

**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 № 13 – Складні та аварійні ситуації в польоті**

**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. Флатер
  - 1.1 Фізична сутність і умови виникнення флатера
  - 1.2 Ознаки виникнення флаттера і дії пілота
  - 1.3 Заходи щодо запобігання виникненню флаттера
2. Режим «вихрового кільця»
  - 2.1 Фізична сутність «вихрового кільця»
  - 2.2 Умови і ознаки виникнення «вихрового кільця»
  - 2.3 Дії пілота при попаданні в режим «вихрового кільця»
3. Перевищення максимально допустимої швидкості польоту
  - 3.1 Фізичні явища, що відбуваються при перевищенні максимальної швидкості польоту
  - 3.2 Фізична сутність зриву потоку
  - 3.3 Умови і ознаки виникнення зриву потоку
  - 3.4 Дії пілота при виникненні зриву потоку
4. Перетяжеління НГ
  - 4.1 Фізична сутність перетяжеленої НВ
  - 4.2 Умови і ознаки виникнення перетяжеління НВ

## 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. Флатер

### 1.1 Фізична сутність і умови виникнення флатера

Флатер - це англійське слово, що означає мимовільно виникають вібрації елементів літального апарату викликають, іноді, руйнування конструкції.

У польоті на лопаті НВ діють збуджують коливання аеродинамічних сил, а так само демфіруючими аеродинамічні і пружні сили. Швидкість польоту і частота обертання НВ, при яких збуджуючі сили рівні демфіруючими, називаються критичними по флаттеру. При польоті вертольота з великою швидкістю і великою частотою обертання НВ збуджуючі сили можуть перевищити демфіруючими і тоді виникне флатер.

На виникнення флаттера впливають жорсткість конструкції лопаті на вигин і кручення, місце розташування центру тиску, а головне це розташування центру мас по відношенню до центру жорсткості. Якщо лопать під дією аеродинамічних сил отримає вигин вниз або вгору від початкового положення, то після припинення дії згинального сили, під дією пружних сил, вона буде прагнути зайняти вихідне положення, але під дією сил інерції вона проходить початкове положення і згинається в протилежну сторону. Якщо дії пружних сил будуть сильніше изгибающих, то коливання лопаті будуть затухаючими, а якщо сильніше будуть изгибающие, то коливання можуть стати збудливими (збільшуються).

Якщо центр мас лопаті перебувати позаду центру жорсткості (мал.38):

- При вигині лопаті вниз, в центрі мас виникає сила інерції  $F_{ин}$  напрямки в сторону протилежну руху центру мас і лопать закручується навколо центру жорсткості на зменшення установочного кута, що призводить до зменшення підйомної сили і до ще більшого прагнення лопаті вниз.
- при вигині лопаті вгору, з тієї ж причини її установчий кут буде збільшуватися, що призведе до збільшення підйомної сили і ще більшого руху вгору. При цьому амплітуда і частота коливань буде зростати аж до руйнування лопаті.

Якщо центр мас лопаті розташований попереду центру жорсткості (рис. 1,б):

- при вигині лопаті вниз в центрі мас виникне сила інерції направлена вгору і лопать закручується навколо центру жорсткості на збільшення установочного кута, що призведе до збільшення підйомної сили і зменшення амплітуди коливання.
- при вигині лопаті вгору, вона закручується на зменшення установочного кута, що призводить до зменшення підйомної сили і зменшення частоти і амплітуди коливань.

## 1.2 Ознаки виникнення флаттера і дії пілота

Флаттер може виникнути в польоті на швидкості близькій до максимальної:

- тряска вертольота з частотою не кратною частоті при обертанні НВ;
- погіршення керованості;
- порушення «соконусності» лопатей НВ (розмив конуса обертання).

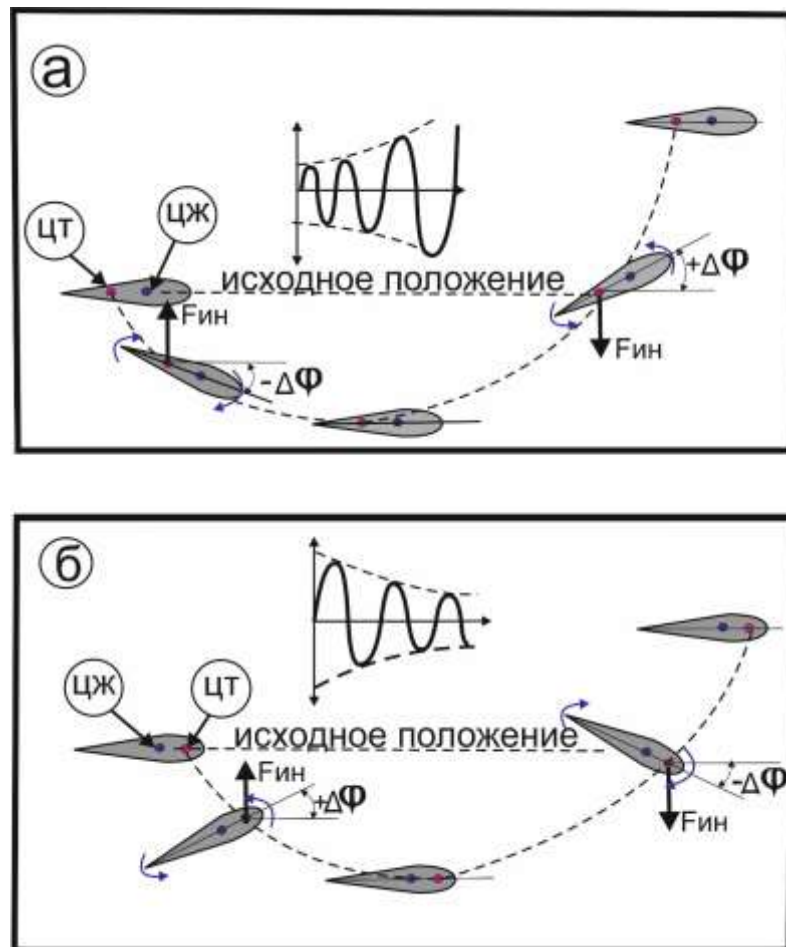


Рисунок 1. Фізична сутність флаттера лопатей несучого гвинта.

### Дії пілота:

Дії пілота повинні бути спрямовані на зменшення енергії коливання, т. Е. На зменшення швидкості потоку повітря, що набігає на лопать:

- за допомогою корекції зменшити частоту обертання НВ до мінімального значення;
- зменшити швидкість польоту на 30-40 км / ч.

**попередження:** Якщо спочатку зменшувати швидкість польоту, то при відхиленні конуса НВ тому може статися зіткнення лопаті випадає з конуса з хвостовій балкою.

Після припинення флатера продовжити політ до найближчого аеродрому на швидкості менше на 30-40 км / ч. в порівнянні зі швидкістю, на якій виник флатер. Якщо флатер не припинився, виконати посадку на підібрану майданчик.

### *1.3 Заходи щодо запобігання виникненню флаттера*

Флаттер в даний час добре вивчений і при конструюванні лопаті він заздалегідь попереджається конструктором. Це досягається поєднанням центру жорсткості з осьовим шарніром, застосуванням профілю симетричного або близького до симетричного (центр тиску майже не переміщується), установкою протифлаттерних важків в шкарпетці лопаті. Кожен НВ перевіряється на флатер. Сутність перевірки полягає в тому, що на задню кромку кожної лопаті закріплюють важки, які зміщують центр мас назад на 2%. Потім запускають двигун (двигуни) і доводять частоту обертання НВ на 1-2% більше, ніж обмежує керівництво з льотної експлуатації даного типу вертольота. Якщо при цих умовах флатер не виник, то в польоті він не виникне. В умовах експлуатації вертольота флатер може виникнути при наявності льоду на лопаті - зміщення центру мас назад.

## **2. Режим «вихрового кільця»**

### *2.1 Фізична сутність «вихрового кільця»*

При зниженні з працюючими двигунами з малою поступальною швидкістю і великою вертикальною швидкістю (рівній індуктивної швидкості відкидання) під НВ зустрічаються два потоки - індуктивний потік зверху і потік, що набігає знизу.

На деякій відстані від НВ утворюється поверхня розділу (рис.2), в якій ці швидкості рівні, а загальна швидкість дорівнює нулю. При збільшенні вертикальної швидкості ця поверхня розділу наближається до НВ, на якому відбуваються такі явища:

- в окоренковій частини лопаті потік знизу виявляється могутніше індуктивного потоку від НВ, він проривається через НВ, що веде до збільшення кутів атаки окоренкові елементів лопаті і зриву потоку на них;
- на кінцевих елементах лопатей через наявність крутки і великої окружної швидкості збільшення кутів атаки не велике, але при цьому посилюються вихори на кінцях лопатей;
- зрив потоку окоренкові елементів і посилення кінцевих вихорів ведуть до зменшення підйомної сили НВ і збільшення швидкості зниження;
- взаємодія лопастей з великими вихровими масами повітря призводить до значних змін кутів атаки і змін підйомної сили окремих лопатей, що призводить до безладних коливань вертольота;

- залучення в циркуляційний рух через диск гвинта великої маси повітря вимагає витрат потужності на підтримку цього руху, а маса повітря відкидається гвинтом значно зменшується. Тому підйомна сила НВ зменшується навіть при роботі двигунів на злітному режимі, що веде до подальшого збільшення вертикальної швидкості, яка росте, до тих пір поки по всьому диску НВ набігає знизу потік не стане проходити знизу вгору, а вертикальна швидкість встановиться більш 10 м/с.

## 2.2 Умови і ознаки виникнення «вихрового кільця»

Режим вихрового кільця виникає при моторному зниженні з поступальною швидкістю менше 40 км/год. і вертикальною швидкістю більше 2 м/с. Умови для виникнення «вихрового кільця» можуть виникнути, в наступних випадках:

1. При заході на посадку з попутним вітром.
2. При заході на посадку з перельотом при спробі виправити розрахунок, зменшивши поступальну швидкість і збільшивши вертикальну.
3. При вертикальному зниженні на майданчику обмежених розмірів, оточеної високими перешкодами.
4. При виході з авторотації на малій швидкості - збільшення загального кроку НВ без попереднього збільшення поступальної швидкості.

### Ознаки виникнення «вихрового кільця»:

1. Швидке мимовільне збільшення вертикальну швидкість зниження.
2. Безладні коливання вертольота по крену і курсу.
3. Посилення вібрацій.
4. Коливання частоти обертання НВ.
5. Погіршення ефективності управління.

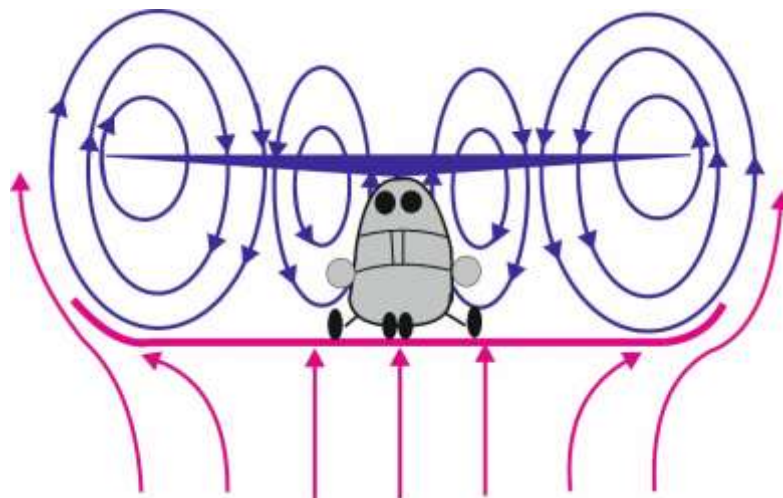


Рисунок 2. Режим «вихрового кільця»

## 2.3 Дії пілота при попаданні в режим «вихрового кільця»

При починається мимовільному зниженні необхідно спробувати зменшити вертикальну швидкість плавним збільшенням загального кроку НВ. Підйомна

сила НВ при цьому збільшується зарахунок збільшення кутів атаки лопатей. Якщо в окоренковій частині лопатей вже утворилася зона зриву потоку, то при збільшенні кроку зона зриву розшириться і вертоліт збільшить вертикальну швидкість. Якщо збільшенням кроку не вдалося зменшити вертикальну швидкість, то необхідно збільшити поступальну швидкість більш 40 км / год, щоб виключити зустріч індуктивного і набігаючого потоків, і після досягнення швидкості понад 40 км / год. збільшенням кроку припинити зниження вертольота.

Заходи щодо запобігання потрапляння в режим «вихрового кільця»:

1. Дотримуйтесь обмежень щодо мінімальної горизонтальної і максимальної вертикальної швидкості польоту.
2. Уникати посадки з попутним вітром.
3. Посадку з перельотом виправляти відходом на друге коло.
4. Пам'ятати, що найбільша ймовірність попадання в режим «вихрового кільця» при польотній масі вертольота близькій до максимальної, при польоті на великій висоті і при високій температурі повітря.

### **3. Перевищення максимально допустимої швидкості польоту**

*3.1 Фізичні явища, що відбуваються при перевищенні максимально допустимої швидкості польоту*

При перевищенні максимально допустимої швидкості польоту на НВ з'являються критичні зони (рис. 3).

Зона 1 це зона де швидкість обтікання кінцевих перетинів лопатей в азимут 90° досягає швидкості звуку і виникає хвильовий опір лопатей, що призводить до збільшення опору обертанню НВ і появі тряски.

Зона 2 - це зона в якій, в результаті складання окружної швидкості обтікання лопаті і швидкості польоту в окоренковій частині лопатей в азимут в 270° спостерігається обтікання профілю з хвостової частини. Утворюється зона зворотного обтікання, що суттєво знижує підйомну силу НВ.

Зона 3 - це зона, в якій через махових рухів лопатей в азимут 270° на кінцевих елементах відбувається зрив потоку і тряска.

#### *3.2 Фізична сутність зриву потоку*

В азимуті 270° відступаючі лопаті махають вниз і з'являється додатковий потік повітря знизу  $V_{взм}$ , крім того, ефективна швидкість потоку при обтіканні елемента лопаті зменшується:

$$V_{ef} = \omega \cdot r - V_{пол};$$



Ці два явища призводять до збільшення кута атаки лопаті в азимут  $270^\circ$ , на кінцевих елементах він може перевищити критичне значення і з'явиться зрив потоку.

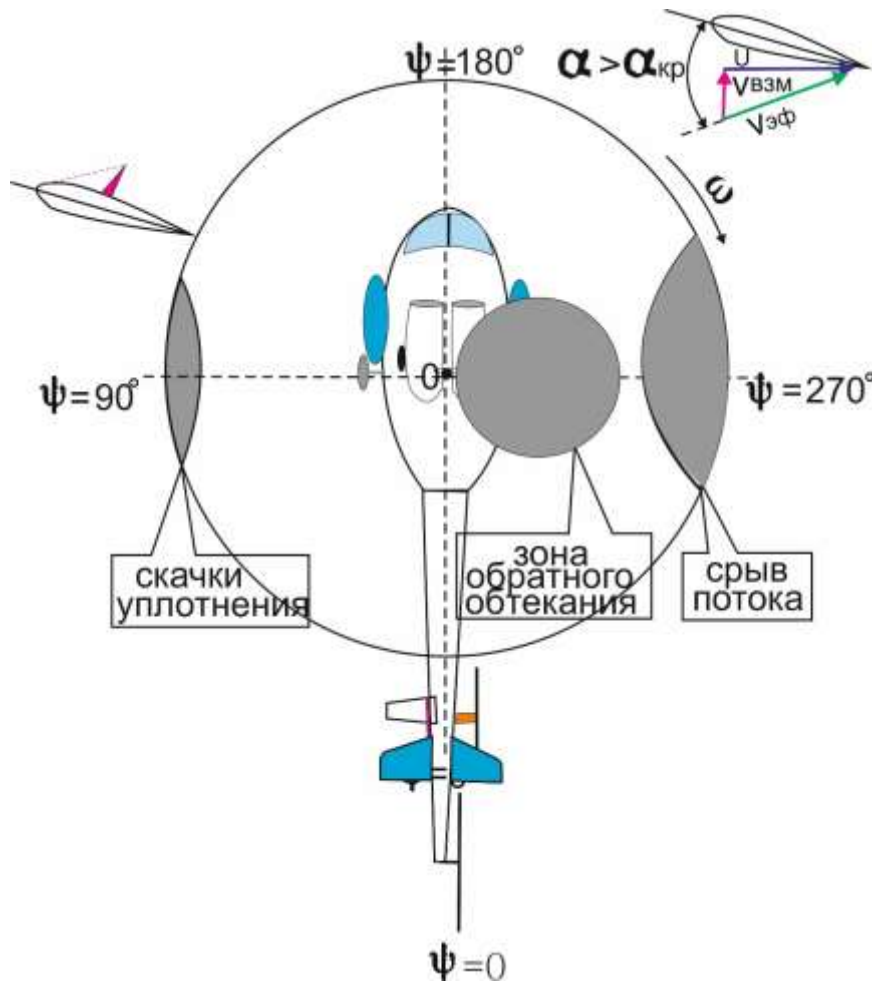


Рисунок 3. Перевищення максимально допустимої швидкості польоту.

### 3.2 Умови і ознаки виникнення зриву потоку

Зрив потоку відбувається при перевищенні максимально-дозволеної швидкості польоту, його появі сприяють:

- велика висота (зменшується щільність повітря, посилюються махові руху лопатей, для польоту потрібно збільшити крок НВ);
- велика польотна маса (потрібна велика потужність, великі настановні кути лопатей);
- зменшення частоти обертання НВ (посилюються махові руху лопатей, зменшується ефективна швидкість обтікання лопатей в азимут  $270^\circ$ ).

#### Ознаки виникнення зриву потоку

1. Тряска вертольота.
2. Крен вертольота вправо і кабрування.
3. Погіршення керованості.

4. При подальшому розвитку зриву потоку - посилення розкачки, повна втрата керованості.

### 3.4 Дії пілота при виникненні зриву потоку

Дії пілота повинні бути спрямовані на зменшення махових рухів лопатей, на зменшення кутів атаки:

- плавно зменшити установчі кути лопатей, незначно опустивши важіль «крок-газ»;
- зменшити швидкість польоту взяттям РЦШ «до себе».

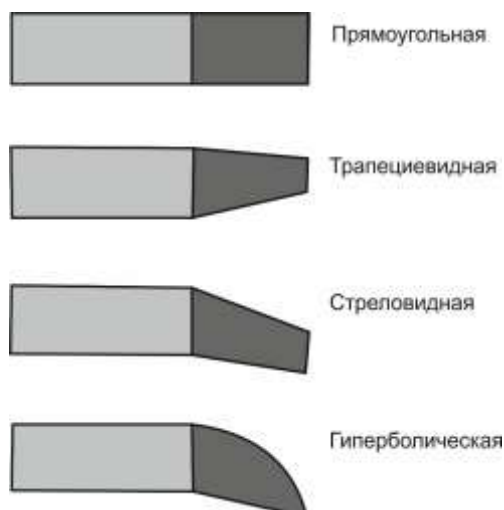
### Конструктивні заходи щодо запобігання появи стрибків ущільнення на лопаті в азимут $90^\circ$

Для збільшення швидкості польоту сучасних вертольотів і усунення шкідливих наслідків від хвильового опору на наступаючої лопаті НВ, застосовуються різні види конструктивних рішень:

- застосування надзвукових профілів на кінцевих перетинах лопаті НВ, що мають велике значення критичного числа Маха;
- використання аеродинамічних профілів змінної відносної товщини по довжині лопаті (аеродинамічне сукання);
- установка на лопатях НВ законцовок різної геометричної форми в плані.

Дослідження показали, що закінцівках прямокутної форми має найбільший опір, трапецієвидна - має менший опір завдяки звуженню і подовженню законцовки, стріловидна має ще менший опір завдяки звуженню і стрілоподібності, найменший опір має гіперболічна закінцівка (рис.4).

При установці стрілоподібної і гіперболічної законцовок істотно збільшується швидкість обтікання лопаті повітрям ( $M_{кр}$ ), на якій з'являються стрибки ущільнення. При установці законцовок прямокутної і трапецієподібної  $M_{кр} = 0,75$ , а при установці стрілоподібної і гіперболічної  $M_{кр} = 0,85$ .



#### *Рисунок 4. Форми законцовок в плані.*

Застосування стреловидних і гіперболічних форм законцовок на лопатях НВ дозволяє зменшити потрібну потужність для обертання НВ, збільшити швидкість польоту або збільшити кутову швидкість обертання НВ - зменшиться зона зворотного обтікання і збільшиться підйомна сила НВ.

### **4. Перетяжеління НВ**

#### *4.1 Фізична сутність перетяжеленої НВ*

Для того щоб НВ обертався з постійною частотою, що підводиться до нього потужність повинна дорівнювати потрібній потужності. При збільшенні настановних кутів лопатей, завдяки конструкції важеля «крок-газ» збільшується і підводиться до НВ потужність. В результаті, при переміщенні важеля «крок-газ» вгору збільшується підйомна сила НВ.

Можливі випадки, коли при переміщенні важеля «крок-газ» вгору до НВ буде підводитися потужність менша потрібної, частота обертання НВ і підйомна сила НВ будуть зменшуватися - відбувається перетяжеленої НВ.

Можливі два варіанти перетяжеленої:

1. Важіль «крок-газ» піднімається вгору швидше, ніж зростає потужність двигунів (зростання потужності відстає через недостатню приємності, особливо у газотрубних двигунів).
2. Важіль «крок-газ» піднімається в нормальному темпі, але вище злітної режиму - потужності злітної режиму двигунів недостатньо, щоб зберегти частоту обертання НВ при великих настановних кутах лопатей.

#### *4.2 Умови і ознаки виникнення перетяжеління НВ*

Перетяжеленої найбільш ймовірно при польотної масі вертольота більше максимально допустимої для даних умов, при зльоті та посадці на високогірну майданчик, при високій температурі повітря (зменшується потужність двигунів). Найчастіше перетяжеленої відбувається в наступних випадках:

1. При зльоті важіль «крок-газ» піднімається з швидким темпом. За рахунок використання кінетичної енергії НВ вертоліт може відірватися від землі і набрати певну висоту, але зависання не відбудеться і вертоліт знизиться з грубим приземленням.
2. При зльоті з вертолітному з розгоном швидкості в зоні впливу «повітряної подушки». При відсутності запасу потужності на висині, пілот відхиляє РЦШ «від себе» для розгону швидкості, вертоліт знижується, режим двигунів злітна і щоб уникнути удару об землю, пілот тягне важіль «крок-газ» вгору вище злітної режиму, НВ перетяжеляється, зменшується частота обертання НВ і вертоліт грубо вдаряється об землю, часто з перекиданням.
3. При зльоті з вертолітному з розгоном швидкості в зоні впливу «повітряної подушки» в бік перешкод. Після перекладу вертольота в набір висоти на

злітному режимі двигунів пілот бачить, що траєкторія набору пройде нижче висоти перешкоди і щоб уникнути зіткнення з перешкодою він тягне важіль «крок-газ» вгору, на якийсь час збільшується вертикальна швидкість, але потім частота обертання НВ зменшується і вертолiт грубо приземляється або падає на перешкоду.

4. На передпосадковій прямій. Пілот пізно почав гасити швидкість, посадка вийде з перельотом і щоб виправити помилку він зменшує поступальну швидкість (РЦШ «до себе») і збільшує вертикальну (важіль «крок-газ» вниз). Перед приземленням пілот, щоб погасити велику вертикальну швидкість, піднімає важіль «крок-газ» до положення злітної режиму, але вертолiт продовжує знижуватися з великою вертикальною швидкістю (велика інерція, недостатня прийомистість двигунів) і щоб уникнути удару об землю пілот тягне важіль «крок-газ» вгору перетяжелена НВ, груба посадка, можлива поломка вертольота.
5. При заході на посадку на майданчик обмежених розмірів. Пілот не врахував, що на майданчику висока температура і немає вітру. Вертолiт при зависанні, після переходу з косою обдування на осьову, різко знижується. Пілот піднімає важіль «крок-газ» до злітної режиму, вертолiт продовжує знижуватися і щоб уникнути удару об землю пілот тягне важіль «крок-газ» вгору, перетяжеляє НВ, груба посадка, можлива поломка вертольота.
6. При заході на посадку на майданчик обмежену високими перешкодами, при наявності вітру над перешкодами, вертолiт без труднощів зависає (висіння в умовах режиму косого обтікання НВ). При вертикальному зниженні, після заходу в тінь перешкод вітер зникає - зсув вітру, НВ переходить в режим осьового обтікання, подёмная сила НВ зменшується і вертолiт мимовільно збільшує вертикальну швидкість зниження. Пілот, щоб уникнути грубого приземлення енергійно піднімає важіль «крок-газ», перетяжеляє НВ і вертолiт грубо приземляється, можлива поломка вертольота.
7. При виконанні підльоту на малій висоті з великою швидкістю (НВ працює в косому потоці). Перед місцем приземлення пілот гасить поступальну швидкість (РЦШ «до себе»), збільшується кут атаки НВ, вертолiт набирає висоту і збільшує частоту обертання НВ. Пілот, витримуючи задану висоту, опускає важіль «крок-газ» вниз, автоматика, прагнучи зберегти постійну частоту обертання НВ, зменшує потужність двигунів). В цей час вертолiт переходить з косою обдування на осьову і починає різко знижуватися. Пілот щоб уникнути зіткнення із землею піднімає важіль «крок газ» швидше, ніж збільшується потужність двигунів, а вертолiт продовжує знижуватися, і щоб уникнути удару об землю, пілот ще більше піднімає важіль «крок-газ», перетяжеляє НВ, груба посадка, можливо перекидання вертольота.

### **Ознаки перетяжеління НВ**

При перетяжеленной НВ зменшується частота обертання НВ до значення нижче мінімально - допустимого і відбувається мимовільне зниження вертольота.

Перетяжеління може супроводжуватися:

1. Погіршенням керованості і зменшенням запасів управління. Через зменшення частоти обертання НВ і рульового гвинта права педаль може виявитися на упорі, так як при перетяжеленной збільшується реактивний момент НВ, а тяга РВ зменшується.
2. На вертольоті з газотурбінними двигунами. Збільшенням температури газів перед турбінами двигунів і зменшенням їх потужності - падає частота обертання НВ нижче мінімальної, можливий зрив потоку з лопаток вільної турбіни.
3. Виникненням на НВ режиму «вихрового кільця». Якщо перетяжеленной відбулося на малій швидкості, а вертикальна швидкість зниження перевищує допустиму.

#### *4.3 Дії пілота при перетяжеленной НВ*

При перетяжеління НВ необхідно, для відновлення частоти обертання НВ, незначно зменшити загальний крок НВ і в подальшому збільшення кроку НВ здійснювати з темпом відповідним темпу збільшення потужності двигунів.

#### **Заходи запобігання перетяжеленной НВ**

Щоб уникнути перетяжеленной НВ необхідно:

1. Важіль «крок-газ» пересувати плавно, пропорційно збільшенню потужності двигунів.
2. При досягненні злітної режиму роботи двигунів припинити збільшення кроку НВ.
3. Перед кожним злетом розраховувати максимально допустиму масу вертольота для зльоту і посадки в даних умовах.
4. Чи не переводити вертоліт в розгін швидкості, якщо на висінні немає запасу потужності.
5. Уникати зльоту в сторону перешкод.
6. При виконанні польоту на незнайому майданчик першу посадку розраховувати для умов: без використання впливу «повітряної подушки» при штилі.
7. При заході на посадку з перельотом виправляти помилку відходом на друге коло.