

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ВНУТРІШНІХ СПРАВ
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ
Циклова комісія Аеронавігації**

ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ

навчальної дисципліни
«Принципи польоту: вертоліт Мі-2»
обов'язкових компонент освітньо-професійної програми першого
(бакалаврського) рівня вищої освіти

Аеронавігація

за темою № 5 – Висіння і вертикальні режими польоту

Кременчук 2023

ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою
Харківського національного
університету внутрішніх справ
Протокол від 30.08.2023 № 7

СХВАЛЕНО

Педагогічною радою
Кременчуцького льотного коледжу
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 14.06.2023 № 13

Розробники:

1. Викладач циклової комісії аеронавігації, спеціаліст 2-й категорії Ємець В.В.

Рецензенти:

- 1. Викладач циклової комісії аеронавігації, кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, професор Тягній В.Г.*
- 2. Професор кафедри аеронавігаційних систем навчально-наукового інституту Аеронавігації, електроніки та телекомунікації Національного авіаційного університету, доктор технічних наук, доцент Шмельова Т.Ф*

План лекції

1. Вертикальні режими польоту: визначення
2. Рівновага вертольота на висінні
3. Висіння
4. Вертикальний набір висоти
5. Вертикальне зниження

Рекомендована література

Основна

1. Зінченко А.Г., Бурсала О.О., Бурсала О.Л. та ін., Аеродинаміка та динаміка польоту вертольота, ч.1. Аеродинаміка вертольота: навч. посіб. – Х.:ХНУПС, 2017.
2. Зінченко А.Г., Бурсала О.О., Бурсала О.Л. та ін., Аеродинаміка та динаміка польоту вертольоту, ч.2. Динаміка польоту вертольота: навч. посіб. – Х.:ХНУПС, 2010.
3. Костенко В.М., Алімпієв А.М., Котов О.Б. та ін., Практична аеродинаміка навчального вертольота Мі-2: підр. – Х.:ХНУПС, 2016
4. Керівництво з льотної експлуатації вертольоту Мі-2.

Додаткова

Інформаційні ресурси в Інтернеті

1. Вертикальні режими польоту: визначення

До вертикальних режимів польоту відносяться: висіння, вертикальний набір висоти і вертикальне зниження.

Висіння - це режим польоту, при якому вертоліт не рухається щодо повітряної маси при постійній висоті польоту.

Вертикальний набір висоти - це режим польоту, при якому вертоліт не рухається щодо повітряної маси в горизонтальній площині, але при цьому збільшується висота висіння.

Вертикальне зниження - це режим польоту, при якому вертоліт не рухається щодо повітряної маси в горизонтальній площині, але при цьому зменшується висота висіння.

При наявності вітру НВ буде працювати в режимі косою обдування, аеродинамічні сили і моменти будуть такими ж як, якби вертоліт летів в напрямку проти вітру зі швидкістю рівної швидкості вітру - вертоліт щодо землі нерухомий, а щодо повітря рухається зі швидкістю вітру.

2. Рівновага вертольота на висині

На вертикальних режимах при відсутності вітру на вертоліт діють сили:

G - сила ваги вертольота, вона залежить від ваги конструкції вертольота, від кількості заправленого палива і від завантаження, прикладена в центрі ваги вертольота і спрямована завжди вниз перпендикулярно поверхні землі.;

Y_{CT} - підйомна сила стабілізатора, залежить швидкісного потоку НВ, при осьовому обтіканні дуже мала, прикладена в центрі тиску стабілізатора, спрямована перпендикулярно поздовжньої осі вертольота, створює момент на кабрування ;

Y_{ϕ} - сила шкідливого опору фюзеляжу, створювана потоком повітря від НВ, прикладена в центрі тиску фюзеляжу і спрямована вниз, створює момент на пікірування. $R_{HВ}$ - повна аеродинамічна сила НВ, залежить від потужності силової установки, від щільності повітря, від оборотів і кроку НВ, прикладена в центрі втулки НВ і спрямована перпендикулярно конусу обертання НВ;

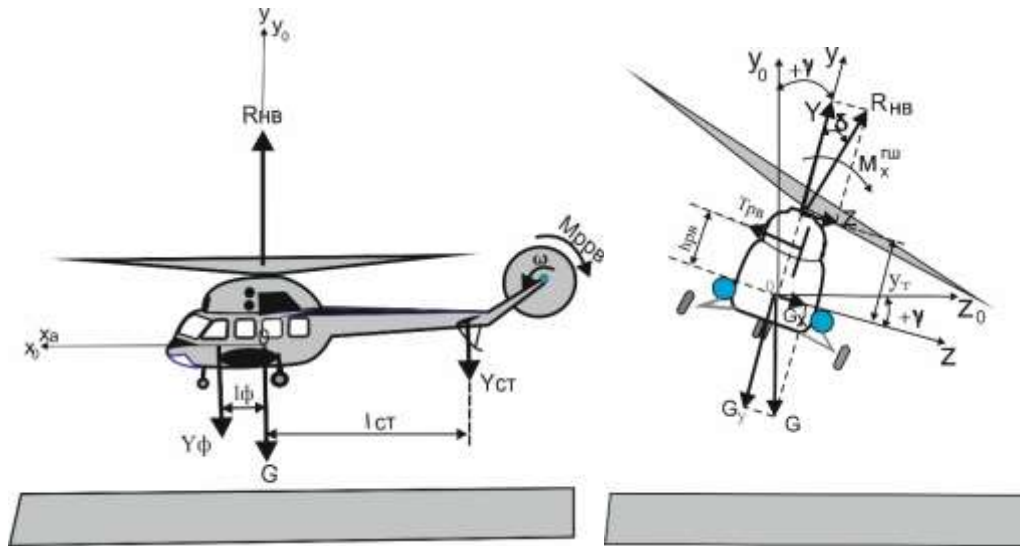
T_{PB} - тяга рульового гвинта, залежить від кута установки лопатей РВ і оборотів НВ, прикладена в центрі втулки РВ, спрямована уздовж осі обертання РВ, створює момент розвертає вертоліт вправо, для врівноваження реактивного моменту НВ.

M_{pPB} - момент створюваний рульовим гвинтом, спрямований у бік, протилежний обертанню РВ, створює момент на кабрування вертольота.

M_{pHB} - реактивний момент несучого гвинта, залежить від опору НВ і підведений потужності, спрямований у бік, протилежний обертанню НВ, розгортає вертоліт вліво.

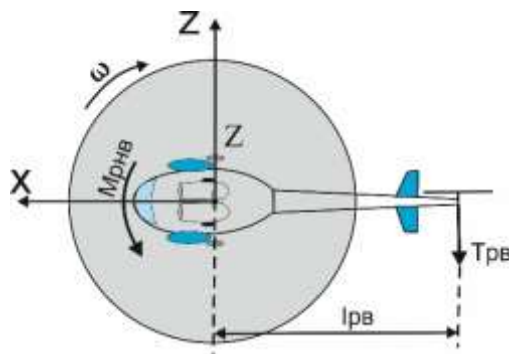
$M_{x_{гш}}$ - момент горизонтальних шарнірів навколо осі 0-X, з'являється при відхиленні сили « $R_{нв}$ » від осі обертання НВ в бік; відхилення « $R_{нв}$ », кренить вертоліт вправо.

$M_{z_{гш}}$ - момент горизонтальних шарнірів навколо осі 0-Z, з'являється при відхиленні сили « $R_{нв}$ » від осі обертання НВ в повздовжньому напрямку.



а) Поздовжня рівновага вертольота на висінні.

б) Поперечна рівновага вертольоту на висінні



в) Шляхова рівновага вертольоту на висінні.

Рисунок 1. Рівновага вертольота на висінні.

Умови рівноваги на висінні:

- відсутність повздовжніх переміщень:

$$V_x = 0 \rightarrow \sum F_x = 0 \quad \text{рис. 1a}$$

- сталість висоти:

$$H = 0 \rightarrow \sum F_y = R_{нв} - G - Y_{\phi} - Y_{cm} = 0 \quad \text{рис. 1a}$$

- відсутність бічних переміщень:

$$V_z = 0 \rightarrow \sum F_z = Z + G_z - T_{pg} = 0 - \text{рис. 1б}$$

- сталість кута тангажу:

$$\vartheta = \text{const} \rightarrow \sum M_z = Z \cdot y_T + M_{z_{ГШ}} - Y_\phi \cdot l_\phi = 0 - \text{рис. 1а}$$

- сталість кута крену:

$$\gamma = \text{const} \rightarrow \sum M_x = Z \cdot y_T + M_{x_{ГШ}} - T_{PB} \cdot h_{PB} = 0 - \text{рис. 1б}$$

- сталість курсу (напрямку):

$$\sum M_y = M_{p_{HB}} - T_{PB} \cdot l_{PB} = 0 - \text{рис. 1в.}$$

3. Висіння

Для виконання висіння необхідно створити підйомну силу R_{HB} , здатну подолати сили: ваги вертольота G , силу опору фюзеляжу Y_ϕ і підйомну силу стабілізатора Y_{CT} .

$$R_{HB} = c_{HB} \cdot \frac{\rho(\omega R)^2}{2} F_{OM}$$

Підйомна сила HB залежить від щільності повітря (ρ), температури повітря, висоти розташування майданчика над рівнем моря і від дій пілота: зміна кроку HB (ЧНО) і частоти обертання HB (ω).

Максимальну величину підйомної сили можна отримати при максимально можливому кроці HB, оптимальної частоті обертання HB, при розташуванні майданчика близько до рівня моря і при низькій температурі повітря. Якщо необхідну підйомну силу в даних умовах отримати неможливо, то необхідно зменшити вагу вертольота, тобто зняти з вертольота частина вантажу.

Максимальна вага вертольота, який може підняти підйомна сила в даних умовах, визначається пілотом перед кожним злетом за допомогою номограм, які знаходяться в Керівництві з льотної експлуатації вертольота.

На висінні вертоліт може бути збалансований тільки з правим креном, так як врівноважити тягу рульового гвинта можна тільки за допомогою бічної сили Z , для створення якої пілот відхиляє РЦШ вправо, з'являється момент горизонтальних шарнірів, який кренить вертоліт вправо. Потрібна тяга PB на висінні максимальна, значить, відхилення правої педалі і правий крен будуть максимальними.

При вітрі спереду, для утримання вертольота над майданчиком, пілот відхиляє РЦШ проти вітру. Аеродинамічні сили і моменти на вертольоті будуть такими ж, як при горизонтальному польоті зі швидкістю рівної швидкості вітру. При вітрі несучий гвинт працює в режимі косою обдування, підйомна сила збільшиться, чим більше швидкість вітру, тим більше підйомна сила HB, а це

значить, що вертоліт може злетіти з великою вагою, перевезти більше вантажу або виконувати висіння на меншому режимі двигунів. При висінні проти вітру вертоліт висить стійко, має максимальний запас по потужності і подорожнього управління. Але дуже сильний вітер стає небезпечним для висіння, тому що поблизу землі потік повітря завжди має завихрення, які створюють бовтанку і небезпеку зіткнення вертольота з землею.

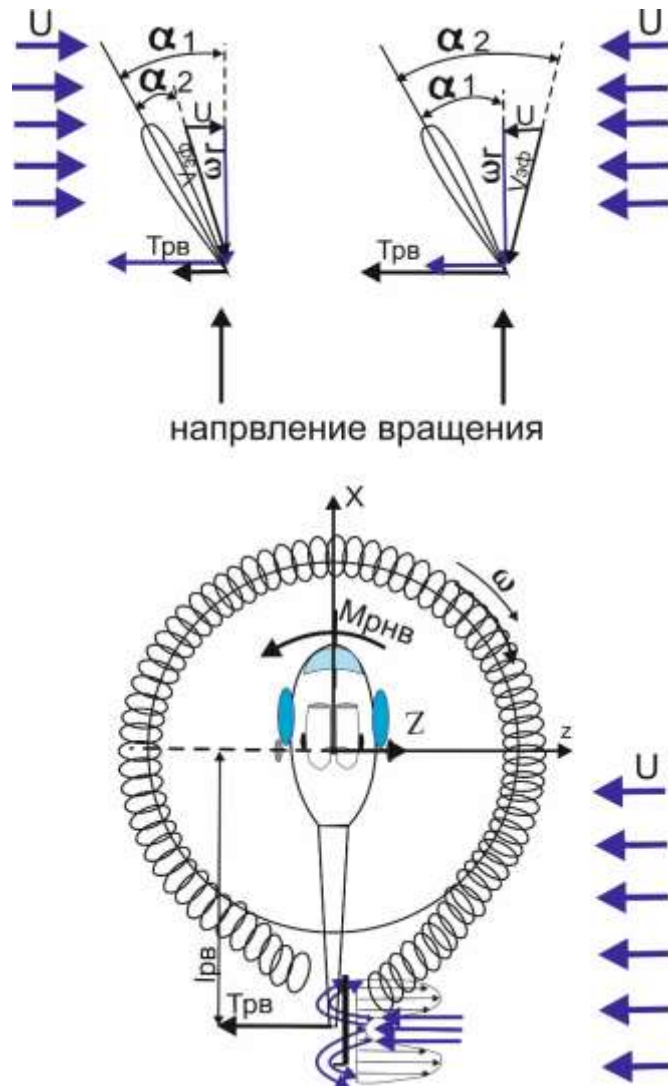


Рисунок 2. Вплив бокового вітру на тягу рульового гвинта.

При вітрі зліва зменшуються кути атаки лопатей РВ, зменшується тяга РВ (рис.2), через велику парусність хвостової балки на ній з'являється сила, що розгортається вертоліт вліво проти вітру. Щоб утримати вертоліт на заданому курсі пілот відхиляє вперед праву педаль, збільшуючи тим самим кут атаки у лопатей РВ і збільшуючи тягу РВ. При сильному вітрі зліва більш допустимого, права педаль може дійти до упору, а вертоліт буде мимовільно розгортатися вліво - втрата шляховий керованості.

При вітрі справа виникають сприятливі для висіння явища: кути атаки лопатей РВ збільшуються (рис.2), збільшується тяга РВ, на хвостовій балці виникає сила, що розгортається вертоліт вправо, яка доповнює тягу РВ.

Але, при вітрі більше 3м/с на РВ починають виникати несприятливі явища, що зменшують $T_{РВ}$:

- вихори з правого боку НВ здуваються на РВ;
- вітер проривається через центральну частину РВ (в центральній частині мала індуктивна швидкість) і утворюються вихори в районі РВ;
- кут атаки лопатей РВ може стати більш критичного - зрив потоку;
- при сильному вітрі РВ може увійти в режим вихрового кільця.

Ефект несприятливих явищ набагато сильніше сприятливих. У такій ситуації відхилення правої педалі, аж до упору, може не зберегти колійне рівновагу, і вертоліт буде мимовільно розгортатися вліво - втрата шляховий керованості.

При вітрі ззаду відбувається взаємодія вітру з індуктивним потоком повітря від НВ, що призводить до утворення вихорів в районі РВ, і як наслідок до зменшення ТРВ і необхідності значного відхилення правої педалі. Крім того, для утримання вертольота від переміщення вперед пілот відхиляє РЦШ «до себе». При сильному вітрі ззаду, РЦШ і права педаль можуть дійти до упору і вертоліт втратить подовжню і шляхову керованість.

Для збереження керованості вертольота на висінні Керівництвом з льотної експлуатації вертольота Мі-2 вводяться обмеження по швидкості вітру у землі.

Напрямок вітру	Швидкість вітру
зустрічний	18 м/с
ліворуч	10 м/с
праворуч	10 м/с
попутний	5 м/с

При висінні поблизу землі повітря, який відкидає НВ вниз, гальмується землею і створюється підвищений тиск - «повітряну подушку», яка дає приріст підйомної сили НВ. На малій висоті пілот може виконати висіння з меншою потужністю двигунів (на меншому кроці) в порівнянні з висіння поза зоною впливу «повітряної подушки» або використовувати цей приріст підйомної сили для збільшення вантажопідйомності вертольота (рис.3). Величина приросту тяги залежить від багатьох факторів.

Висота висіння. Чим більше висота, тим менше ефект «повітряної подушки».

Висота майданчика над рівнем моря. Чим більше висота площадки, тим менше ефект, тому що зі збільшенням висоти зменшується щільність повітря.

Підстилаюча поверхню:

- при висінні над схилом ефект зменшується, а при нахилі поверхні більше 40° - зникає;
- при висінні над вершиною пагорба ефект зменшується, а при кутах нахилу більше 40° - зникає;
- при висінні над центром конічної ями ефект залежить від нахилу стінок і глибини ями. Якщо яма неглибока, нахил стінок пологий - менше 10° , то ефект збільшується, а якщо яма глибока, нахил стінок понад 20° , то в ямі формується вихровий протягом повітря і ефект зменшується;

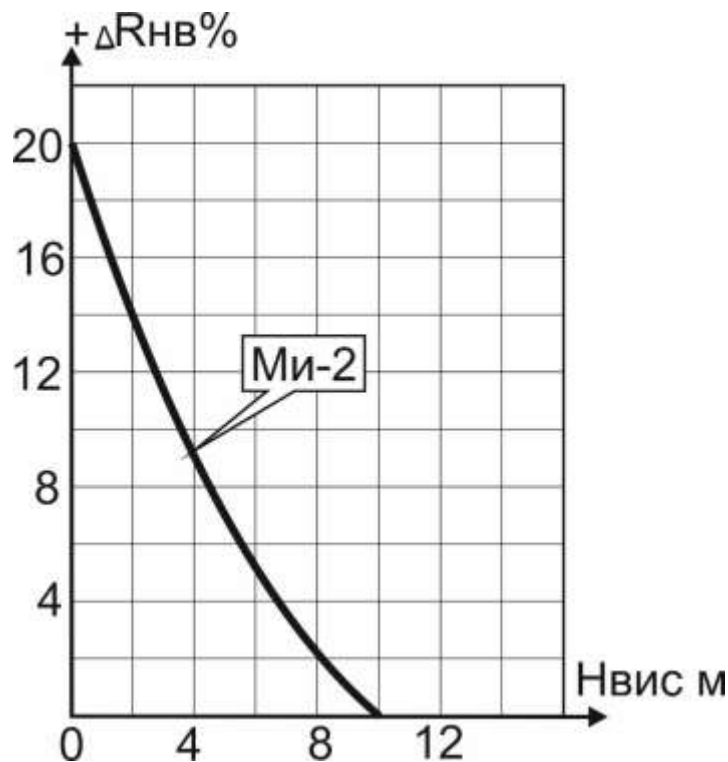


Рисунок 3. Вплив «повітряної подушки» на підйомну силу НВ.

- при висінні над центром циліндричної ями з вертикальними стінками, з діаметром ями рівним 2-2,5 діаметра НВ, в ямі утворюється потужний вихровий потік і підйомна сила НВ може зменшитися на 20-30%, Виникає небезпечна тенденція «засмокування» вертольота в яму;
- при висінні вертольота поблизу вертикальної стінки у частині захоплюваної площі НВ поблизу стіни з'являються вихори, підйомна сила НВ поблизу стіни зменшується і вертоліт крениться в бік стінки - підсмоктуватиметься сила «на стінку»;

- при висінні вертольота над травою швидкість розтікання повітря по землі зменшується і ефект збільшується;
- при висінні вертольота над чагарником, над лісом, над водою - ефект зменшується або зовсім зникає.

При горизонтальному переміщенні вертольота поблизу землі ефект «повітряної подушки» зменшується і на швидкості 30-40 км/год зникає повністю, але підйомна сила НВ при цьому не зменшується тому починає діяти ефект косою обдування НВ.

4. Вертикальний набір висоти

Потрібна потужність для створення вертикального набору висоти більше потужності, потрібної для висіння:

$$N_{НАВ} = N_{ВІС} + \Delta N ;$$

При переміщенні вгору важеля «крок-газ», для створення надлишку потужності $+\Delta N$, збільшується підйомна сила, збільшиться реактивний момент НВ, порушується колійна балансування вертольота і вертолїт під дією реактивного моменту НВ буде прагнути розвернутися вліво. Для запобігання розвороту необхідно відхиленням правої педалі збільшити тягу РВ, що в свою чергу призведе до порушення поперечної рівноваги, тому тяга РВ буде більше сили Z і вертолїт почне переміщатися в бік більшої сили, тобто вліво.

Для запобігання переміщення необхідно збільшити силу Z відхиленням ручки циклічного кроку вправо. Вертикальна швидкість при цьому буде збільшуватися з прискоренням. Але при збільшенні вертикальної швидкості збільшується повітряний потік зверху, що призводить до зменшення кутів атаки елементів лопатей НВ, зменшується підйомна сила НВ і при досягненні певної, вертикальної швидкості, вона стабілізується.

Максимальне значення V_y можна отримати при використанні максимальної злітної режиму двигуна (двигунів) тобто при максимальному надлишку потужності $(+\Delta N_{\max})$, і при мінімальній вазі вертольота (G_{\min}):

$$V_{y \max} = 75 \cdot \frac{\Delta N_{\max}}{G_{\min}}$$

де: $\Delta N_{\max} = N_{НАВ} - N_{ПОТР}$ (Коефіцієнт 75 використовується для перекладу потужності з кінських сил в кГм/с).

Зі збільшенням висоти, з огляду на зниження щільності повітря, потрібна потужність для висіння збільшується, а розташовується зменшується, тому буде зменшуватися надлишок потужності, а значить і V_y і на певній висоті надлишок потужності зникне $\Delta N = 0$, тоді набір висоти припиниться ($V_y = 0$).

Висота, на якій на злітному режимі двигунів вертикальний набір не відбувається, називається теоретичною статичною стелею вертольоту.

Висота, на якій на злітному режимі двигунів вертикальна швидкість в наборі становить 0,5м/с, називається практичною статичною стелею.

Стеля висіння буде залежати від щільності повітря і від польотної маси вертольота. У стандартній атмосфері практична статична стеля вертольоту Мі-2 становить:

- з масою вертольота 3550кг - 1000м.
- з масою вертольота 3350кг - 1700м.

5. Вертикальне зниження

Потужність, що потрібна для створення вертикального зниження менше, ніж для висіння:

$$N_{3H} = N_{VIC} - \Delta N$$

Для створення вертикального зниження необхідно, за допомогою незначного опускання важеля «крок-газ», зменшити потужність двигуна (двигунів) що призведе до зменшення підйомної сили, порушення шляхового балансування - зменшиться реактивний момент НВ і вертолiт буде прагнути розвернутися вправо.

Для запобігання розвороту необхідно відхиленням лiвої педалі зменшити тягу РВ, що в свою чергу призведе до порушення поперечного рiвноваги тому тяга РВ стане менше сили Z і вертолiт почне переміщатися в бiк бiльшої сили тобто вправо і для запобігання переміщення необхідно зменшити силу Z відхиленням ручки циклічного кроку влiво.

Вертикальна швидкість зниження при цьому буде збiльшуватися з прискоренням. Але при збiльшенні вертикальної швидкості збiльшується потiк повітря знизу, що призводить до збiльшення кутiв атаки елементiв НВ, збiльшується пiдйомна сила НВ і при певній вертикальну швидкiсть зниження вертикальна швидкiсть стабiлізується.

Для пiдвищення безпеки польотiв не рекомендується знижуватися в небезпечнiй зонi [КЛЕ, 2.5.1, л.8], а якщо, немає можливості знижуватися з поступальною швидкiстю, то вертикальне зниження виконувати строго проти вiтру, не допускаючи вертикальну швидкiсть зниження бiльш 2 м/с, щоб НВ не увiйшов в небезпечний режим «вихрового кiльця», при якому зменшується тяга НГ, погiршується керованiсть вертольоту, виникає «трясіння», вертикальна швидкiсть мимовiльно збiльшується.

