться спостерігач, який вимірює ту швидкість. Саме з цієї причини древні люди думали, що Сонце рухається навколо Землі.

Систему таких спостерігачів називають системою відліку. Система відліку – система тіл, нерухомих одне відносно одного та годинників, що відлічують час. У тривимірному просторі таких тіл достатньо три.

Прискорення – по суті це швидкість зміни швидкості при нерівномірному русі:

Найпростіший нерівномірний рух – вільне падіння. Всі тіла на землі падають з прискоренням вільного падіння $g=9,81 \text{ м/с}^2$.

Динаміка(F) – наука про причини руху. Основним поняттям у динаміці є поняття сили.

Сила – це спрямована дія одних об'єктів на інші. Поняття сили вперше ввів Ньютон, він же і запропонував три фундаментальні емпіричні закони механіки, відомі як закони Ньютона:

1. Якщо на тіло не діє жодна сила або дія всіх сил на тіло скомпенсована, то воно буде нерухомим або рухатись прямолінійно і рівномірно.
Прискорення, яке отримує тіло прямо пропорційне силі, що діє на тіло та обернено пропорційне до маси:
2. (2).
3. При прикладенні сили з боку одного тіла до другого, з боку другого тіла виникає точно така ж сила за величиною, але протилежна за напрямком (дія рівна протидії).

На базі законів Ньютона будується вся механіка.

Наостанок варто ввести ще поняття сили тяжіння та ваги.

Сила тяжіння виникає в результаті гравітаційної взаємодії, тобто взаємодії всіх тіл, які мають масу. Це означає, що два тіла (скажімо Земля і яблуко) будуть притягуватись з однаковою силою, але яблуко буде рухатись до Землі швидше ніж Земля до яблука (я б навіть сказав набагато швидше), адже воно має набагато меншу масу і розвиває більше прискорення (2).

Вага тіла (P) – це сила, з якою тіло діє на опору чи підвіс. Тобто нема опори – нема ваги. Саме тому при вільному падінні тіло знаходиться в стані невагомості.

Повітря. Характеристики повітря.

Повітря – суміш газів, складається з молекул ряду хім. елементів, серед яких – азот (78%), кисень (21%) і решта: вуглекислий газ, водень, аргон та ін. Число молекул в одиниці об'єму велике: при температурі 15°C в 1 м^3 міститься $2,7 \cdot 10^{25}$ молекул.

Повітря можна охарактеризувати набором важливих фізичних параметрів, таких як тиск, температура, густина, швидкість звуку в повітрі і т.д.

Густина – маса повітря, що знаходиться в одиниці об'єму:

Температура – міра середньої кінетичної енергії молекул.

Швидкість звуку в повітрі залежить лише від температури. Знаючи абсолютну температуру (в Кельвінах) повітря можна вирахувати швидкість звуку:

Число Маха – відношення швидкості літака до швидкості звуку:

Тиск являє собою силу, що діє на одиницю площі. Молекули повітря знаходяться в неперервному русі, вони співударяються з поверхнями, що його обмежують і відбиваються від них. Сума імпульсів всіх молекул, що падають на дану поверхню за одиницю часу рівна тиску.

Зв'язок між тиском p , густиною ρ і абсолютною температурою T задається формулою

$p = \rho RT$, де R – універсальна газова стала, рівна 8,31. З цієї формули слідує закон Бойля, згідно з яким при постійній температурі $p = \text{const}$, тобто зміна густини прямо пропорційна зміні тиску.

Зміна тиску і густини повітря узгоджуються з цими законами. Тиск і густина зменшуються, порівняно з їх значеннями на рівні моря, в 2 рази на висоті 6 км, в 5 разів на висоті 12 км і в 100 разів на висоті 30 км.

В нижніх шарах атмосфери температура повітря також зменшується при збільшенні висоти. Стандартна температура на рівні моря становить 288 К. Вона зменшується до 256 К на висоті 5 км і до 217 К на висоті 12 км.

Приклад: при збільшенні висоти знижується температура кипіння води (яка залежить від атмосферного тиску), на висоті 4000 метрів температура кипіння води близько 85° С, що свідчить про залежність тиску повітря від висоти.

Повітряні течії. Обтікання тіл. Аеродинамічна труба.

Повітряні течії поділяються на ламінарні та турбулентні.

Ламінарні течії – повітряні течії, в яких всі частинки (молекули повітря) рухаються по паралельних траєкторіях.

Турбулентні – течії, в яких існують завихрення.

Для того, щоб чисельно охарактеризувати ламінарність чи турбулентність течії вводять так зване число Рейнольдса (Re). Якщо число Рейнольдса приймає значення менше 1000, то потік ламінарний, більше 1000 – турбулентний.

Дія повітря на об'єкт залежить від форми тіла і його орієнтацію відносно набігаючого потоку. Розглянемо обтікання тіл різної форми.

А) Симетричне обтікання (рисунок 1).

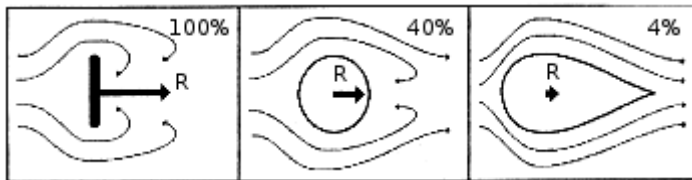


Рисунок 1. – Симетричне обтікання

тіл

Б) Несиметричне обтікання (рисунок 2), до тіл з несиметричним профілем обтікання відноситься крило літака

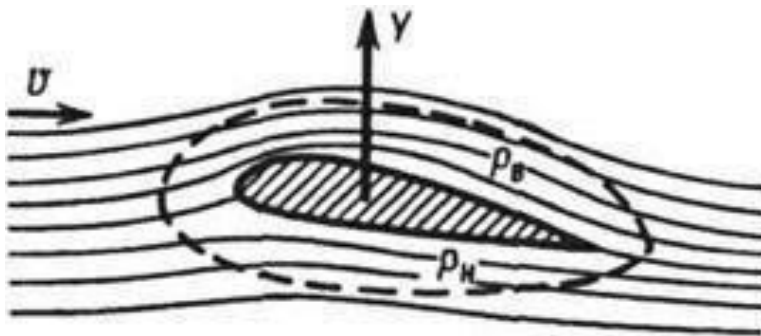


Рисунок 2. – Обтікання профіля

крила (несиметричне)

Аеродинамічна труба – прилад, який використовують для створення повітряних потоків, та спостереження дії потоків на різні тіла (рисунок 3).



Рисунок 3. – Літак у

аеродинамічній трубі

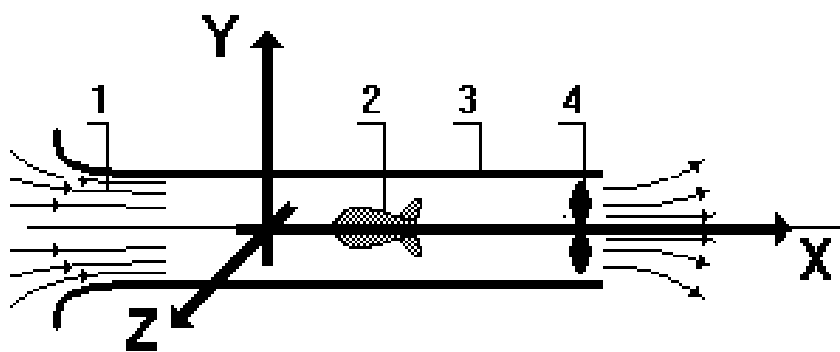


Рисунок 4. –

Найпростіша схема аеродинамічної труби

1. повітряний потік
2. піддослідний об'єкт
3. корпус труби
4. гвинт

Перша аеродинамічна труба під назвою *Windbox* (вітровий ящик) була побудована у 1884 році Гораціо Фліпсом (рис. 5). Така труба мала діаметр всього 43 см. Діаметр сучасних аеродинамічних труб доходить до 42 м.

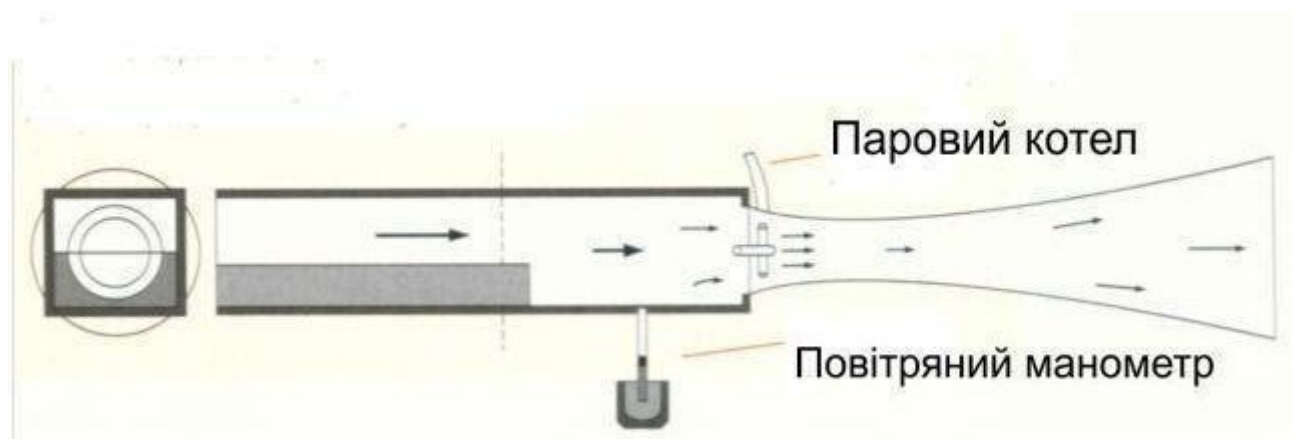


Рисунок 5. – Схема аеродинамічної труби Гораціо Філіпса.

Варто звернути увагу також на висхідні повітряні потоки, а саме термічні та динамічні. Термічні повітряні потоки виникають в атмосфері в результаті конвекції повітря, тобто руху більш нагрітого повітря від поверхні землі вгору. Динамічні повітряні потоки виникають при огинанні вітром форм рельєфу, в результаті чого в області схилу гори чи горба утворюється динамічний повітряний потік (рис. 6).

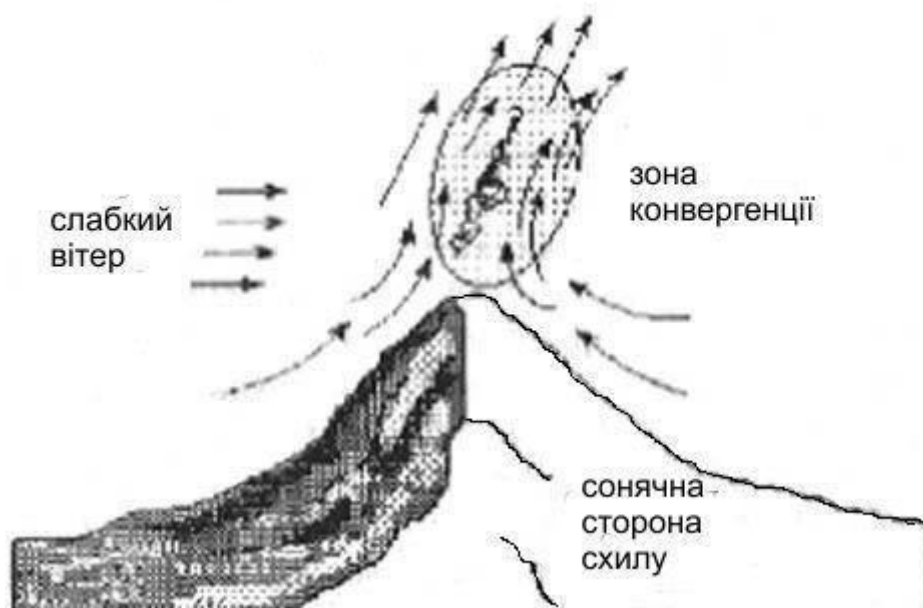


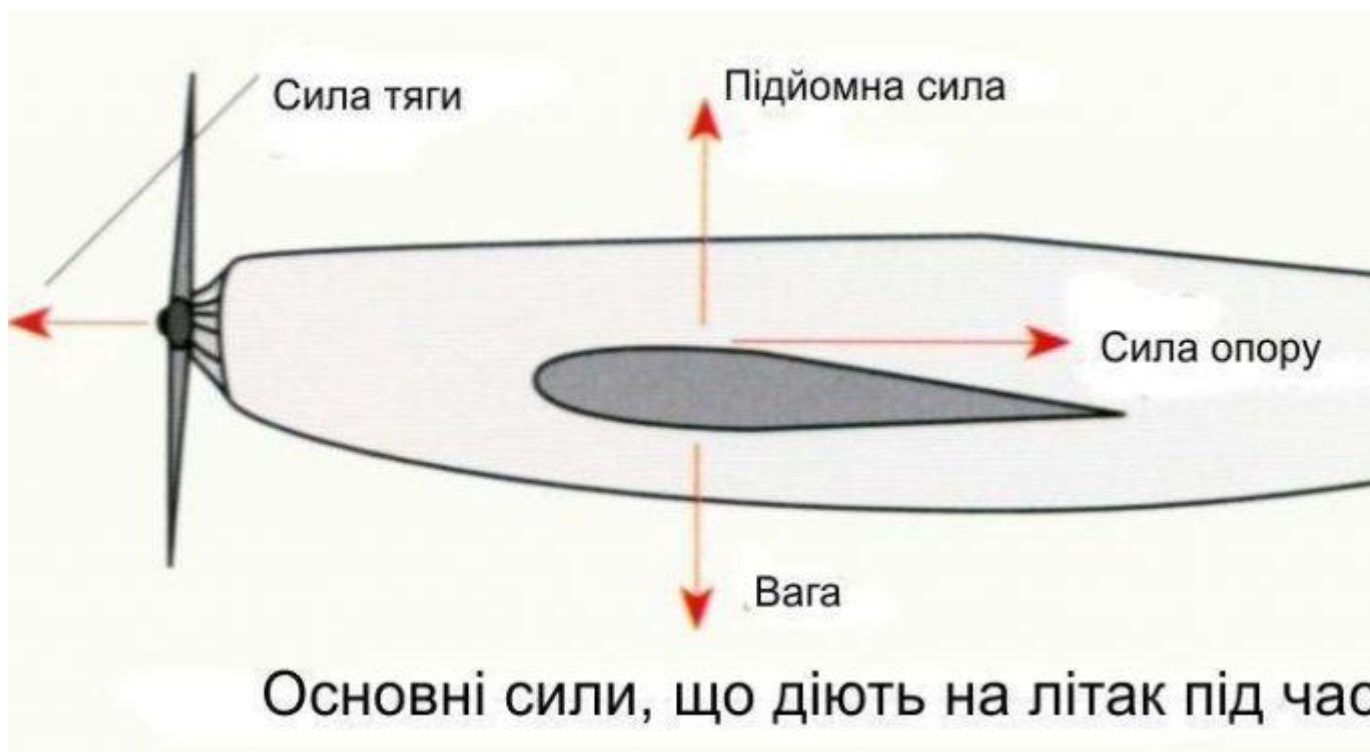
Рис. 6. – Динамічний

потік

В результаті сходження повітряних потоків над схилом утворюється так звана зона конвергенції, де зростає швидкість та густина повітряного потоку.

Підйомна сила. Закон Бернуллі.

Якщо ми розглянемо всі сили, які діють на літальний апарат (у нашому випадку літак), то в результаті отримаємо наступну картину (рис. 7).



Основні сили, що діють на літак під час польоту.

Рисунок 7. – Основні сили, що діють на літак під час польоту.

В результаті отримуємо чотири групи сил:

- Сила тяги – створюється силовою установкою літального апарату і забезпечує поступальний рух та набір швидкості. Силу тяги створюють двигуни літального апарату. А у випадку планеруючого безмоторного польоту роль сили тяги виконує проекція сили тяжіння (рис. 14).
- Сила опору – сила, що чинить опір тязі з боку середовища, в якому рухається літак (тобто повітря).
- Вага – виникає в результаті гравітаційної взаємодії літака та землі.
- Підйомна сила – виникає в результаті виконання аеродинамічних законів на несучих поверхнях літака (одному чи кількох крилах).

Саме про підйомну силу ми поговоримо детальніше.

Дана формула відома, як **закон Бернуллі**. Згідно з ним при збільшенні швидкості повітря зменшується його тиск. Таким чином потоки повітря, які рухаються з різними швидкостями чинять різний тиск.

На рисунку 8 показано профіль крила літака. Хорда крила – це найдовша відстань між передньою і задньою кромкою крила.

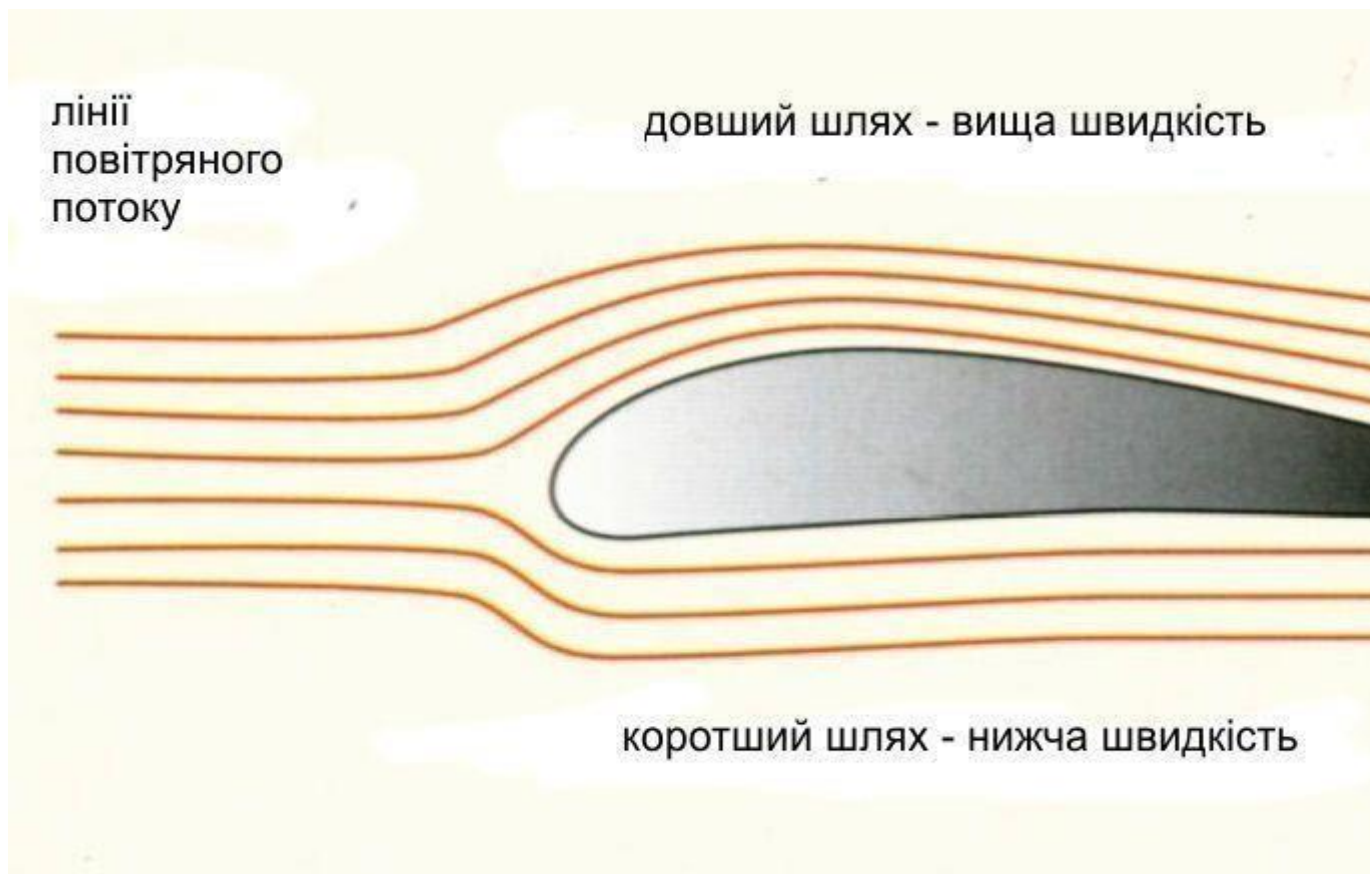


Рисунок 8. – Профіль крила літака

Верхня поверхня крила більш вигнута, ніж нижня і повітряний потік, що проходить поверх крила вимушений прискорюватись, щоб не відстати від того, що проходить під крилом. В результаті повітря над крилом повинно мати більшу швидкість ніж повітря під крилом і як наслідок (з Закону Бернуллі) тиск під крилом вищий, ніж над крилом. Різниця цих тисків створює підйомну силу. Або, іншими словами, в результаті високої швидкості руху над крилом створюється область розрідження, де тиск менший ніж під крилом.

У достовірності закону Бернуллі можна переконатись на простому досліді (рис. 9). Дмухаючи над паперовим листком, ми створюємо область високої швидкості і відповідно низького тиску над листком, через що листок при піднімається вгору.



Рисунок 9. – невеликий

дослід.

Розподіл підйомної сили на крилі буде мати наступний вигляд (рис. 10):

Поперечний переріз крила і сили, що діють на крило

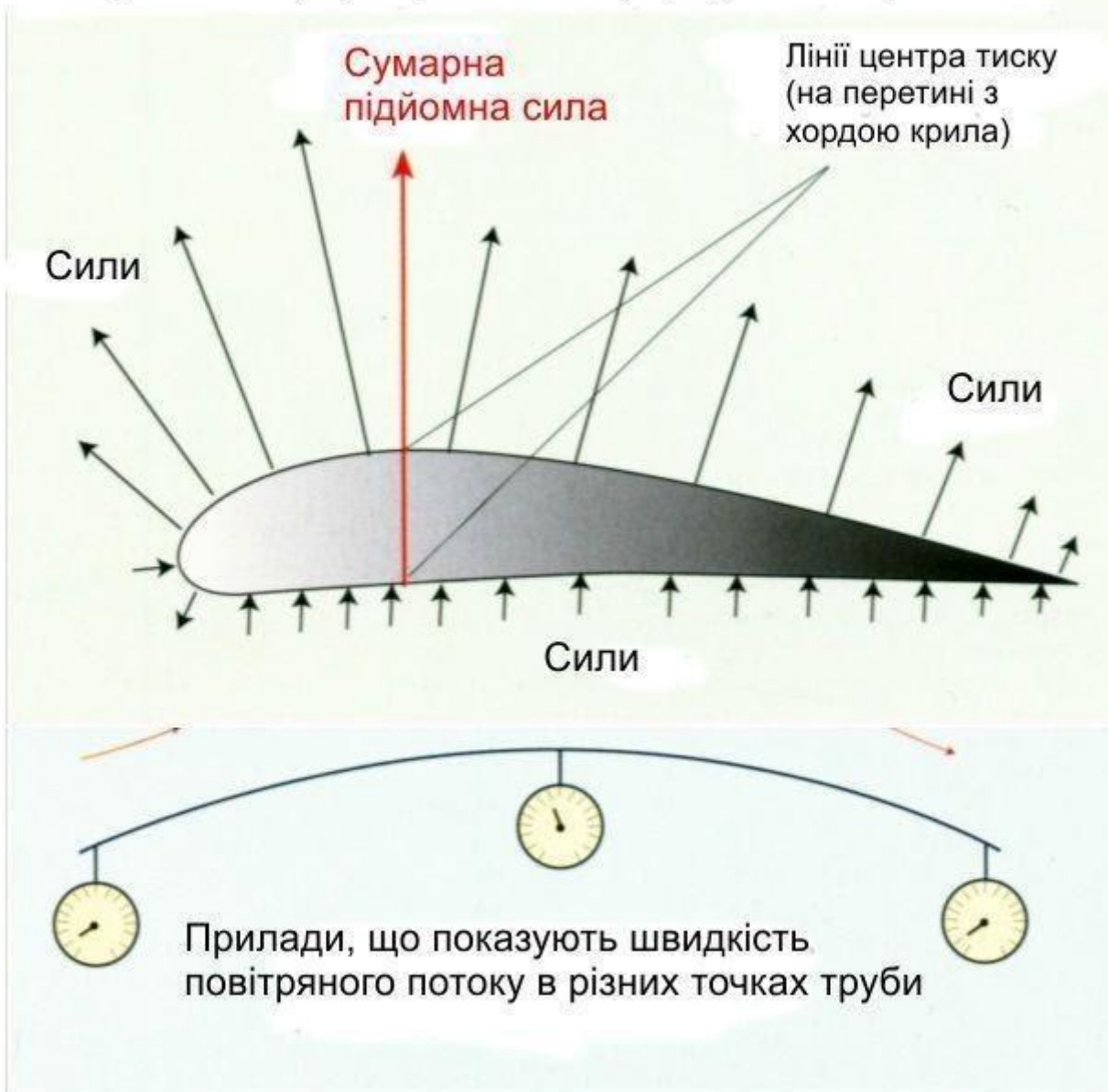


Рисунок 10 – Поперечний переріз крила та сили, що діють на крило.

Підйомна сила максимальна над крилом та менша над фюзеляжем (рис. 11).

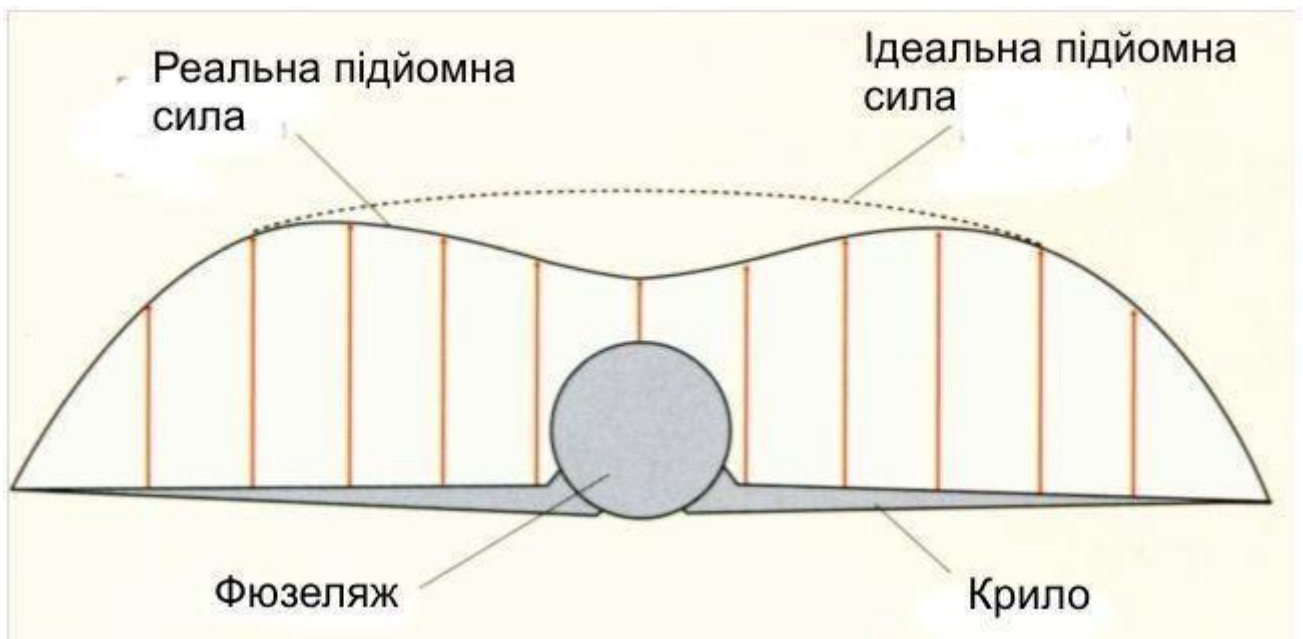


Рисунок 11 – Розподіл підйомної сили для цілого літального апарату.

Підймальну силу для конкретного крила можна обрахувати за формулою:

де S – площа крила,

– швидкість польоту,

– густина,

α – кут атаки.

Кут атаки – кут між хордою крила та набігаючим потоком.

Кут установки крила – кут між хордою крила і віссю крену. Його можна вважати початковим кутом атаки.

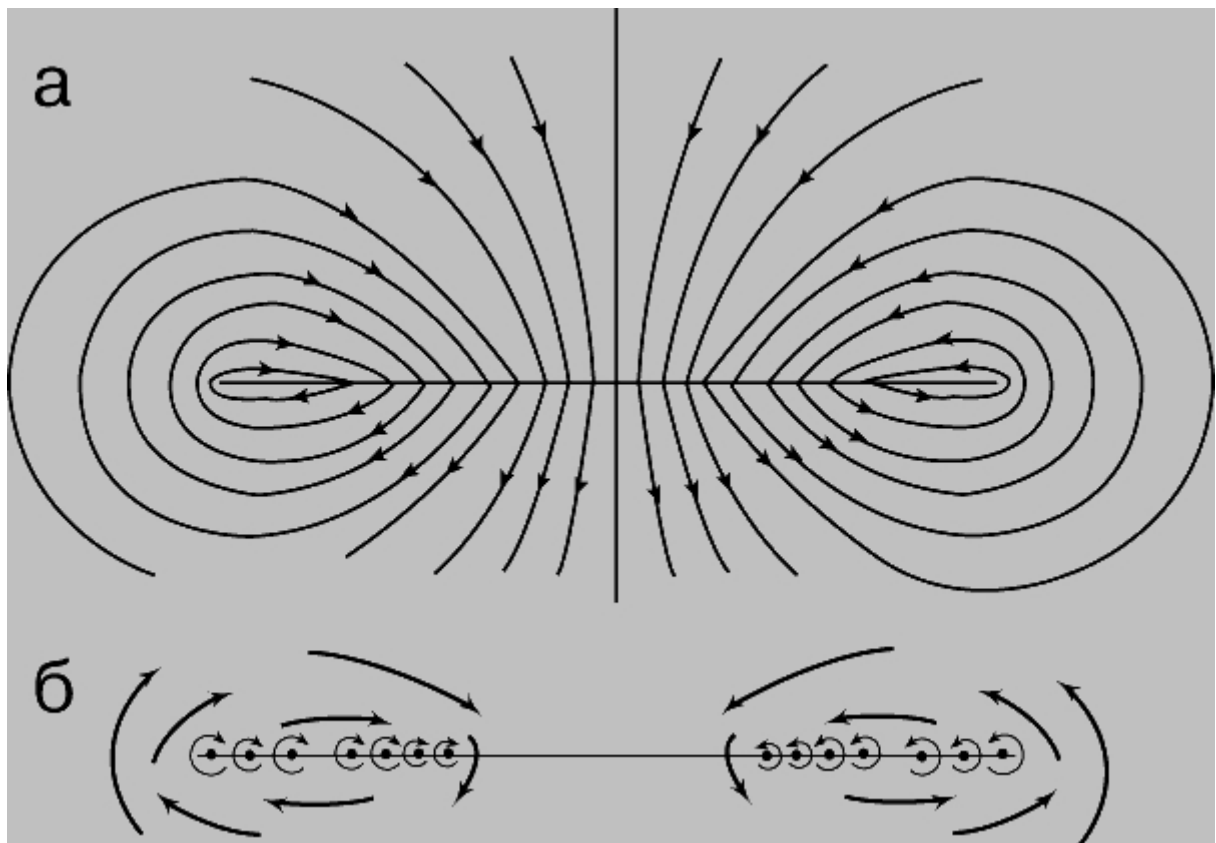
Аеродинамічний опір. Сила опору.

Аеродинамічний опір створюється повітрям і перешкоджає руху тіла в повітрі. В залежності від природи аеродинамічний опір поділяється на лобовий опір, опір тертя (в'язкості), індуктивний опір.

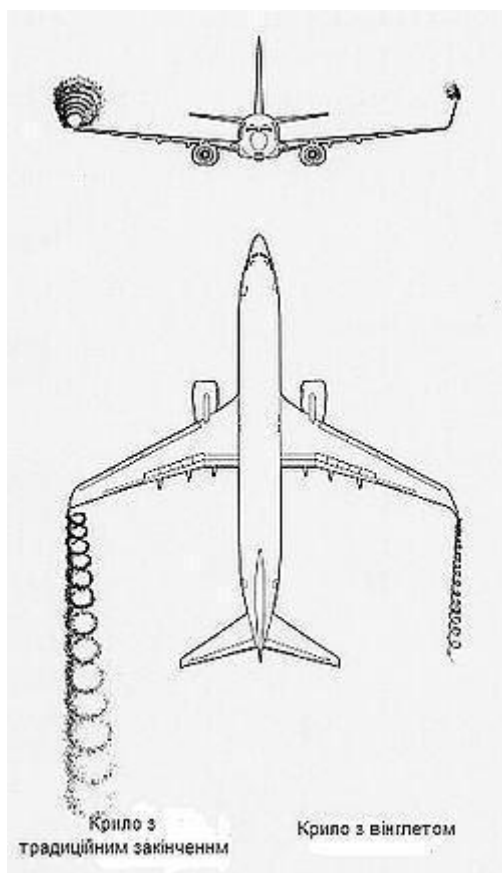
Лобовий опір створюється за рахунок зіткнення молекул повітря з лобовою поверхнею тіла, що рухається (див. рисунок).

Опір тертя (в'язкості) виникає в зв'язку з тертям повітря об поверхні ЛА.

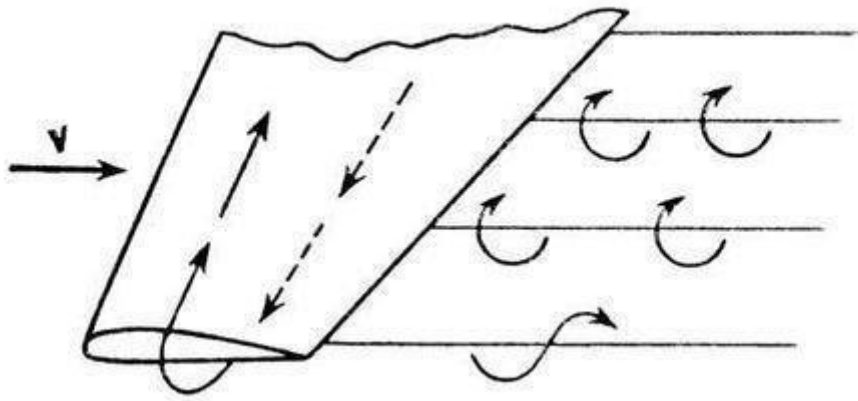
Індуктивний опір створюється за рахунок перетікання повітря з області під крилом (з високим тиском) в область над крилом (з низьким тиском) через закінцівки крила, що створює завихрення, які чинять опір польоту (рисунок 12)



Виникнення індуктивного опору



Виникнення індуктивного опору



Виникнення

індуктивного опору

Аеродинамічний опір характеризується коефіцієнтом аеродинамічного опору

– коефіцієнт аеродинамічного опору.

Сума сили опору та підйомної сили, що діє на тіло – повна аеродинамічна сила (рис. 13).

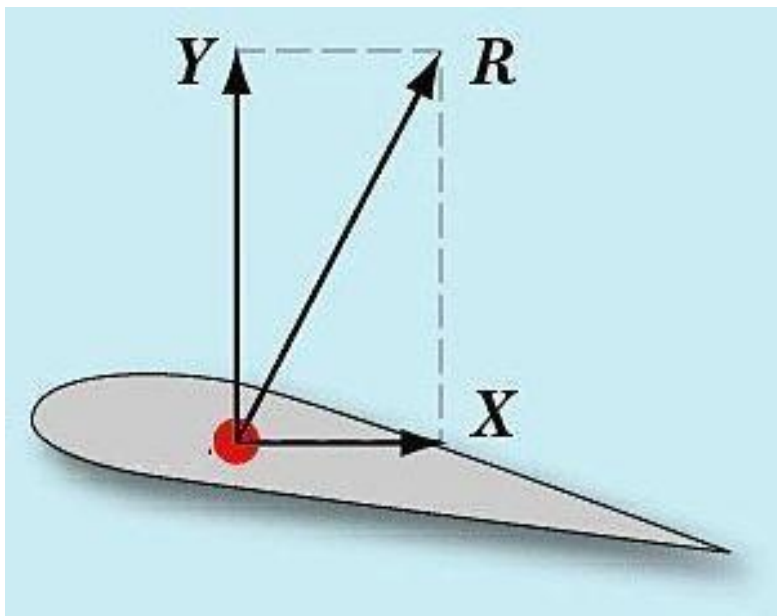


Рисунок 13. – Y – підйомна

сила X – сила опору R – повна аеродинамічна сила.

Цікавим є розподіл сил для парашюта, де роль сили тяги виконує проекція сили тяжіння (рис. 14).

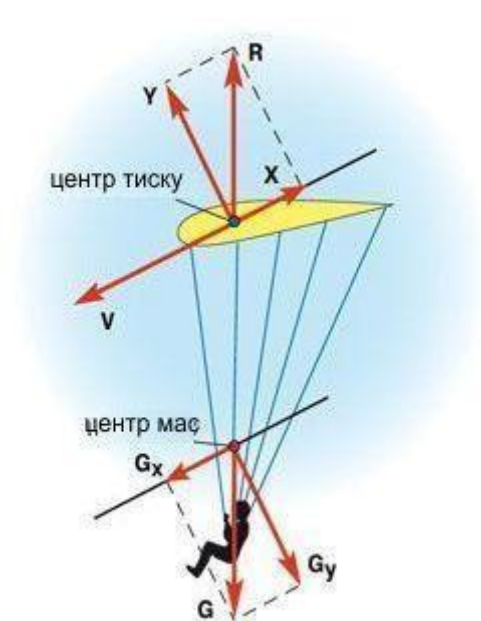


Рис. 14 – Сили, що діють на параплан у польоті:
 Y – підйомна сила, X – сила опору, R – повна аеродинамічна сила, G – сила тяжіння, G_x, G_y – проекції сили тяжіння.

Кут атаки. Аеродинамічна якість крила. Поляра крила.

Як вже було сказано раніше, кут атаки – кут між хордою крила та набігаючим потоком (рис. 15). Нагадаємо, що хорда крила – це найдовша відстань між передньою і задньою кромкою крила.

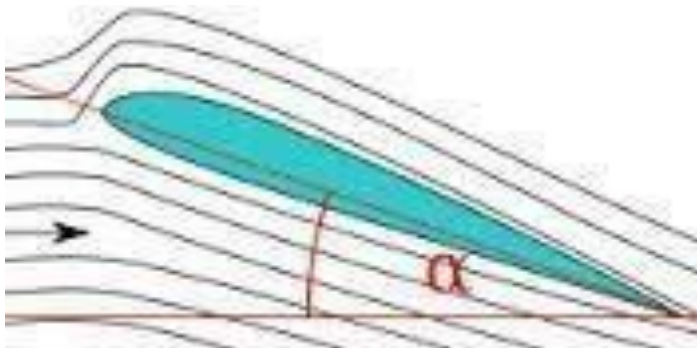


Рис. 15 – α – Кут атаки

Від кута атаки залежать коефіцієнти підйомної сили та сили опору. Фактично збільшення кута атаки веде до зростання підйомної сили та сили опору. Тому важливо підбирати підходящі кути атаки для різних фаз польоту (зльоту, крейсерського польоту та посадки). Щоб могли оцінити співвідношення між підйомною силою та силою опору при різних кутах атаки вводять поняття аеродинамічної якості крила:

Графік залежності аеродинамічної якості крила від кута атаки називають поллярою крила (рис. 16).

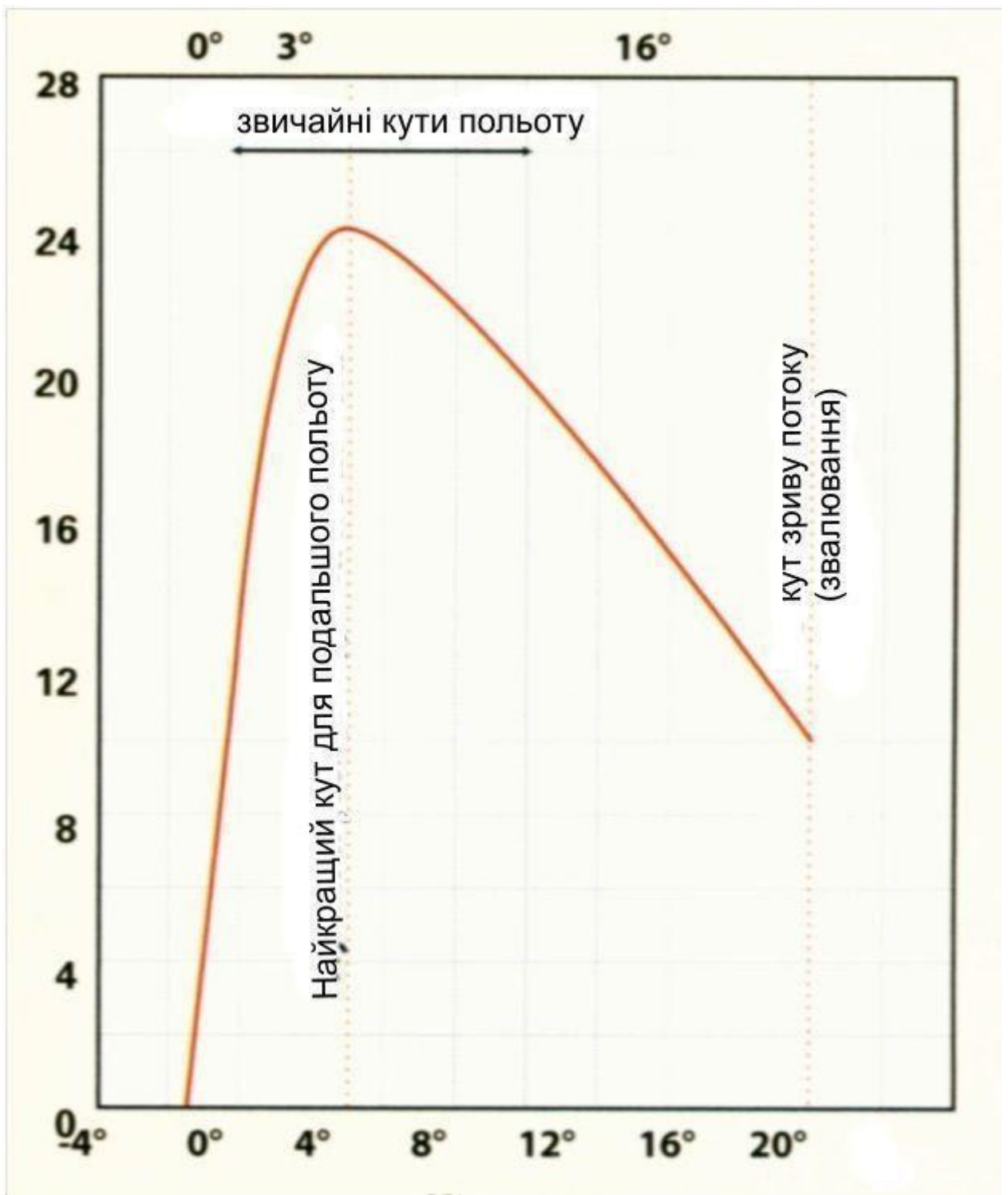


Рис. 16 – Поляра крила

При зміні кута атаки відбувається зміна обтікання крила, виникають турбулентні вихори (рис. 17).

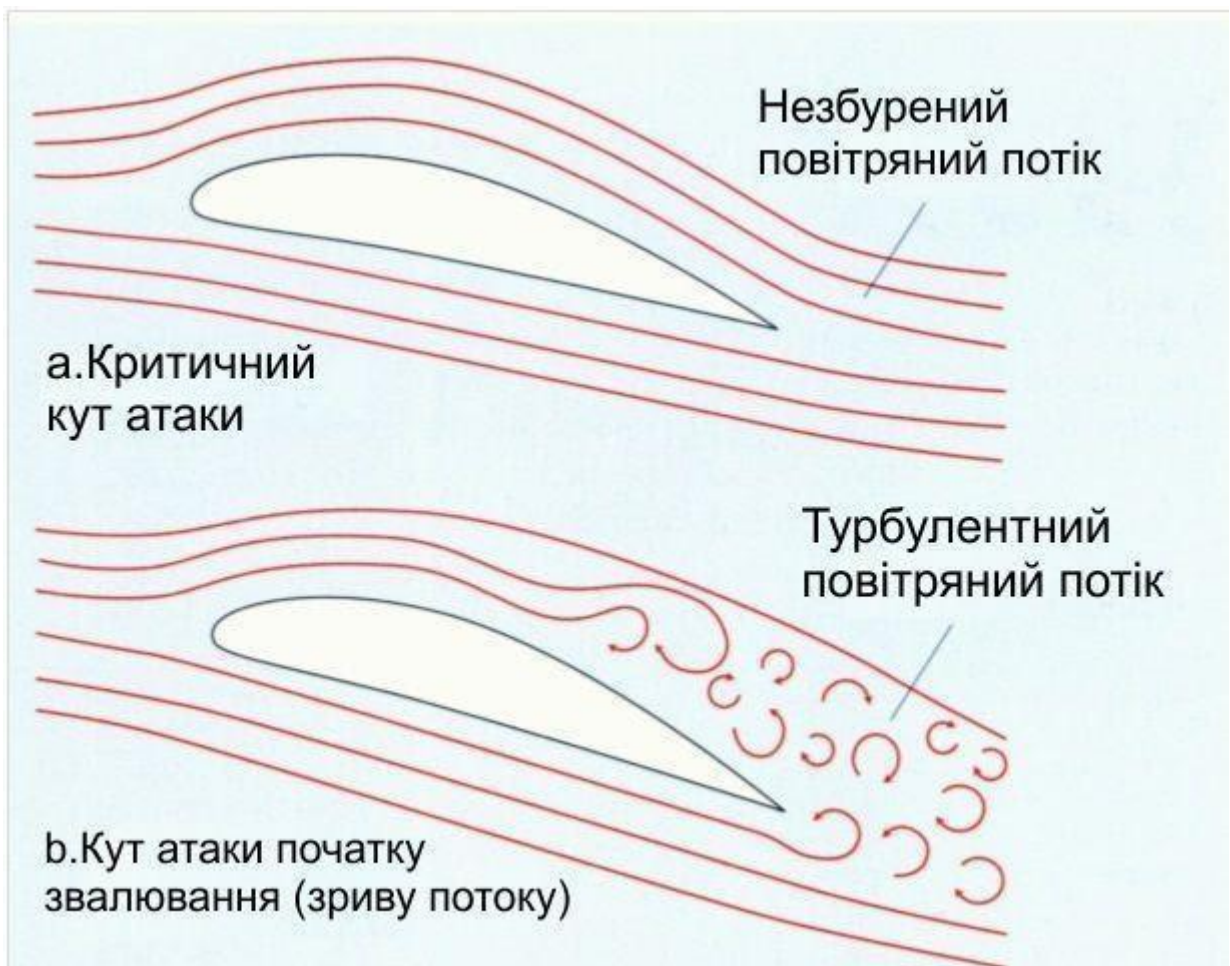


Рис. 17 – Обтікання при різних кутах атаки

Критичний кут атаки – максимальний кут атаки, при якому на крилі ще виникає підйомна сила. Тобто це кут атаки, де полєра крила обривається. Далі її малювати немає сенсу, бо при перевищенні цього кута атаки підйомна сила зникає.

При виході крила за критичний кут атаки відбувається зрив потоку (рис. 16) він завжди не зовсім одночасно на правій і лівій консолях. На зірваній консолі різко падає Y і зростає X . В результаті літак падає вниз і закручується навколо зірваної консолі.

На параплані штопор неможливий. При виході на закритичні кути атаки пара план потрапляє в режим заднього звалювання. Заднє звалювання – це вже не політ, а падіння. Купол параплана падає за спину пілота і складається.

Форма крила та профілі крил.

Аеродинамічні характеристики крила залежать від форми профілю крила та механізації. Тому в літакобудуванні використовують різні профілі крил (рис. 18).

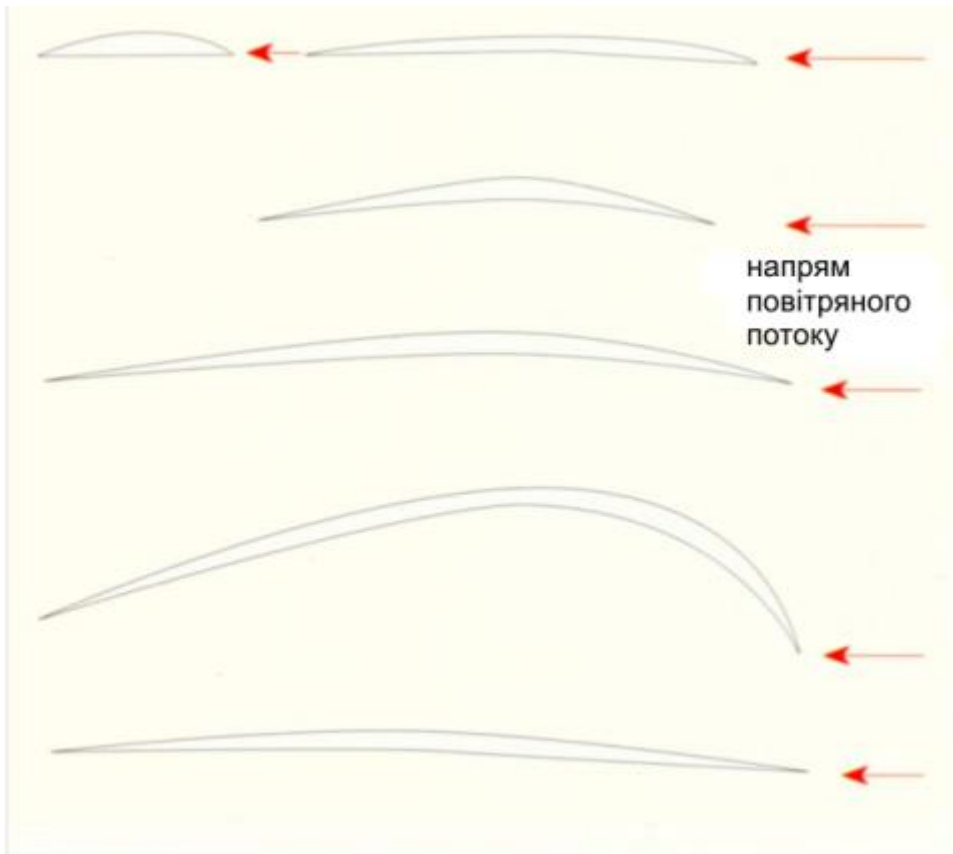


Рисунок 18. –

Профілі крил, запатентовані Філіпсом у 1884 році.

Для боротьби з опором крила та для покращення його аеродинамічних характеристик використовують аеродинамічну крутку .

Аеродинамічна крутка – це спосіб побудови крила, при якому крило має змінний профіль, тобто різний профіль у різних перерізах (рис. 19).

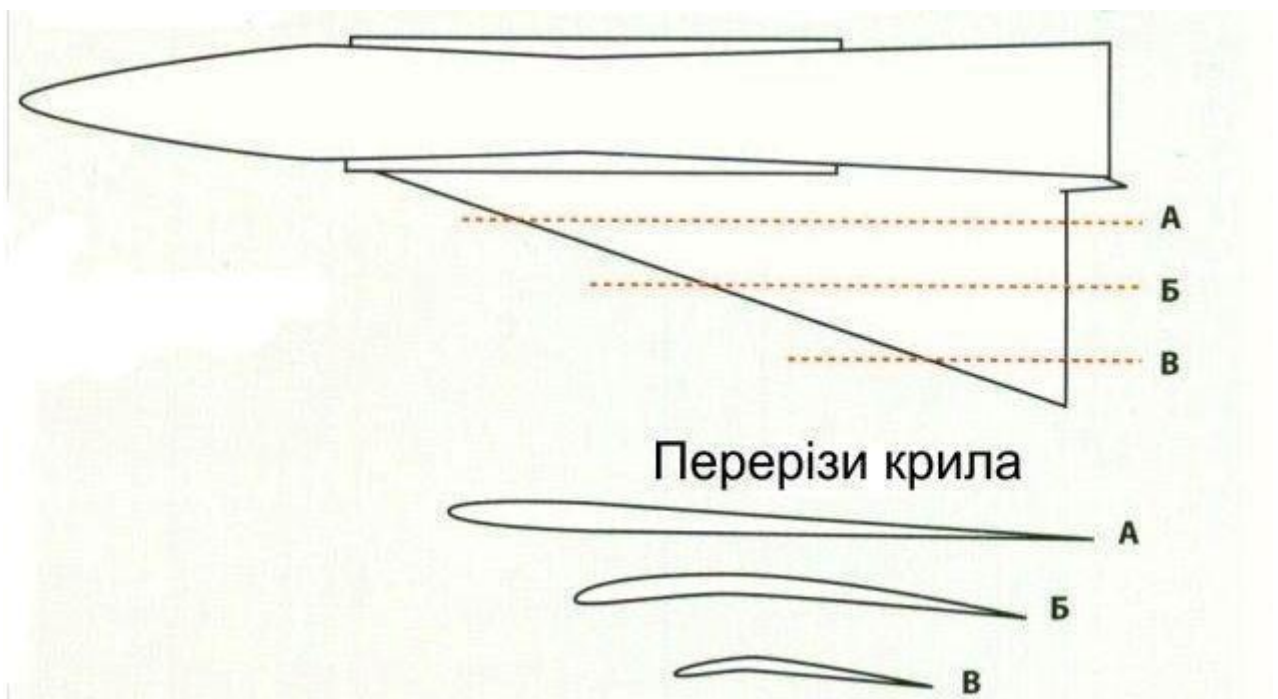


Рисунок 19. – Аеродинамічна крутка.

Профілі крила можуть бути різної товщини. Від товщини профілю крила залежить швидкість потоку над крилом та відстань на крилі, вздовж якої цей потік буде розганятись (рис. 20). Відповідно при збільшенні площі крила, на якій потік повітря буде мати найвищу швидкість, потік краще «прилипає» до крила і його аеродинамічні характеристики покращуються.



Рисунок 20. – а – профіль більшої товщини b – профіль меншої товщини .

Ще використовують крило, яке може міняти кут установки протягом польоту та розсунути крило (рис. 21).

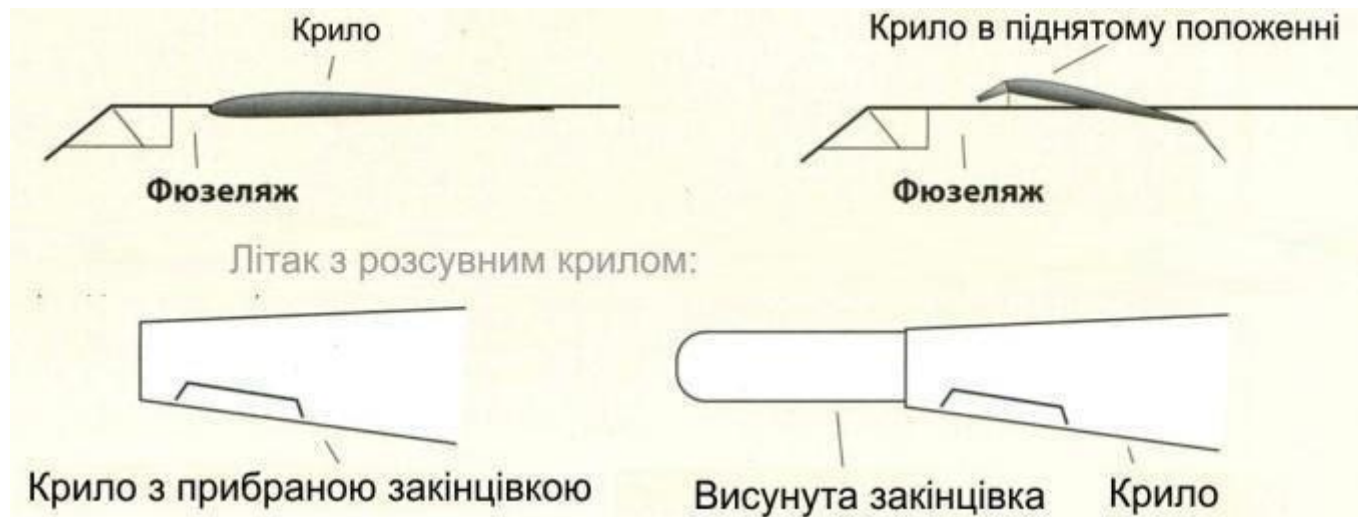


Рисунок 21. – Крило зі змінним кутом установки та розсунути крило.

Існує випадок, коли в результаті певного специфічного обтікання фюзеляжу, підйомна сила на крилі виникає не вгору, а вниз. Тоді його необхідно перевернути (рис. 22).



Рисунок 22. –

Перевернуте крило.

Для того, щоб зробити можливим політ на якомога вищих кутах атаки, використовують способи механізації крила, а саме передкрилки та закрилки (рис. 24 – 35), які запобігають (рис. 23) зриву потоку з крила.

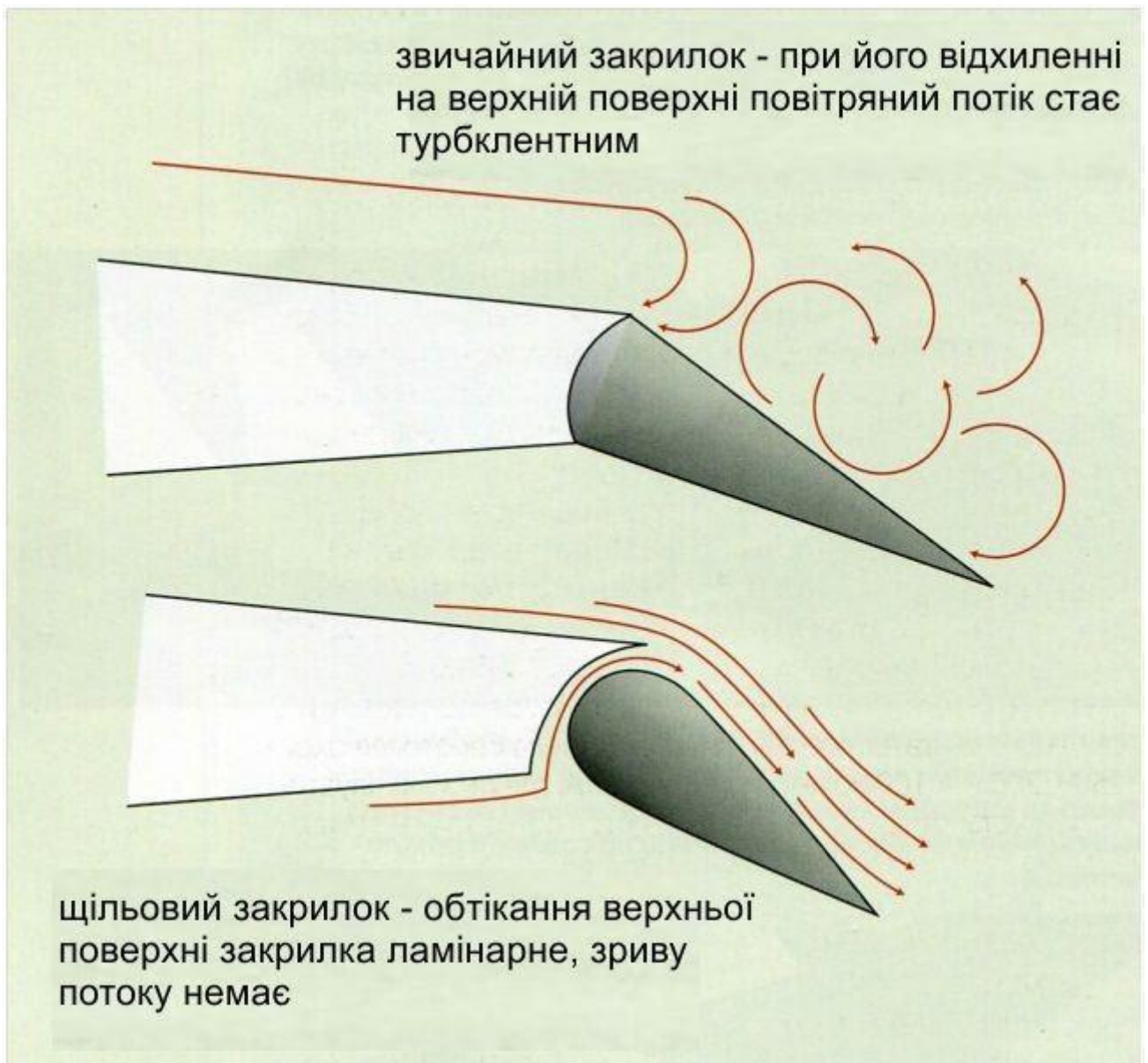


Рис. 23 – Обтікання з використанням звичайного та щільового закрилку.

Передкрилки:

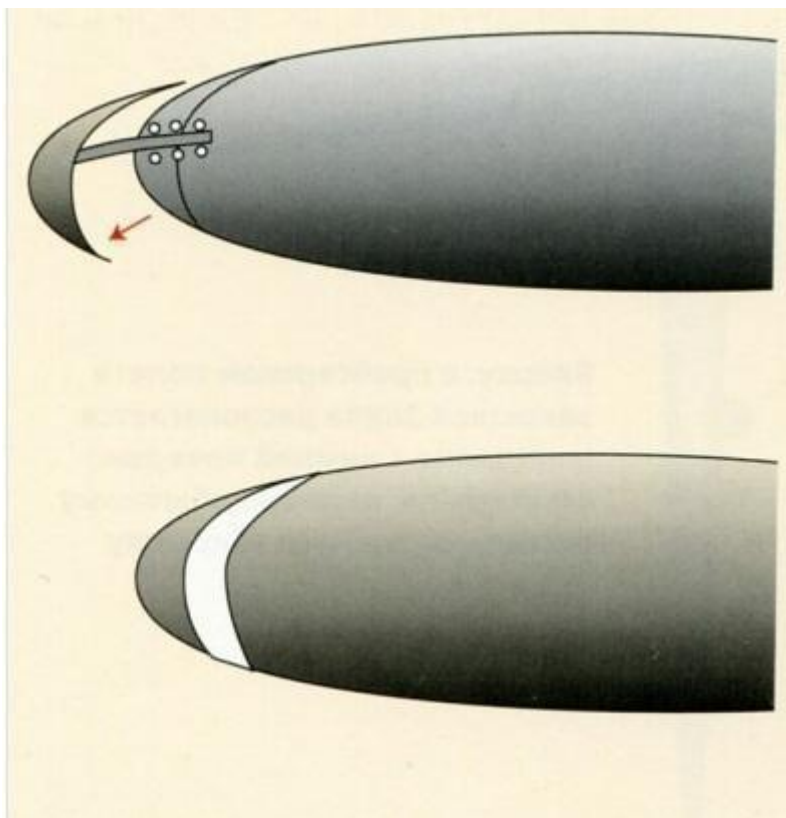


Рис. 25 – Щільовий

акпкдкрилок

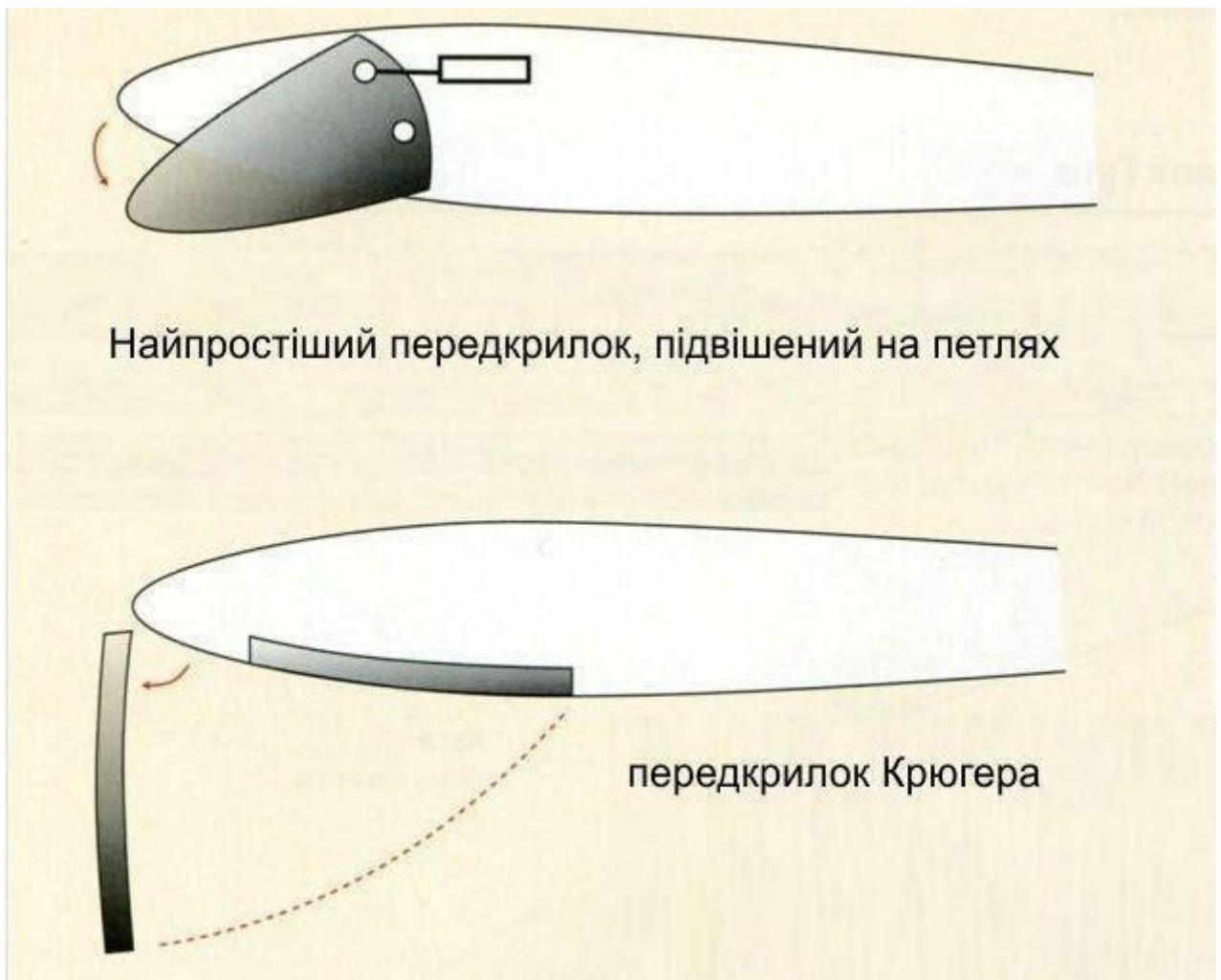


Рис. 24 – Передкрилки, що відхиляється

Закрилки:

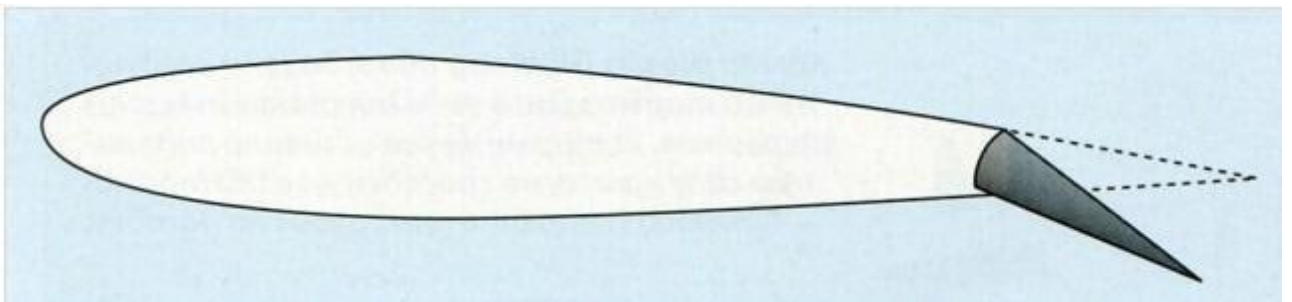


Рис. 26 – Закрилок, що відхиляється

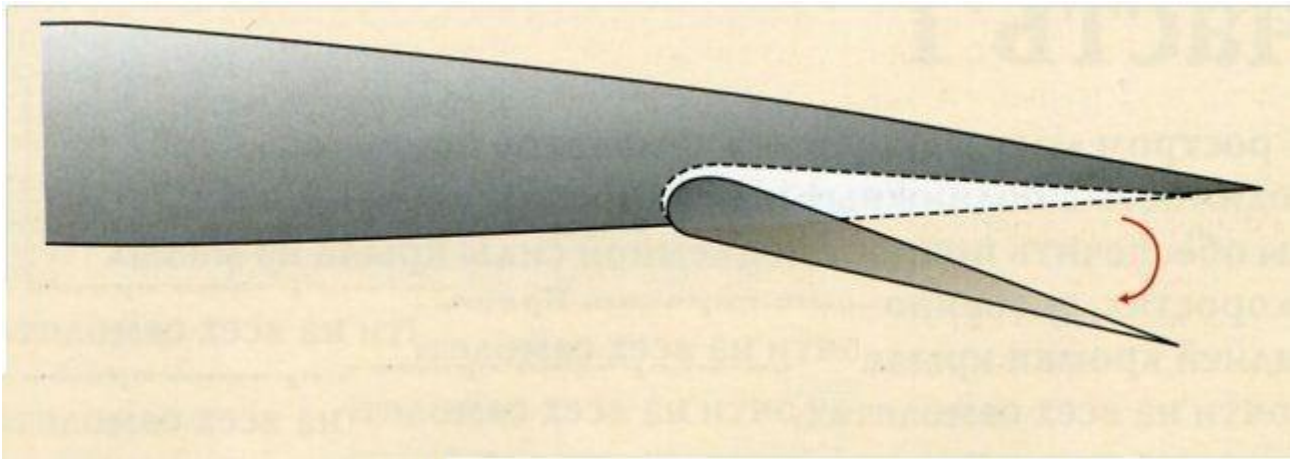
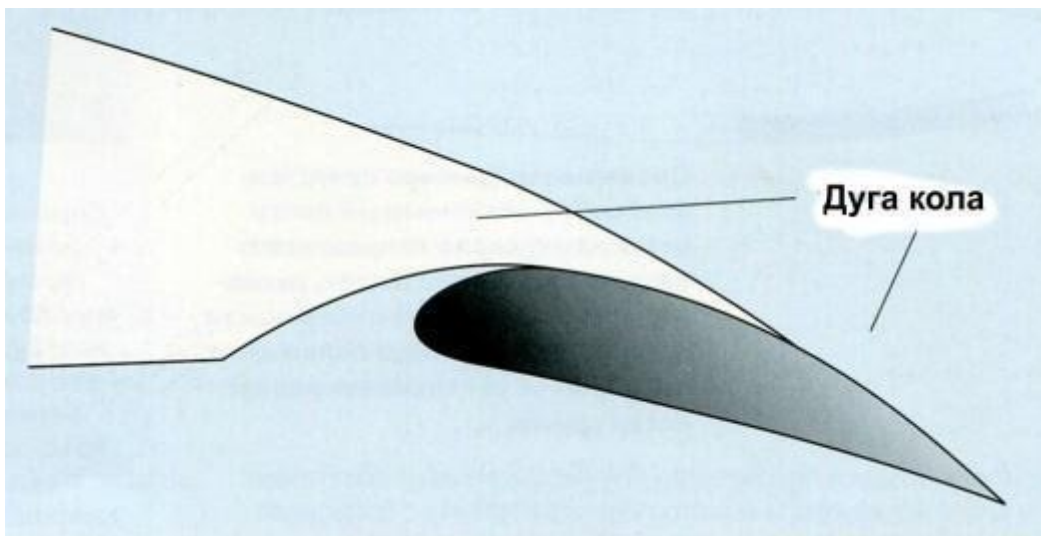


Рис. 27 – Закрилок, що відхиляється



Закрилок Гуга

Рис. 28 –

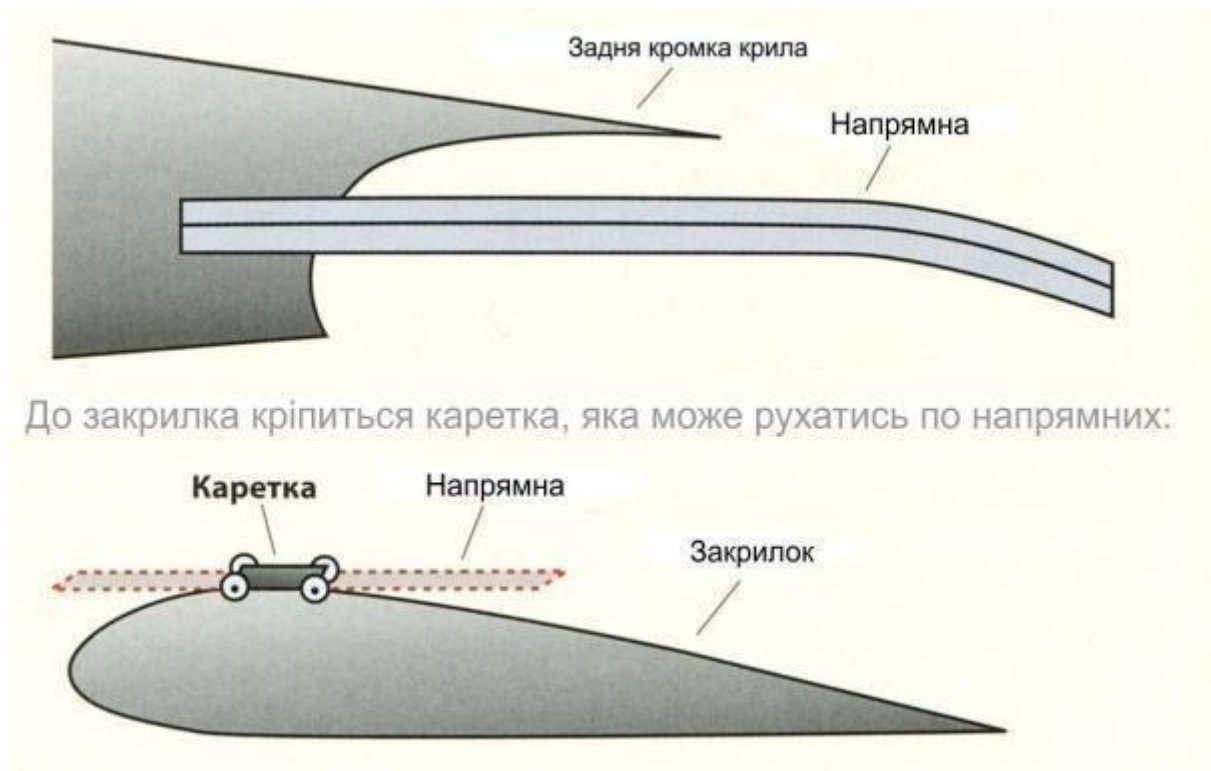
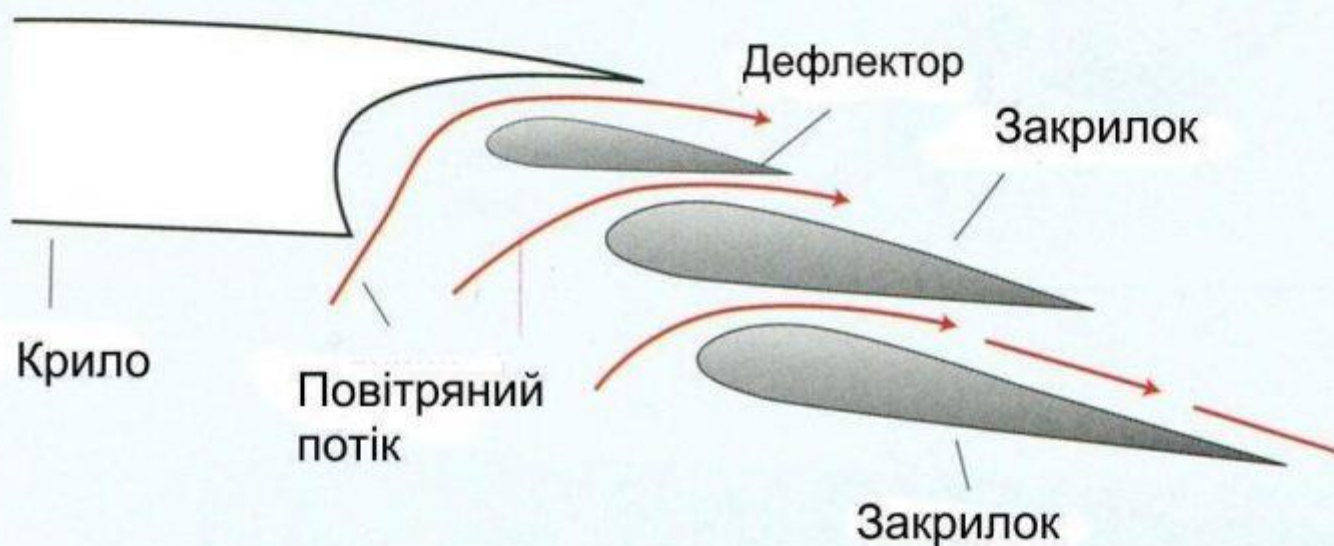


Рис. 29 – Закрилок Фаулера



На авіалайнері Boeing 727 встановлено трьохщільові закрилки



На деяких літаках встановлюють двох секційні закрилки, у яких закрилок сам споряджений додатковим закрилком. Останній може бути як простим (а), так і розщепленим (б):

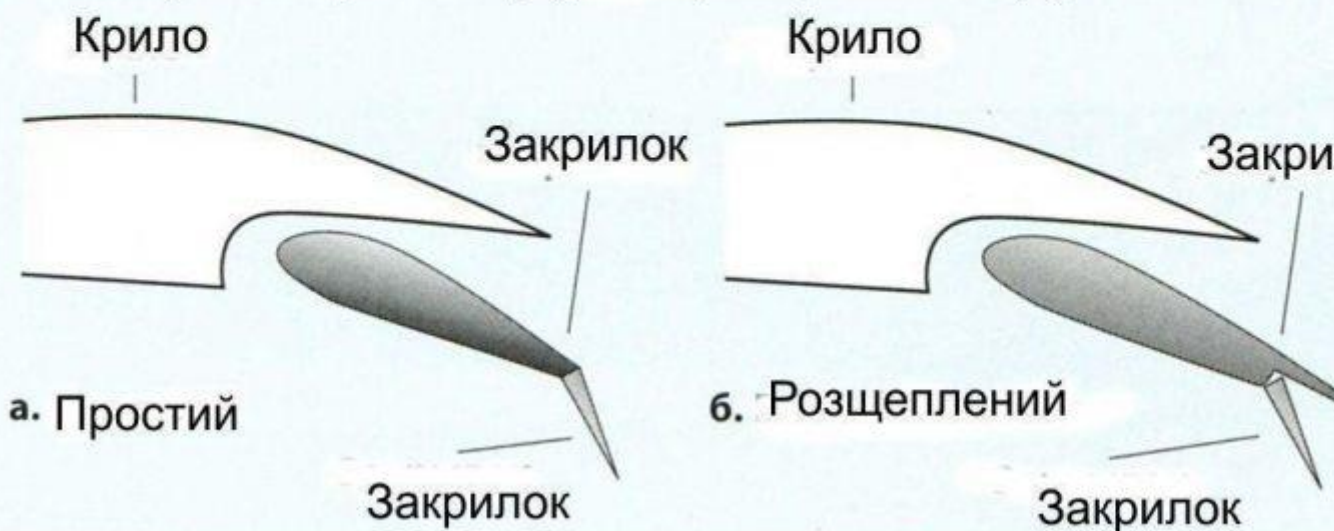


Рис. 30 – Двох та трьохщільові закрилки

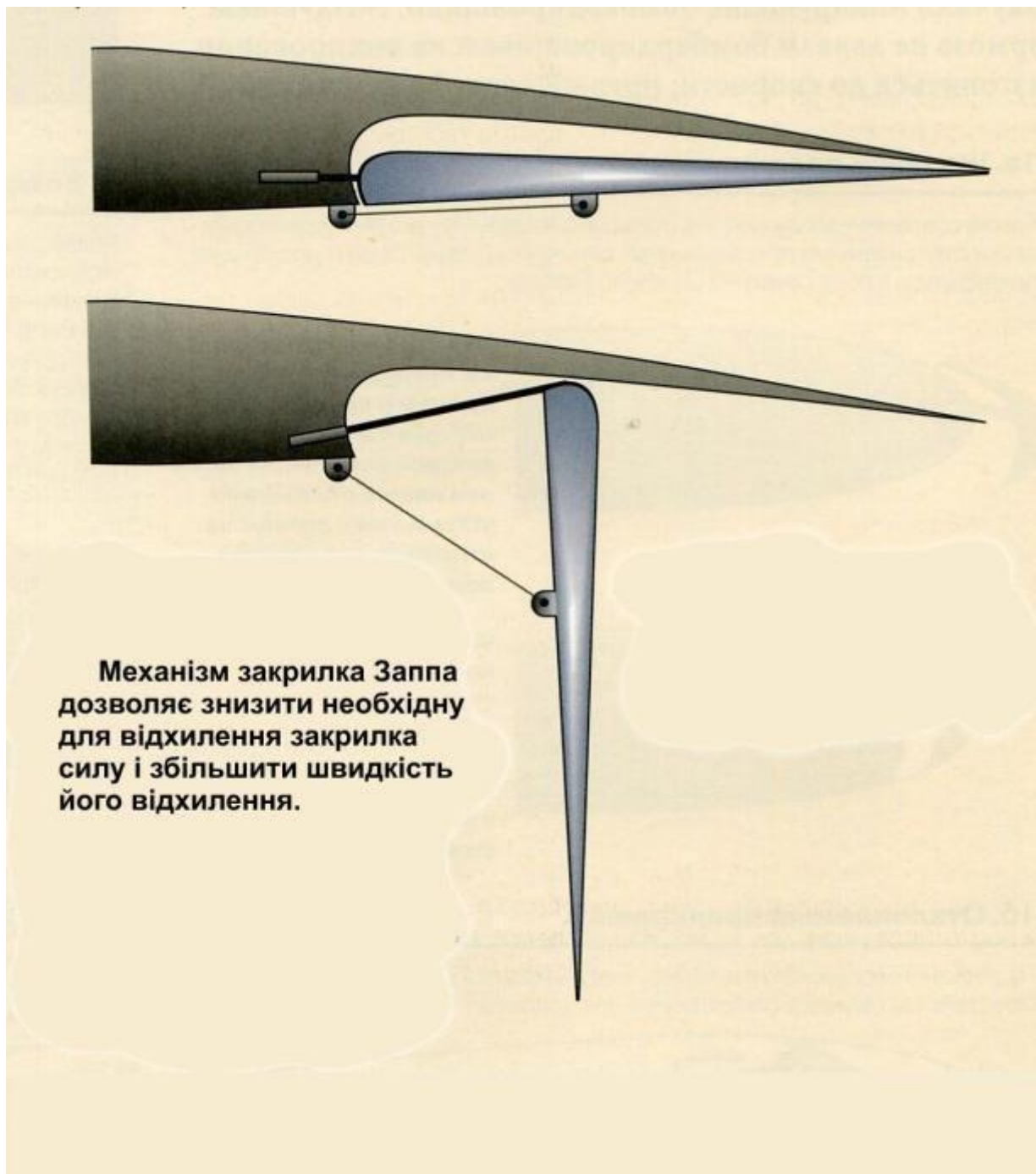


Рис. 31 – Закрилки Заппа

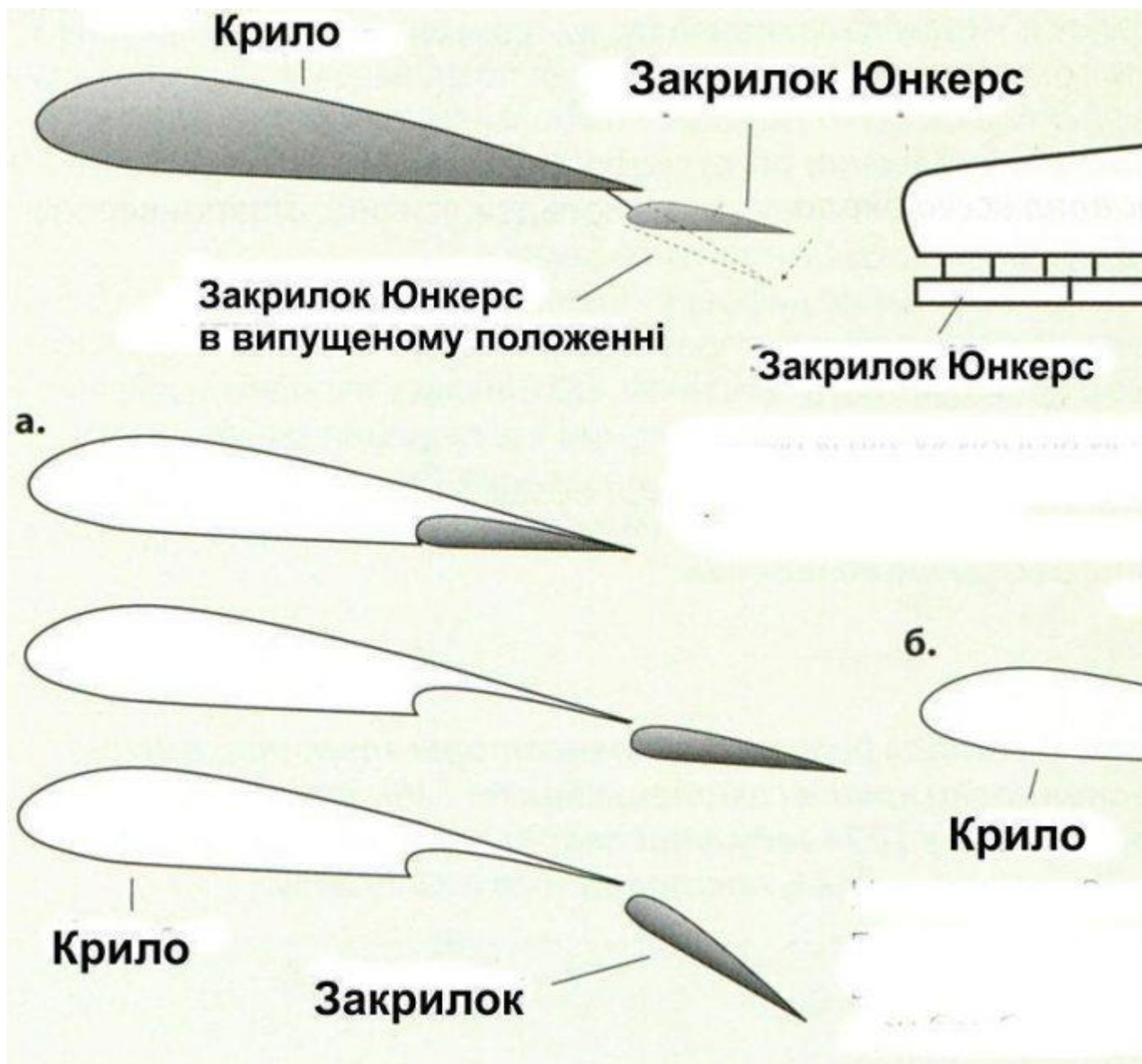


Рис. 32 – Закрилки Юнкерс та Юнгем.

При швидкісних маневрах літак може «зісковзнути» з потоку повітря при великих кутах крену. Для боротьби з цим використовують генератор вихорів (рис. 32). Тут вихори на крилі служать перешкодою для небажаних рухів молекул повітря.

Передня кромка
оригінального крила

Передня кромка
крила з "зубом"

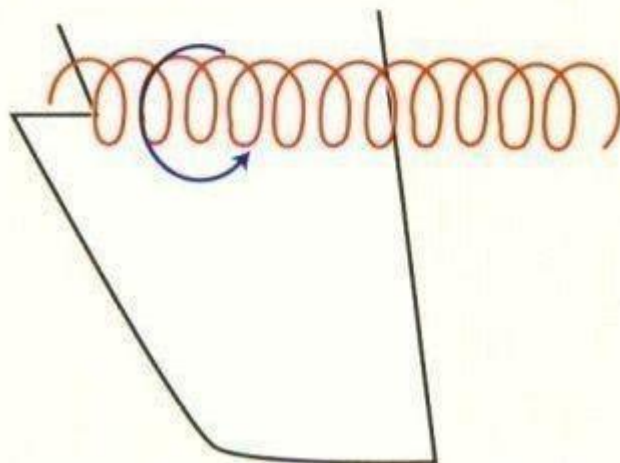


Рис. 33 – Генератор вихорів.

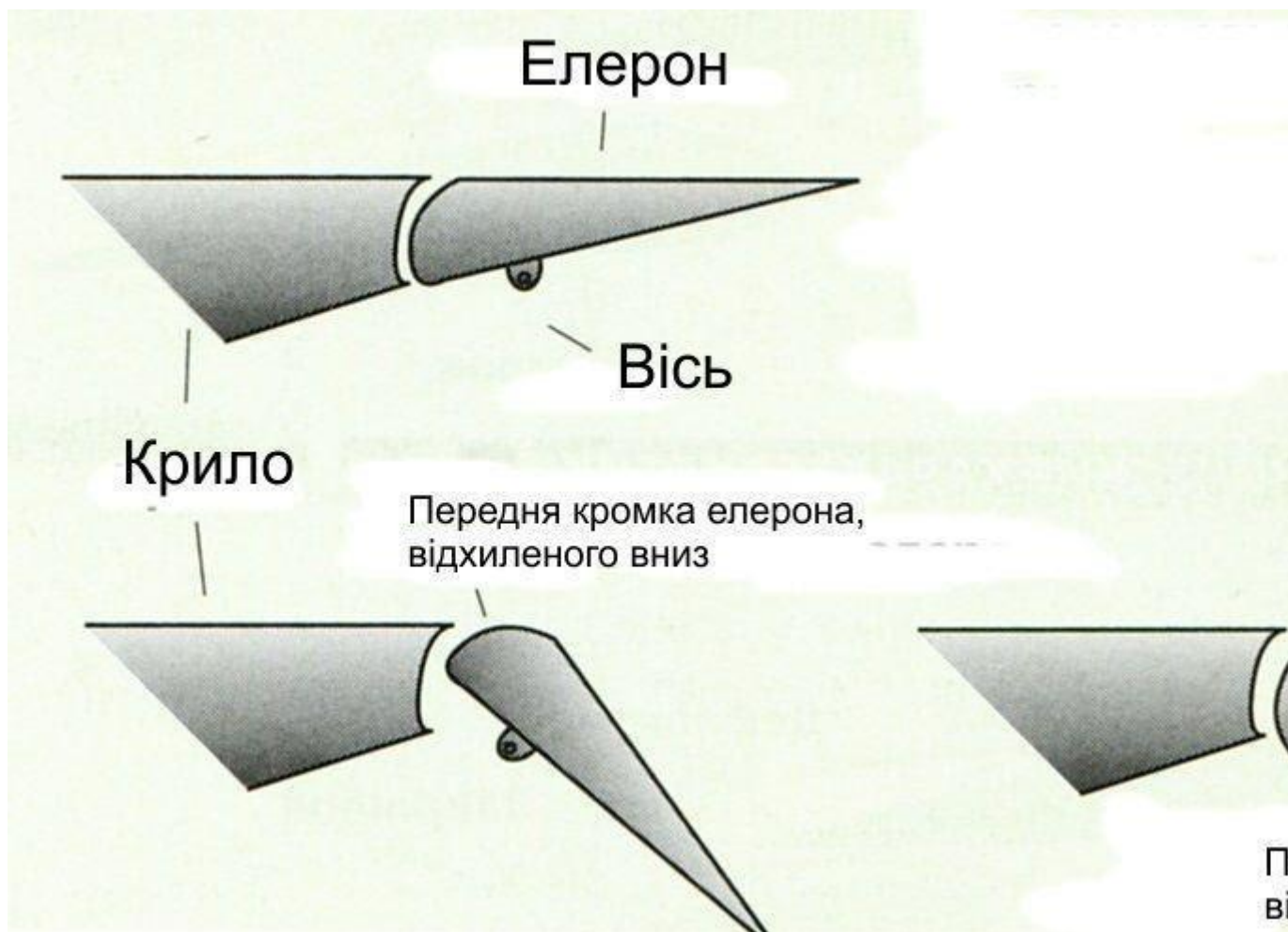


Рис. 34 – Елерон

Для керування літаком по крену використовують елерони – елерон відхилений вгору зменшує підйомну силу на консолі крила, відхилений вниз – збільшує.

При польоті конфігурація крила залежить від фази польоту (рис. 35), адже від конфігурації крила залежить величина підйомної сили та сили опору на крилі.

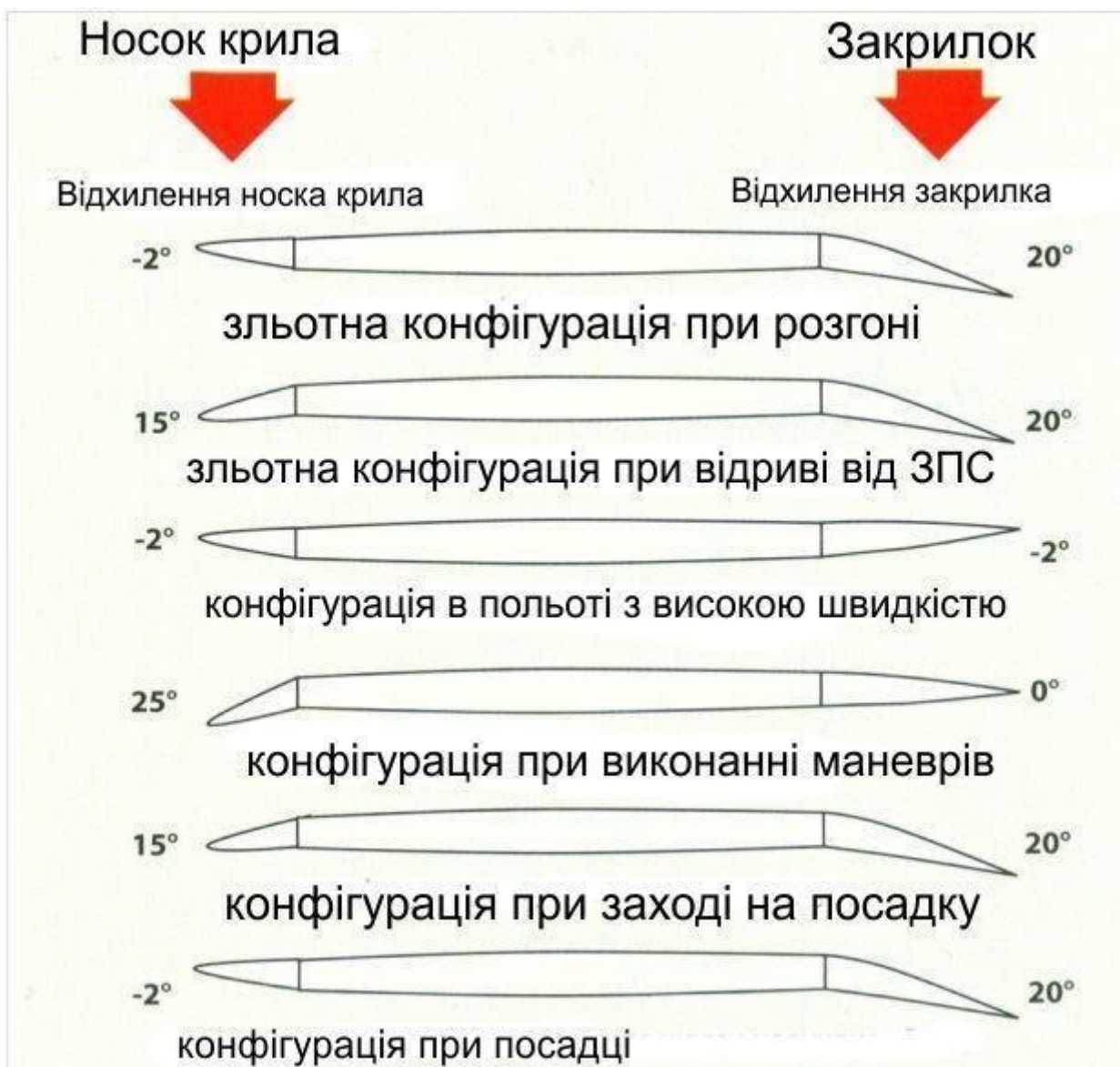


Рис. 35 – Конфігурації крил у різних фазах польоту.

Елементи надзвукової аеродинаміки.

Швидкість звуку – 330 м/с. Технічні можливості людства дозволяють літакам літати при швидкостях, що її перевищують.

На початку «надзвукової ери» було чимало проблем, пов'язаних з тим, що фізика польоту при надзвукових швидкостях відрізняється від польоту при малих швидкостях тим, що повітря при надзвукових швидкостях поводить себе інакше. При надзвукових швидкостях змінна густина повітря, що не дозволяє вже так просто використовувати відомий нам закон Бернуллі(рис. 36).

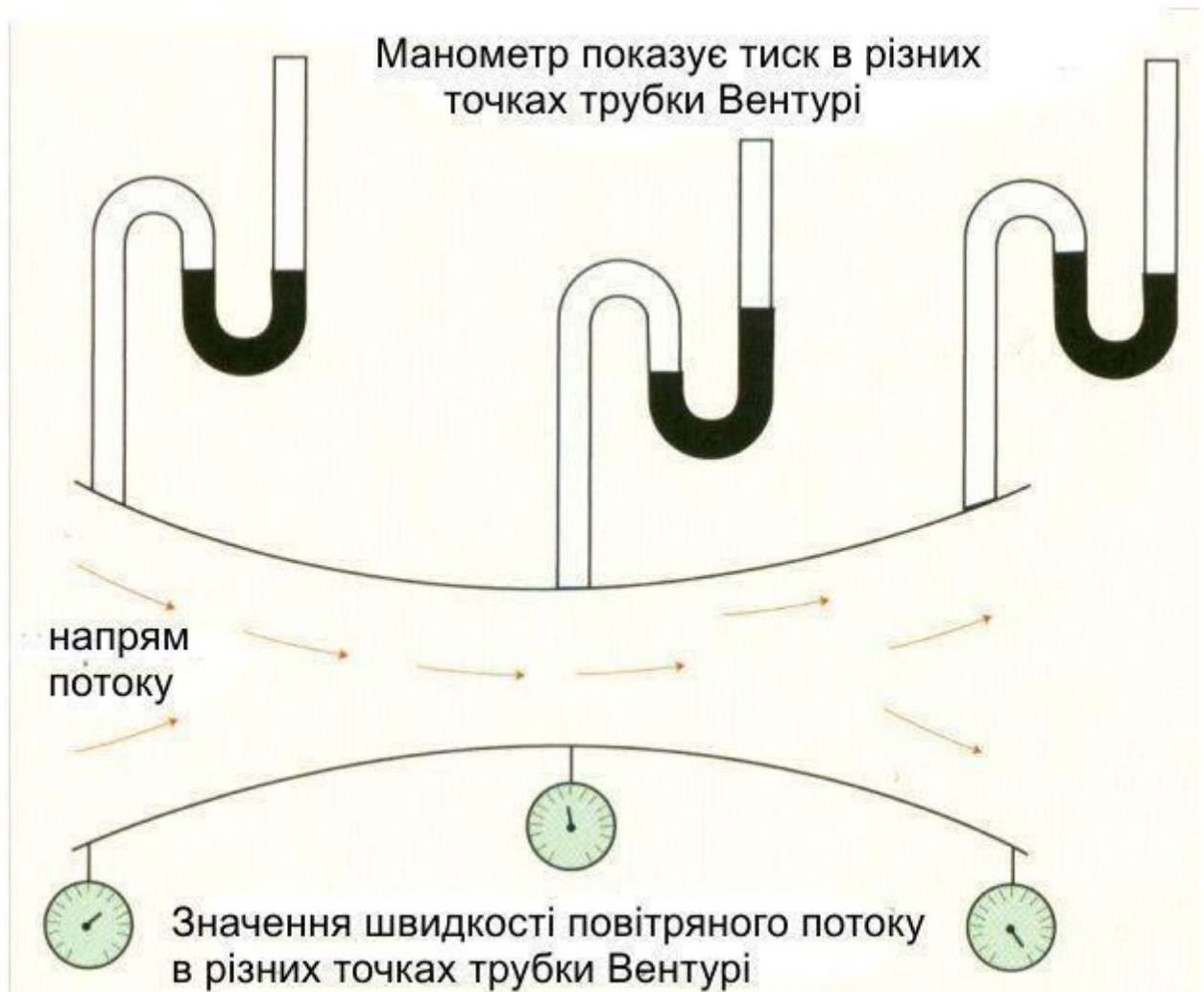


Рис. 36 – Залежність тиску від швидкості потоку при надзвукових швидкостях потоку.

Бачимо, що залежність дещо інша і простими несиметричними профілями крил ми підйомну силу не створимо. У надзвукових літаках використовують профілі крил зображені на рисунку 37.

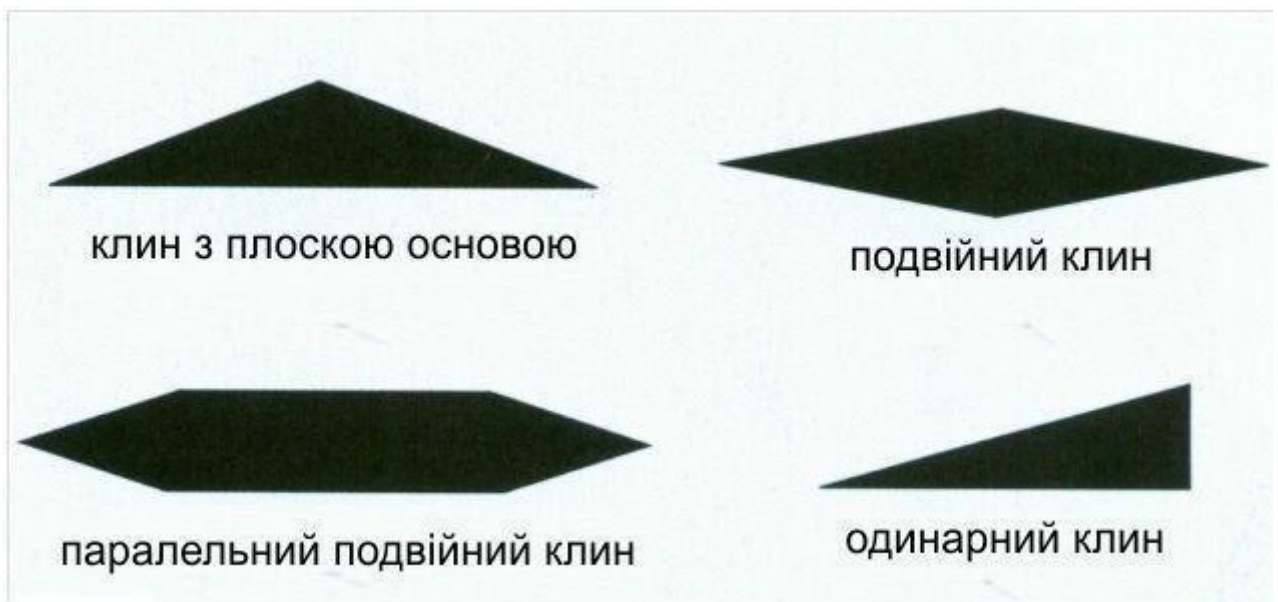


Рис. 37 – Профілі крил надзвукових літаків.

При перетині звукового бар'єру відбувається так званий стрибок густини, тобто різке збільшення густини повітря поблизу об'єкта, що рухається з надзвуковою швидкістю. Це веде до певних нетривіальних змін у аеродинамічному опорі (рис. 38).

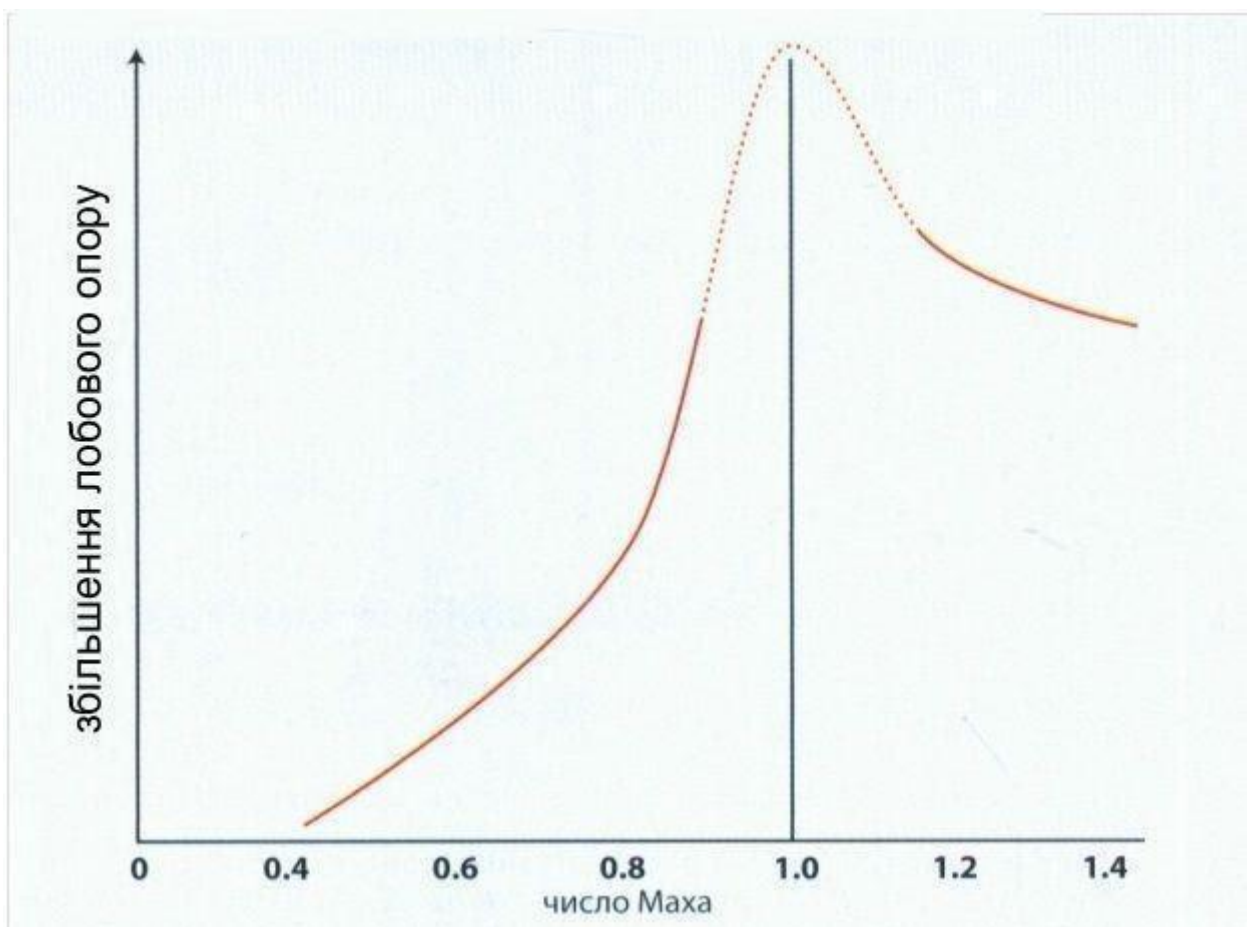


Рис. 38 – Залежність лобового опору від швидкості літака.

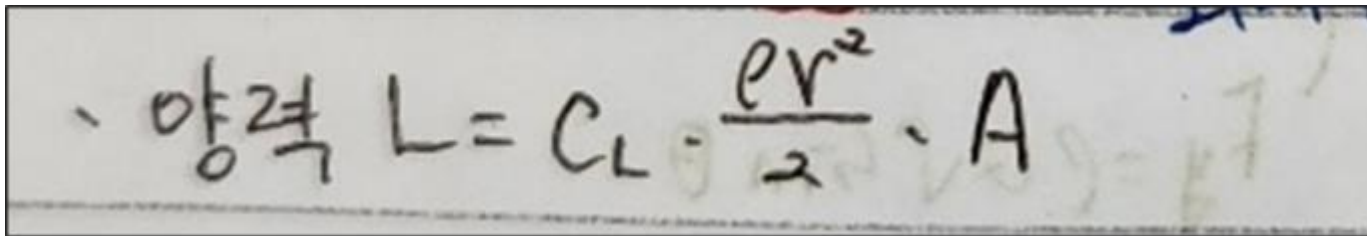
коефіцієнт опору

Коефіцієнт опору являє собою величину опору залежно від форми та стану поверхні об'єкта.

$$C_d = 2D\rho v^2 A$$

- C_d : Коефіцієнт опору
- D : сила опору
- ρ : щільність рідини
- v : швидкість рідини
- A : площа поперечного перерізу об'єкта

1.2) Визначення підйомної сили



The image shows a handwritten formula on a piece of paper. The formula is written in black ink and reads: $L = C_L \cdot \frac{\rho v^2}{2} \cdot A$. To the left of the formula, there is some faint, handwritten text in Korean characters, possibly '양력' (lift).

Підйомна сила — це сила рідини, що діє на об'єкт, піднімаючи його у вертикальному напрямку.

1.2.1) Принцип створення підйомної сили

- Підйомна сила в основному створюється швидкістю рідини та різницею тиску між поверхнею об'єкта.

1.2.2) Коефіцієнт підйомної сили

Коефіцієнт підйому являє собою величину підйому в залежності від форми та кута об'єкта.

$$C_l = 2L\rho v^2 A$$

- C_l : Коефіцієнт підйому
- L : Підйомний календар
- ρ : щільність рідини
- v : швидкість рідини
- A : площа поперечного перерізу об'єкта

Приклади задач і розв'язків

Приклад 1 (розрахунок опору)

Задача: обчисліть силу опору, що діє на автомобіль зі швидкістю 10 м/с у повітрі. Автомобіль має коефіцієнт лобового опору 0.3 і площу поперечного перерізу 2.5 м². Щільність повітря 1.2 кг/м³.

пояснення:

$$D = C_d \rho v^2 A / 2$$

$$D = 0.3 \times 1.2 \times 10^2 \times 2.5 / 2$$

$$D = 45 \text{ N}$$

Отже, сила опору, що діє на автомобіль, дорівнює 45 Н.

Приклад 2 (розрахунок підйому)

Задача: Обчисліть підйомну силу крила літака, коли воно рухається в повітрі зі швидкістю 50 м/с. Коефіцієнт підйомної сили крила становить 0.5, а площа його поперечного перерізу — 30 м². Щільність повітря 1.2 кг/м³.

пояснення:

$$L = C_l \rho v^2 A / 2$$

$$L = 0.5 \times 1.2 \times 50^2 \times 30 / 2$$

$$L = 9000 \text{ N}$$

Отже, підйомна сила, що діє на крило літака, становить 9000 Н.