

УДК 629.735.07

## СХЕМА РАСЧЕТНЫХ СЛУЧАЕВ ДЛЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ДИНАМИКИ ВЕРТОЛЕТА С ГРУЗОМ НА ВНЕШНЕЙ ПОДВЕСКЕ НА ЭТАПАХ ВЗЛЕТА И ПОСАДКИ

**В.В. ЕФИМОВ<sup>1</sup>, А. ЭЛЬСЕИДАБДО<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Московский государственный технический университет гражданской авиации, г. Москва, Россия

При выполнении вертолетами воздушных перевозок и авиационных работ с использованием внешней подвески возможно возникновение особых ситуаций, которые являются результатом воздействия неблагоприятных факторов. Наиболее сложными и опасными этапами полета являются этапы взлета и посадки.

Для исследования динамики полета любого летательного аппарата на предельных режимах полета, в том числе вертолета с грузом на внешней подвеске, наиболее рационально использовать теоретические методы, а именно математическое моделирование, достоинство которого состоит в относительной дешевизне, возможности моделировать особые ситуации вплоть до катастрофических, а также в возможности задавать необходимые внешние воздействия.

При проведении теоретических исследований нецелесообразно и невозможно смоделировать все особые ситуации, которые могут возникнуть на рассматриваемых этапах полета. В связи с этим на начальном этапе исследований необходимо решить задачу составления перечня наиболее характерных особых ситуаций – схемы расчетных случаев. Этой проблеме и посвящена настоящая статья.

В статье рассмотрены характерные ошибки пилотирования вертолета с грузом на внешней подвеске на этапах взлета и посадки, а также наиболее опасные отказы техники и нерасчетные условия эксплуатации, на основе анализа которых была создана схема расчетных случаев. Проведя моделирование в соответствии с данной схемой расчетных случаев, можно будет определить влияние параметров груза, параметров полета, воздействия неблагоприятных факторов на динамику системы «вертолет – груз на внешней подвеске» на взлете и посадке, что в свою очередь позволит определить границы безопасной эксплуатации данной системы на этих этапах полета и сформулировать рекомендации для экипажа по предотвращению особых ситуаций или по выходу из них.

Для дальнейших исследований предполагается использовать разработанный ранее программный комплекс HeliCargo, который позволяет моделировать динамику вертолета с грузом на внешней подвеске.

**Ключевые слова:** вертолет, груз на внешней подвеске, особые ситуации, взлет, посадка.

### ВВЕДЕНИЕ

При выполнении вертолетами воздушных перевозок и авиационных работ с использованием внешней подвески (ВП), как и при эксплуатации любой другой авиационной техники, возможно возникновение особых ситуаций, которые являются результатом воздействия неблагоприятных факторов (ошибок экипажа или наземного персонала, отказов техники и попадания в нерасчетные условия эксплуатации) [1].

Для обеспечения высокого уровня безопасности полетов требуется всесторонне изучать все влияющие на нее факторы и их возможные сочетания и вырабатывать научно обоснованные рекомендации для экипажа по недопущению возникновения и неблагоприятного развития особых ситуаций, что соответствует современной концепции ИКАО (ICAO) по управлению безопасностью полетов [2].

Наиболее сложными и опасными этапами полета являются этапы взлета и посадки. Вопросы математического моделирования динамики системы «вертолет – груз на ВП» на данных этапах полета посвящена настоящая статья.

### МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования динамики полета любого летательного аппарата на предельных режимах полета, в том числе системы «вертолет – груз на ВП», наиболее рационально использовать

теоретические методы, а именно математическое моделирование. Достоинство теоретических методов состоит в их относительной дешевизне, возможности моделировать особые ситуации вплоть до катастрофических, а также в возможности задавать необходимые внешние воздействия.

Данные методы с успехом использовались ранее одним из авторов настоящей статьи для исследования динамики полета вертолета с грузом на внешней подвеске в горизонтальном полете [3–10].

## ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для обеспечения безопасности и повышения эффективности выполнения полетов вертолетов с грузом на внешней подвеске необходимо заранее предоставить экипажу информацию об особенностях динамики вертолета и груза на его внешней подвеске, в том числе на этапах взлета и посадки, в зависимости от свойств груза и ВП в целом, которая практически отсутствует в Руководствах по летной эксплуатации (РЛЭ).

При этом нецелесообразно, да и невозможно, смоделировать все особые ситуации, которые могут возникнуть на рассматриваемых этапах полета. В связи с этим на начальном этапе исследований необходимо решить задачу составления перечня наиболее характерных особых ситуаций (схемы расчетных случаев).

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Выполнение вертолетами воздушных перевозок и авиационных работ с применением ВП сопряжено с повышенной опасностью. Наличие груза на ВП объективно является дополнительным источником особых ситуаций. Сами операции, производимые с грузом (подъем, транспортировка, укладка, монтаж – при проведении авиационных строительно-монтажных работ (АСМР)), требуют специальной подготовки экипажа. В особенности это касается наиболее сложных и опасных этапов полета – взлета и посадки (монтажа груза при АСМР). Сложность и опасность этих этапов обусловлена близостью поверхности земли или воды (или монтажного стыка) и, как следствие, высокой вероятностью непреднамеренного касания ее грузом при маневрировании на малой высоте полета из-за ошибок пилотирования или воздействия атмосферной турбулентности. Кроме того, опасность рассматриваемых этапов связана с тем, что вертолет с грузом на ВП неминуемо попадает в зону опасных сочетаний высоты  $H$  и приборной скорости полета  $V_{пр}$  (зона «А» на рисунке, [11]), границы которой определяются возможностью вертолета совершить безопасную посадку с одним отказавшим двигателем.

Наиболее характерными ошибками пилотирования на этапах взлета и посадки по данным работы [12] являются:

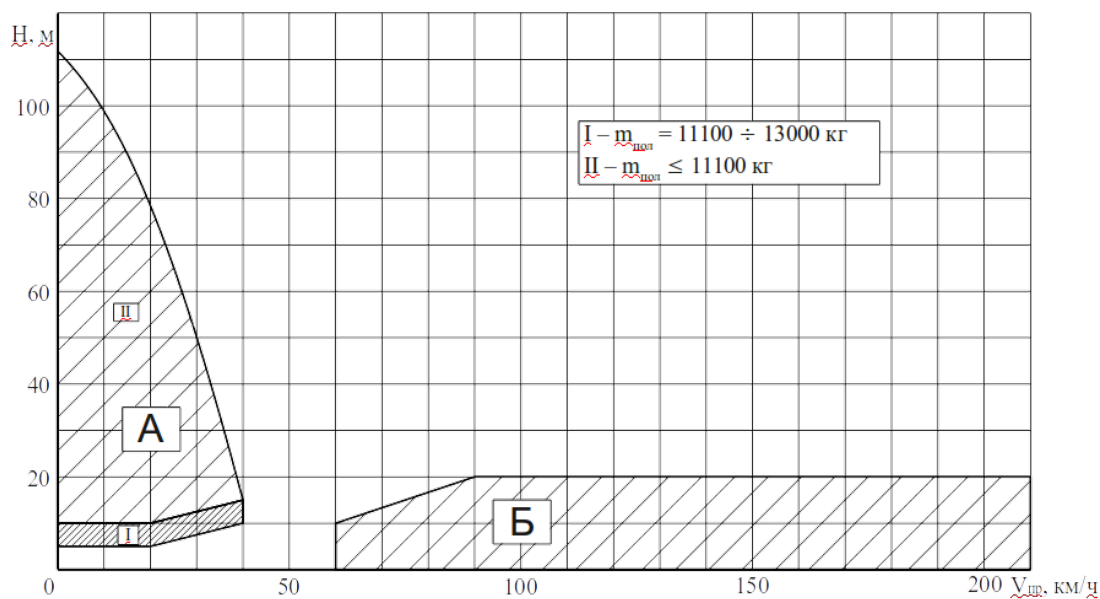
1) на этапе вертикального подъема:

– невыполнение условия вертикального положения центрального троса ВП при отделении груза от земли, что приводит к возникновению маятниковых продольно-поперечных колебаний груза, его вращению в полете, а также к изменению углов тангажа и крена вертолета на висении;

– резкие, несоразмерные перемещения рычагов управления в процессе отделения груза от земли (воды), которые приводят к динамическому нагружению конструкции, перетяжелению несущего винта (НВ), что вызывает уменьшение частоты его вращения и тяги, возможное самопроизвольное снижение вертолета, и, как следствие, к столкновению его с землей или грузом;

– утрата экипажем визуального контакта с землей или грузом в условиях снежного (пыльного) вихря, что ведет к потере контроля над пространственным положением вертолета и груза, а в соответствии с РЛЭ любого вертолета это требует аварийного сброса груза;

– ошибки в определении силы и направления ветра ввиду резкого их изменения;



2) на этапе разгона и набора высоты:

- перевод вертолета с режима висения в поступательное движение (разгон) без учета просадки вертолета, что не исключает возможности задевания грузом о землю (воду);
- резкие, несоразмерные действия рычагами управления и выполнение разворотов с превышением указанных в РЛЭ предельно допустимых значений углов крена и тангажа вертолета, что приводит к возникновению продольно-поперечных колебаний груза на ВП;

3) на этапе снижения перед укладкой (монтажом) груза:

- снижение вертолета с большими положительными значениями угла тангажа, ухудшающими пилоту обзор зоны укладки (монтажа) груза;
- снижение вертолета с темпом больше необходимого, что приводит к недолету (перелету) вертолета до места укладки груза (монтажного стыка) или соударению груза с поверхностью посадочной площадки (монтажным стыком);

4) на этапе укладки (монтажа) груза:

- отклонение от заданной высоты висения вертолета над точкой укладки (монтажа) груза, например, из-за неправильного определения высоты полета в условиях отсутствия корректной информации от радиовысотомера, антенны которого затеняются грузом;
- ошибки в определении силы и направления ветра ввиду резкого их изменения;
- несоответствие между величиной отклонения груза на ВП при висении вертолета над местом его установки и действиями пилота на рычаги управления для исправления возникающих отклонений;
- потеря экипажем пространственной ориентации над посадочной площадкой (монтажным стыком) при внезапном попадании в условия снежного (пыльного) вихря.

Наиболее опасным и распространенным отказом техники на рассматриваемых этапах полета являются отказы двигателей. Возможны отказы системы управления, воздушных винтов, функциональных систем, а также отказы систем ВП (отказы замков подвески, обрыв тросов и др.).

К нерасчетным условиям эксплуатации на взлете и посадке можно отнести повышенную атмосферную турбулентность, резкое ухудшение метеоусловий, обледенение вертолета и груза на ВП, воздействие града и грозы.

Анализ вышеупомянутых неблагоприятных факторов позволяет предложить в первом приближении следующую схему расчетных случаев:

1) на этапе вертикального подъема и висения:

- отклонение центрального троса ВП от вертикали при отделении груза от земли (с целью определения максимально допустимого отклонения при заданных параметрах груза);
- ветровые воздействия (с целью определения предельных скоростей ветра различного направления при заданных параметрах груза);
- отказ одного двигателя (с целью исследования возможности посадки вертолета без сброса груза, который может относиться к категории особо важных грузов, имеющих высокую материальную, социальную или иную ценность);
- 2) на этапе разгона и набора высоты:
  - перевод вертолета с режима висения в поступательное движение при наличии ветровых воздействий (с целью определения просадки вертолета в зависимости от параметров груза и воздействия ветра);
  - отказ одного двигателя (с целью исследования возможности аварийной посадки вертолета без сброса груза);
- 3) на этапе снижения перед укладкой (монтажом) груза:
  - снижение вертолета при наличии ветровых воздействий (с целью определения предельно допустимого темпа снижения при наличии ветра различной скорости и направления);
  - отказ одного двигателя (с целью исследования возможности аварийной посадки вертолета без сброса груза);
- 4) на этапе укладки (монтажа) груза:
  - ветровые воздействия (с целью определения предельных скоростей ветра различного направления при заданных параметрах груза);
  - отказ одного двигателя (с целью исследования возможности посадки вертолета без сброса груза).

## ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведя моделирование описанной выше схемы расчетных случаев, можно будет определить влияние параметров груза, параметров полета, воздействия неблагоприятных факторов на динамику системы «вертолет – груз на ВП» на взлете и посадке, что в свою очередь позволит определить границы безопасной эксплуатации данной системы на этих этапах полета и сформулировать рекомендации для экипажа по предотвращению особых ситуаций или по выходу из них.

При проведении в дальнейшем вычислительных экспериментов предполагается использовать программный комплекс HeliCargo [9], разработанный одним из авторов настоящей статьи и позволяющий моделировать динамику вертолета с грузом на внешней подвеске.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ефимов В.В.** Особенности обеспечения безопасности эксплуатации вертолетов с грузом на внешней подвеске // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 151. С. 124–129.
2. Doc 9859. Руководство по управлению безопасностью полетов (РУБП) // ИКАО. 2013. 300 с.
3. **Ефимов В.В., Паршенцев С.А.** Результаты вычислительных экспериментов по исследованию динамики вертолета и груза на его внешней тросовой подвеске при полете в неспокойном воздухе // Научный Вестник МГТУ ГА. 2008. № 125. С. 151–158.
4. **Ефимов В.В.** Исследование влияния параметров груза на условия его равновесия на внешней подвеске вертолета // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 151. С. 130–137.
5. **Ефимов В.В.** О влиянии груза на внешней подвеске вертолета на его равновесие // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 154. С. 79–85.

**6. Ефимов В.В., Ивчин В.А.** Исследование влияния параметров груза на внешней подвеске на балансировочные характеристики вертолета // Научный Вестник МГТУ ГА. 2010. № 154. С. 86–93.

**7. Ефимов В.В.** Динамическая устойчивость груза на тросовой внешней подвеске вертолета // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». М. Машиностроение / Машиностроение Полет. 2011. № 3. С. 26–32.

**8. Ефимов В.В.** Автоколебания грузов на тросовой внешней подвеске вертолета // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». 2011. № 12. С. 23–28.

**9. Ефимов В.В.** Исследование автоколебаний вертолета с грузом на внешней тросовой подвеске // Научный Вестник МГТУ ГА. 2012. № 177. С. 65–71.

**10. Ефимов В.В., Ивчин В.А.** Результаты математического моделирования динамики вертолета после сброса груза с его внешней подвески // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 223. С. 101–108.

**11.** Руководство по летной эксплуатации вертолета Ми-8МТВ: введено в действие отделом летной эксплуатации Департамента воздушного транспорта Министерства транспорта Российской Федерации 14 мая 1994 г. С. 7.11.4.

**12. Козловский В.Б., Паршенцев С.А., Ефимов В.В.** Вертолет с грузом на внешней подвеске. М.: Машиностроение / Машиностроение – Полет, 2008. 304 с.

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

**Ефимов Вадим Викторович**, доктор технических наук, доцент, профессор МГТУ ГА, akpla@yandex.ru.

**Эльсеидабдо Ахмед**, соискатель МГТУ ГА, akpla@yandex.ru.

### THE SCHEME OF SIMULATION CASES FOR MATHEMATICAL MODELING OF HELICOPTER DYNAMICS WITH THE CARGO ON THE EXTERNAL SLING AT TAKEOFF AND LANDING PHASES

**Vadim V. Efimov<sup>1</sup>, Ahmed Elsaidabdo<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

#### ABSTRACT

When a helicopter performs an air operation and aerial work using external sling there may occur special situations, as the result of unfavourable conditions impact. The most difficult and dangerous stages of flight are the takeoff and landing.

To study an aircraft flight dynamics in extreme flight conditions, including a helicopter with cargo on external sling, the most effective is to use the theoretical methods, mathematical modeling in particular, which is relatively cheap, able to model the abnormal situation including disasters, and able to set the necessary environmental effect.

During the theoretical studies it is impractical and impossible to simulate all the abnormal situations that may occur at the given phases of flight. Therefore, at the initial stage of the research it is necessary to deal with making up a list of the most typical abnormal situations - the scheme of simulation cases. This issue is the subject of this article.

The article describes the typical errors of piloting a helicopter with cargo on external sling at takeoff and landing, as well as the most dangerous equipment failures and noncalculated operating conditions, based on the analysis of which the scheme of simulation cases has been made. After modeling in accordance with the scheme of simulation cases, it will be possible to determine the effect of the cargo parameters, flight parameters, the impact of unfavourable factors on the dynamics of the system "helicopter - cargo on external sling" at takeoff and landing, which therefore will determine the boundaries of the system safe operation on these phases of flight, and to formulate recommendations for the crew to prevent abnormal situations or to get out of them.

For further research it is expected to use the earlier developed HeliCargo software application, which allows to simulate the dynamics of helicopter with cargo on external sling.

**Key words:** helicopter, external sling, special situations, takeoff, landing.

## REFERENCES

1. **Efimov V.V.** *Osobennosti obespechenija bezopasnosti jekspluatacii vertoletov s gruzom na vneshnej podveske* [Features of Providing of Helicopters Exploitation Safety with Cargo on External Sling]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2010, no. 151, pp. 124–129. (in Russian)
2. Doc 9859. Safety Management Manual (SMM). ICAO. 2013. 251 p.
3. **Efimov V.V., Parshentsev S.A.** *Rezultaty vychislitel'nyh jeksperimentov po issledovaniju dinamiki vertoleta i gruz na ego vneshnej trosovoj podveske pri polete v nespokoynom vozduhe* [The Results of the Mathematical Flight Simulation of the Helicopter with the Cargo on the External Sling]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2008, no. 125, pp. 151–158. (in Russian)
4. **Efimov V.V.** *Issledovanie vlijaniya parametrov gruz na uslovija ego ravnovesija na vneshnej podveske vertoleta* [Research of Influence of Cargo Parameters on Conditions of its Balance on the Helicopter External Sling]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2010, no. 151, pp. 130–137. (in Russian)
5. **Efimov V.V.** *O vlijanii gruz na vneshnej podveske vertoleta na ego ravnovesie* [Effect of Cargo on External Sling Helicopter on its Equilibrium]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2010, no. 154, pp. 79–85. (in Russian)
6. **Efimov V.V., Ivchin V.A.** *Issledovanie vlijaniya parametrov gruz na vneshnej podveske na balansirovochnye karakteristiki vertoleta* [Investigation of the Influence of Parameters Cargo on External Sling on the Balancing Data Helicopter] *Nauchnyi vestnik MGTU GA*. [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2010, no. 154, pp. 86–93. (in Russian)
7. **Efimov V.V.** *Dinamicheskaja ustojchivost' gruz na trosovoj vneshnej podveske vertoleta* [Investigation of the Dynamic Stability of Cargo on the Helicopter External Sling]. *Obshherossijskij nauchno-tehnicheskij zhurnal "Polet"* [POLYOT All-Russian Scientific-Technical Journal], 2011, no. 3, pp. 26–32. (in Russian)
8. **Efimov V.V.** *Avtokolebanija gruzov na trosovoj vneshnej podveske vertoleta* [Autooscillations of Cargo on the Helicopter External Sling]. *Obshherossijskij nauchno-tehnicheskij zhurnal "Polet"* [POLYOT All-Russian Scientific-Technical Journal], 2011, no. 12, pp. 23–28. (in Russian)
9. **Efimov V.V.** *Issledovanie avtokolebanij vertoleta s gruzom na vneshnej trosovoj podveske* [Investigation of Self-Oscillations Helicopter with the Cargo on the External Sling]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2012, no. 177, pp. 65–71. (in Russian)
10. **Efimov V.V., Ivchin V.A.** *Rezultaty matematicheskogo modelirovanija dinamiki vertoleta posle sbrosa gruz s ego vneshnej podveski* [The Results of Helicopter Dynamics Mathematical Modeling After Discharge of Cargo with its External Sling]. *Nauchnyi Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2016, no. 223, pp. 101–108. (in Russian)
11. *Rukovodstvo po letnoj jekspluatacii vertoleta Mi-8MTV: vvedeno v dejstvie otdelom letnoj jekspluatacii Departamenta vozdušnogo transporta Ministerstva transporta Rossijskoj Federacii 14 maja 1994 g.* [Flight Crew Operations Manual Mi-8MTV: enacted with Flight Operations Department of Air Transport Department of the Russian Federation Transport Ministry of May 14, 1994], p. 7.11.4. (in Russian)
12. **Kozlovsky V.B., Parshentsev S.A., Efimov V.V.** *Vertolet s gruzom na vneshnej podveske* [Helicopter with Cargo on External Sling]. *Mashinostroenie / Mashinostroenie – Polet*. [Mechanical Engineering / Mechanical Engineering-Flight] Moscow. 2008. 304 p. (in Russian)

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Efimov Vadim Victorovich**, Doctor of Science, Associate Professor, Professor of Moscow State Technical University of Civil Aviation, akpla@yandex.ru.

**Ahmed Elsaidabdo**, Externa PhD Student of Moscow State Technical University of Civil Aviation, akpla@yandex.ru.