

УДК 629.735.07

DOI: 10.26467/2079-0619-2018-21-1-147-155

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ГРУЗА И ВНЕШНЕЙ ПОДВЕСКИ НА УПРАВЛЯЕМОСТЬ ВЕРТОЛЕТА

Г.Н. БАБЕНКО¹

¹*Московский государственный технический университет гражданской авиации,
г. Москва, Россия*

В рамках решения задач комплексного исследования управляемости вертолета ранее были определены причины изменения параметров управляемости вертолета при транспортировке груза на его внешней подвеске.

Следующим этапом исследования является определение влияния конкретных параметров груза и внешней подвески в целом, а также их сочетания на характеристики управляемости вертолета.

В статье представлены результаты исследования влияния параметров груза и внешней подвески в целом на статические и динамические показатели управляемости. В качестве статической характеристики управляемости рассматривалась эффективность управления, выраженная через максимальное угловое ускорение, приобретаемое вертолетом при одинаковых отклонениях рычага управления на различных скоростях полета. В качестве динамического показателя было выбрано время переходного процесса с наблюдаемым параметром – перемещением ручки циклического шага. В качестве параметров груза были рассмотрены 16 вариантов сочетаний баллистического коэффициента и массы груза, а в качестве параметра внешней подвески была выбрана длина троса в диапазоне от 10 до 40 метров.

По результатам вычислительных экспериментов были выявлены некоторые зависимости показателей управляемости от параметров груза на внешней подвеске при их различных сочетаниях. Анализ результатов показал, что для оценки влияния конкретных параметров груза на пилотажные свойства вертолета больше подходят динамические характеристики, т. к. такая оценка в наиболее полной мере может характеризовать нагрузку на летчика. Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования руководств по летной эксплуатации и литературы по обучению летного состава.

Ключевые слова: вертолет, груз на внешней подвеске, управляемость.

ВВЕДЕНИЕ

При выполнении вертолетами воздушных перевозок и авиационных работ с использованием внешней подвески (ВП) груз оказывает влияние как на равновесие и балансировку, так и на управляемость вертолета, что значительно усложняет процесс пилотирования и увеличивает нагрузку на экипаж. Это известно как из практики летной эксплуатации вертолетов с грузом на ВП, так и из теоретических исследований, посвященных данной проблеме [1–7]. На этот счет в руководстве по летной эксплуатации даны лишь некоторые рекомендации. А именно, в Руководстве по летной эксплуатации (РЛЭ) Ми-8МТВ [8] указано следующее: «Раскачивание груза, усложняющее пилотирование, уменьшается при уменьшении скорости и изменении высоты полета...», а при невозможности погасить возникшие колебания требуется произвести аварийный сброс груза. В научной литературе практически отсутствуют рекомендации пилотам по выполнению работ в условиях меняющихся характеристик управляемости, за исключением таких работ, как [3], где делаются попытки обобщить опыт летной эксплуатации вертолетов с грузом на ВП. При этом речь в данной работе идет о транспортировке грузов вообще, т. е. без учета свойств грузов, которые могут существенно различаться.

По мнению автора данной работы, необходимо учитывать изменение характеристик управляемости в зависимости от конкретных параметров груза и режимов полета, чему и посвящена настоящая статья.

Следует отметить, что причины изменения параметров управляемости вертолета при транспортировке груза на его ВП уже были определены ранее и описаны в работе [1], таким об-

разом, данная статья является следующим этапом комплексного исследования управляемости вертолета с грузом на ВП.

МЕТОДЫ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для исследования динамики полета любого летательного аппарата, особенно на предельных режимах полета, в том числе системы «вертолет – груз на ВП», наиболее рационально использовать теоретические методы, а именно математическое моделирование. В данном случае достоинство теоретических методов состоит в их относительной дешевизне, возможности моделировать особые ситуации, вплоть до катастрофических, а также в возможности задавать весь спектр параметров груза и внешней подвески.

Для проведения вычислительных экспериментов (ВЭ) в качестве инструмента исследования использовалось программное обеспечение (ПО), объединяющее в себе математическую модель (ММ) динамики вертолета Ми-8МТВ, созданную на ОАО «МВЗ им. Миля» при участии В.А. Ивчина, и ММ динамики груза на ВП – программный комплекс HeliCargo, разработанный в МГТУ ГА В.В. Ефимовым [9].

Необходимо учитывать, что любая ММ имеет ограничения и допущения, которые могут быть приемлемы для выполнения одних задач и совершенно недопустимы при решении иных задач. Поэтому перед использованием ПО, основанного на ММ, была выполнена проверка адекватности для данных задач исследования [10]. По результатам этой проверки было установлено, что математическая модель обладает достаточной непротиворечивостью результатам летных испытаний (ЛИ) во всех рассматриваемых случаях и высокой точностью в тех случаях, когда данные ЛИ позволяют точно воспроизвести начальные условия для ВЭ. Таким образом, можно считать адекватность ММ динамики вертолета с грузом на внешней подвеске в части реакции на управляющие воздействия, т. е. управляемости вертолета, удовлетворительной.

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Для обеспечения безопасности и повышения эффективности выполнения полетов вертолетов с грузом на внешней подвеске необходимо заранее предоставить экипажу информацию об изменении параметров управляемости вертолета с грузом на его внешней подвеске, в зависимости от свойств груза и ВП в целом, которая практически отсутствует в РЛЭ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рассмотрим влияние параметров груза и ВП в целом на эффективность управления, выраженную через максимальное угловое ускорение, приобретаемое вертолетом в первоначальный момент времени при ступенчатом отклонении ручки циклического шага (РЦШ). Для этого был выполнен ряд ВЭ, в которых моделировались ступенчатые отклонения РЦШ по тангажу и крену на различных скоростях полета при различных параметрах груза.

Рассмотрим влияние массы груза и скорости полета на максимальное угловое ускорение вертолета.

На графиках (рис. 1–3) видно пропорциональное увеличение максимального углового ускорения с увеличением массы груза от 1250 до 5000 кг. Это связано с увеличением потребной тяги несущего винта, вызванного необходимостью парирования силы натяжения троса [1].

Рассмотрим влияние баллистического коэффициента груза и скорости полета на характеристики управляемости вертолета.

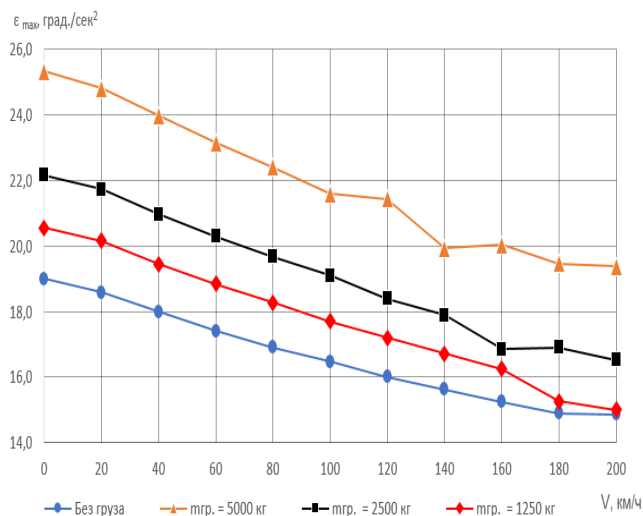


Рис. 1. Влияние массы груза и скорости полета на максимальное угловое ускорение при отклонении РЦШ на себя
Fig. 1. Influence of cargo weight and flight speed on the maximum angular acceleration when the cyclic pitch control lever is self-deflected

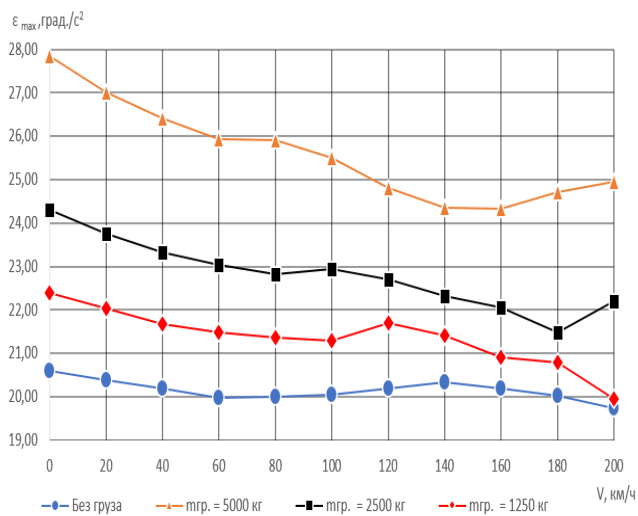


Рис. 2. Влияние массы груза и скорости полета на максимальное угловое ускорение при отклонении РЦШ от себя
Fig. 2. Influence of cargo weight and flight speed on the maximum angular acceleration when the cyclic pitch control lever is self-deflected

На рис. 4–6 представлены графики зависимости максимального углового ускорения при различных значениях баллистического коэффициента. Из графиков видно, что для грузов парусных наблюдается тенденция на увеличение максимального углового ускорения начиная со скорости 60 км/ч. Это связано в основном с увеличением потребной тяги несущего винта, вызванного необходимостью парирования аэродинамического сопротивления груза.

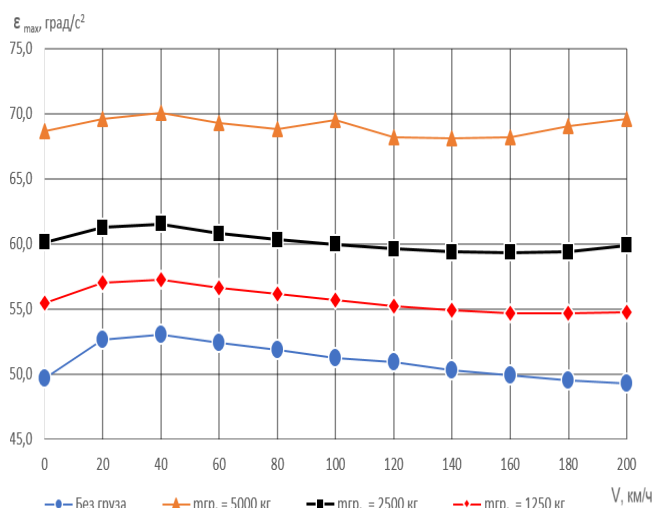


Рис. 3. Влияние массы груза и скорости полета на максимальное угловое ускорение при отклонении РЦШ влево
Fig. 3. Influence of cargo weight and flight speed on the maximum angular acceleration when the cyclic pitch control lever is deflected to the left

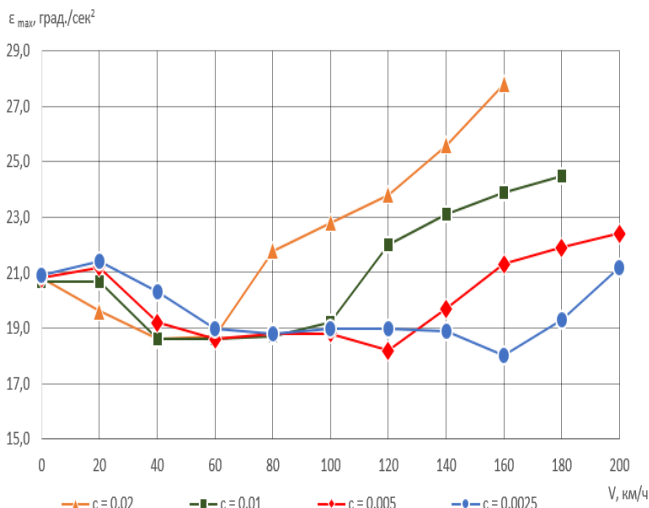


Рис. 4. Влияние баллистического коэффициента груза и скорости полета на максимальное угловое ускорение при отклонении РЦШ на себя
Fig. 4. Influence of the ballistic coefficient of cargo and flight speed on the maximum angular acceleration when the cyclic pitch control lever is self-deflected

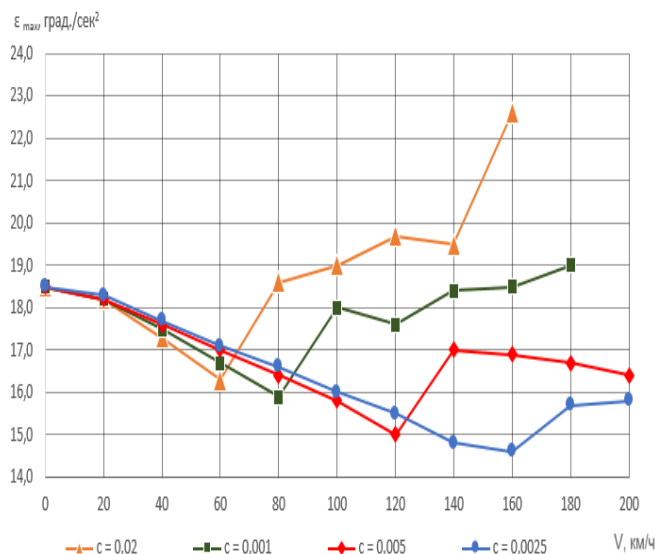


Рис. 5. Влияние баллистического коэффициента груза и скорости полета на максимальное угловое ускорение при отклонении РЦШ от себя

Fig. 5. Influence of the ballistic coefficient of cargo and flight speed on the maximum angular acceleration when the cyclic pitch control lever is self-deflected

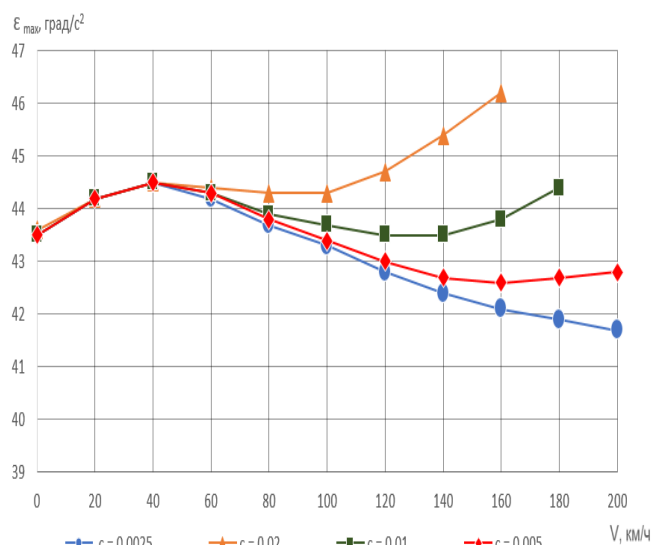


Рис. 6. Влияние баллистического коэффициента груза и скорости полета на максимальное угловое ускорение при отклонении РЦШ влево

Fig. 6. Influence of the ballistic coefficient of cargo and flight speed on the maximum angular acceleration when the cyclic pitch control lever is deflected to the left

Анализ полученных результатов говорит о том, что на эффективность управления, выраженную через максимальное угловое ускорение вертолета, оказывают влияние баллистический коэффициент груза и его масса. Причем как при увеличении баллистического коэффициента, так и при увеличении массы груза эффективность управления увеличивается. А вот длина троса на эффективность управления, выраженную через максимальное угловое ускорение вертолета, не оказывает существенного влияния, эти данные согласуются с выводами, сделанными в статье [1].

Следует отметить, что кроме статических характеристик управляемости на оценки летчиком пилотажных свойств летательного аппарата влияют динамические характеристики управляемости. Для оценки динамических характеристик управляемости обычно используются следующие показатели:

- время выхода на режим (время переходного процесса) t_b ;
- время срабатывания $t_{ср}$;
- относительный заброс параметра.

В настоящей работе в качестве основного показателя управляемости было выбрано время переходного процесса. Время переходного процесса t_b можно определить, как промежуток времени, по истечении которого отклонение наблюдаемого параметра движения будет отличаться от его конечного установившегося значения на наперед заданную величину, например, на 5 %.

В качестве наблюдаемого параметра было выбрано перемещение РЦШ, т. к. именно этот параметр в наиболее полной мере характеризует работу летчика (рис. 7).

Для определения динамических параметров груза был выполнен ряд ВЭ, в которых моделировалось 3 различных маневра:

- торможение вертолета со скорости 100 км/ч до 40 км/ч;
- разгон от 40 до 100 км/ч;
- изменение направления полета на 90 градусов (вираж) при постоянной скорости 100 км/ч (рис. 8).

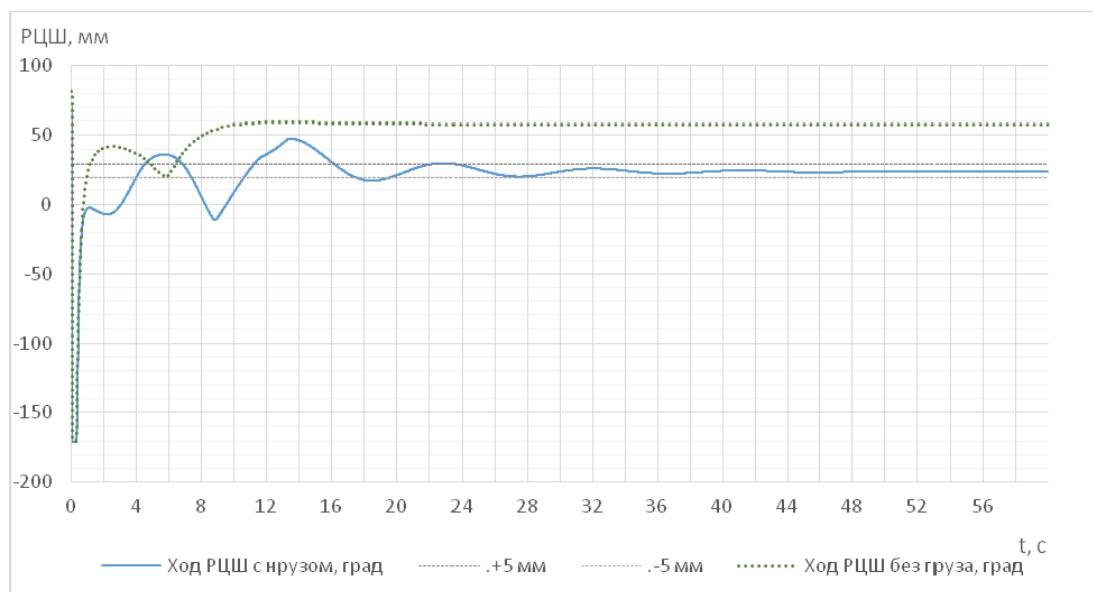


Рис. 7. Время переходного процесса, выраженное через движение РЦШ

Fig. 7. The time of the transient process expressed through the movement of the cyclic pitch control lever

Данные маневры выполнялись из полностью сбалансированного положения системы «вертолет – груз», при этом фиксировалось время выхода на режим, выраженное через движение РЦШ по каналу тангажа для разгона и торможения. Для ВЭ, моделирующих вираж, фиксировалось движение РЦШ по крену и тангажу, а также ход педалей.

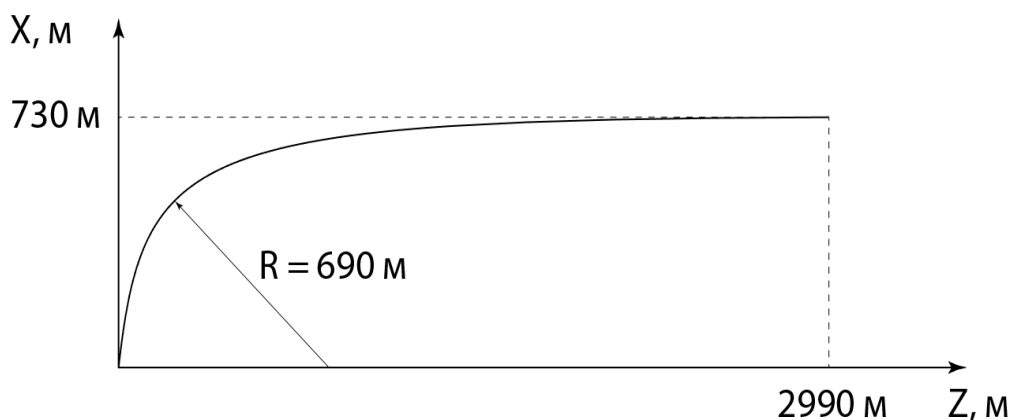


Рис. 8. Траектория полета при выполнении виража

Fig. 8. Flight trajectory during the turn

В качестве параметров груза были рассмотрены 16 вариантов сочетаний баллистического коэффициента и массы груза (табл. 1).

Таблица 1
Table 1

Баллисти- ческий коэффици- ент	Масса груза				
		600 кг	1250 кг	2500 кг	5000 кг
	0,0025	0,0025/600	0,0025/1250	0,0025/2500	0,0025/5000
	0,005	0,005/600	0,005/1250	0,005/2500	0,005/5000
	0,01	0,01/600	0,01/1250	0,01/2500	0,01/5000
	0,02	0,02/600	0,02/1250	0,02/2500	0,02/5000

В качестве параметра ВП была выбрана длина троса в диапазоне от 10 до 40 м, изменяющаяся с шагом 5 м. Каждый вариант груза был рассчитан при 7 различных вариантах длины троса. Таким образом, было выполнено 336 вычислительных экспериментов.

Анализ результатов ВЭ позволяет сделать следующие выводы.

1. Для грузов массой 1250 кг и более при выполнении маневра разгона и торможения наблюдается уменьшение времени переходного процесса с увеличением парусности груза (рис. 9).

2. Влияние длины троса на время переходного процесса проявляется при выполнении маневра разгона и торможения для грузов с баллистическим коэффициентом 0,0025 и массой от 600 до 2500 кг, а также с баллистическим коэффициентом 0,005 и массой от 600 до 1250 кг. Для таких легких, компактных грузов время переходного процесса увеличивается с увеличением длины троса (рис. 10). Следует отметить, что это согласуется с рекомендациями, указанными в РЛЭ для вертолета Eurocopter [11].

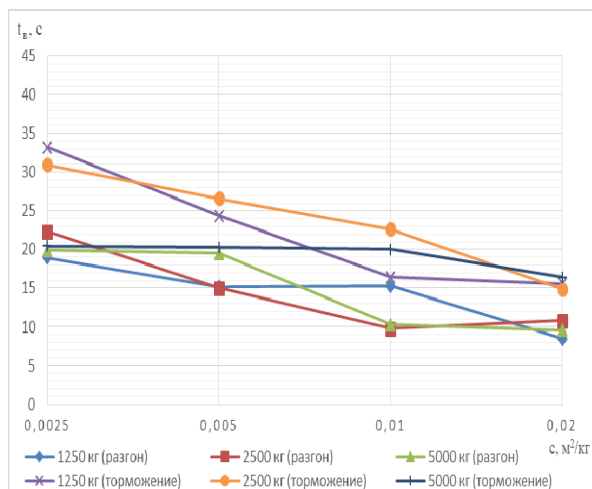


Рис. 9. Зависимость времени выхода на режим от баллистического коэффициента (длина троса 25 метров)

Fig. 9. The dependence of the start time of the transient process on the ballistic coefficient (cable length of 25 meters)

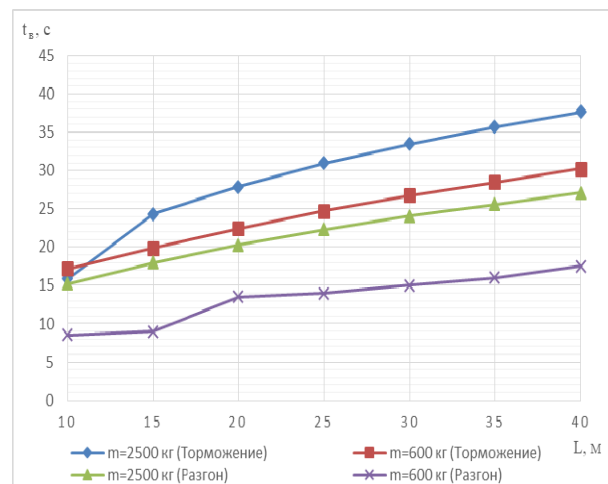


Рис. 10. Зависимость времени выхода на режим от длины троса (баллистический коэффициент $c = 0,0025$)

Fig. 10. The dependence of the start time of the transient process on the cable length (ballistic coefficient $C 0.0025$)

3. При выполнении виража время переходного процесса по каналу крена увеличивается как с увеличением парусности, так и с увеличением массы груза (рис. 11).

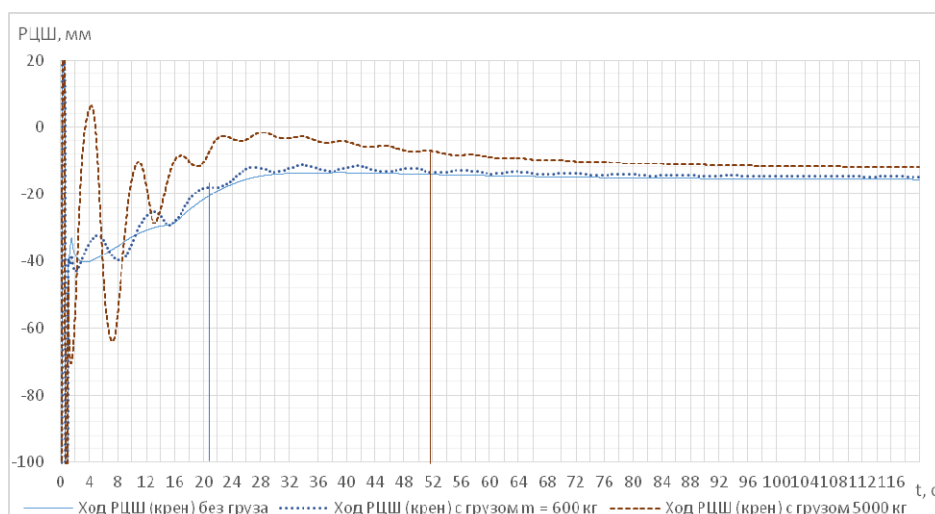


Рис. 11. Время переходного процесса, выраженное через движение РЦШ

Fig. 11. The time of the transient process expressed through the movement of the cyclic pitch control lever

4. При выполнении виража время переходного процесса по каналу рысканья практически не зависит от параметров груза и ВП.

5. При выполнении виража время переходного процесса по каналу тангажа увеличивается с увеличением массы в диапазоне баллистического коэффициента от $c = 0,0025 \text{ м}^2/\text{кг}$ до $c = 0,01 \text{ м}^2/\text{кг}$.

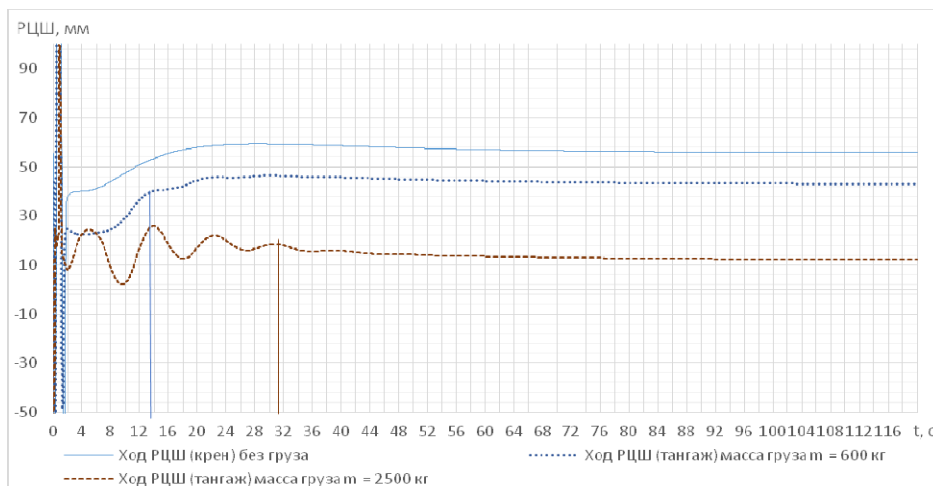


Рис. 12. Время переходного процесса, выраженное через движение РЦШ

Fig. 12. The time of the transient process expressed through the movement of the cyclic pitch control lever

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрев статические и динамические показатели управляемости, можно сделать вывод о том, что эффективность управления, выраженная через максимальное угловое ускорение, в недостаточной мере характеризует изменение управляемости вертолета и больше подходит для объяснения физики данного процесса. Для оценки влияния конкретных параметров груза на пилотажные свойства вертолета больше подходят динамические характеристики, т. к. такая оценка в наиболее полной мере может характеризовать нагрузку на летчика. Данные факты говорят о необходимости комплексного подхода при решении задач оценки изменения управляемости при транспортировке груза на ВП.

Полученные результаты могут быть использованы для совершенствования руководств по летной эксплуатации и литературы по обучению летного состава, что сыграло бы значительную роль в обеспечении безопасности полетов и повышении эффективности эксплуатации вертолетов при использовании внешней подвески.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабенко Г.Н., Ефимов В.В., Ивчин В.А. Влияние груза на внешней подвеске вертолета на его управляемость // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. Т. 19, № 6. С. 8–16.
2. Козловский В.Б., Паршенцев С.А., Ефимов В.В. Вертолет с грузом на внешней подвеске. М.: Машиностроение: Машиностроение – Полет, 2008. 304 с.
3. Лебедев А.А. Рекомендации по пилотированию вертолета и борьбе с раскачкой груза при выполнении экстренных авиационных работ с применением внешней подвески // Научный Вестник МГТУ ГА. 2013. № 188. С. 143–146.
4. Ефимов В.В. Динамическая устойчивость груза на тросовой внешней подвеске вертолета. Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2011. № 3. С. 26–32.
5. Ефимов В.В. Автоколебания грузов на тросовой внешней подвеске вертолета // Полет. Общероссийский научно-технический журнал. 2011. № 12. С. 23–28.

6. **Ефимов В.В.** Исследование равновесия груза на внешней подвеске вертолета // Научный Вестник УВАУ ГА. 2009. № 2. С. 20–24.
7. **Ефимов В.В.** К вопросу о равновесии вертолета с грузом на внешней подвеске. Материалы XXI научно-технической конференции по аэродинамике. Жуковский, 2010. С. 79–80.
8. 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.
9. **Ефимов В.В., Кубланов М.С., Ципенко В.Г.** К вопросу о создании математической модели движения вертолета и груза на его внешней подвеске // Материалы XVIII школы-семинара «Аэродинамика летательных аппаратов». Жуковский: Центральный Аэрогидродинамический институт имени проф. Н.Е. Жуковского (ЦАГИ), 2007. С. 56.
10. **Бабенко Г.Н., Ефимов В.В., Ивчин В.А.** Оценка адекватности математической модели динамики вертолета с грузом на внешней подвеске в части управляемости // Научный Вестник МГТУ ГА. 2016. № 226. С. 175–182.
11. Flight Manual AS 355 N Supplement External Load Transport “Cargo Swing” 1134 Kg.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРЕ

Бабенко Григорий Николаевич, старший преподаватель кафедры аэродинамики, конструкции и прочности летательных аппаратов МГТУ ГА, babenkogn@gmail.com.

ESTIMATING THE IMPACT OF CARGO PARAMETERS AND EXTERNAL LOAD ON HELICOPTER CONTROLLABILITY

Grigory N. Babenko¹

¹*Moscow State Technical University of Civil Aviation, Moscow, Russia*

ABSTRACT

Within the problems solution of complex research in helicopter controllability, the reasons of changes controllability parameters when transporting cargo using external load have previously been identified.

The next stage of research is to determine how concrete cargo parameters and external load as a whole, as well as their combination influence helicopter controllability parameters.

The article contains research results of the cargo parameters and external load impact on static and dynamic controllability parameters. As a static characteristic of controllability the operation efficiency expressed by the maximal angular acceleration acquired by the helicopter in the case of throttle equal deviations at various flight velocities was considered. Time of the transient process was chosen as a dynamic characteristic with the observable parameter being the movement of the cyclic pitch. For cargo parameters, 16 combinations of ballistic coefficient and cargo mass were considered, while the external load parameter the cable length from 10 to 40 meters was chosen.

According to completed simulation experiments, certain dependencies were found between controllability parameters and external cargo parameters and their various combinations. The analysis of the results showed that the dynamic characteristics are more appropriate for estimating the impact of cargo parameters on helicopter flying qualities, since such estimation fully defines the workload on a pilot. The acquired results may be applied to improve Flight Operations Manuals and Aviation Personnel Training Instructions.

Key words: helicopter, cargo on external load, controllability.

REFERENCES

1. **Babenko G.N., Efimov V.V., Ivchin V.A.** *Vliyanie gruzha na vneshnej podveske vertoletov na ego upravlyaemost'* [Impact of an underslung load on a helicopter's controllability]. *Nauchny Vestnik MGTU GA* [Civil Aviation High Technologies], 2016, Vol. 19, No. 6, pp. 8–16. (in Russian)

2. **Kozlovsky V.B., Parshentsev S.A., Efimov V.V.** *Vertolet s грузом на vneshej podveske* [Helicopter with Cargo on External Sling]. Moscow, Mashinostroenie. Mashinostroenie-Polet [Mechanical Engineering. Mechanical Engineering-Flight], 2008, 304 p. (in Russian)
3. **Lebedev A.A.** *Rekomendacii po pilotirovaniyu vertolyota i bor'be s raskachkoj gruzu pri vy-polnenii ehkstreennyh aviacionnyh rabot s primeneniem vneshej podveski* [Recommendation on heli-copter piloting and efforts against swinging of load while carrying out urgent aerial works using outer suspension]. *Nauchny Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2013, No. 188, pp. 143–146. (in Russian)
4. **Efimov V.V.** *Dinamicheskaya ustojchivost' gruzu na trosovoj vneshej podveske vertoleta* [Investigation of the dynamic stability of cargo on the helicopter external sling]. Scientific and Technical journal "Polyot" ("Flight"), 2011, No. 3, pp. 26–32. (in Russian)
5. **Efimov V.V.** *Avtokolebaniya gruzov na trosovoj vneshej podveske vertoleta* [Autooscilla-tions of cargo on the helicopter external sling]. Scientific and Technical journal "Polyot" ("Flight"), 2011, No. 12, pp. 23–28. (in Russian)
6. **Efimov V.V.** *Issledovanie ravnovesiya gruzu na vneshej podveske vertoleta* [Study of cargo equilibrium on the helicopter external sling]. Scientific Bulletin of Ulyanovsk Higher Civil Aviation School, 2009, No. 2, pp. 20–24. (in Russian)
7. **Efimov V.V.** *K voprosu o ravnovesii vertoleta s грузом на vneshej podveske* [To the ques-tion of the balance of the helicopter with an external load]. *Materialy XXI nauchno-tehnicheskoy kon-ferencii po aehrodinamike* [Proceedings of the XXI Scientific and technical conference on aerodynam-ics], Zhukovskiy, 2010, pp. 79–80. (in Russian)
8. **Rukovodstvo po letnoj jekspluatacii vertoleta Mi-8MTV: vvedeno v dejstvie otделом letnoj jekspluatacii Departamenta vozdušnogo transporta Ministerstva transporta Rossijskoj Federacii 14 maja 1994 g.** [Flight Crew Operations Manual Mi-8MTV: enacted with Flight Operations Depart-ment of Air Transport Department of the Russian Federation the Ministry of Transport of May 14th, 1994] p. 7.11.4. (in Russian)
9. **Efimov V.V., Kublanov M.S., Tsipenko V.G.** *K voprosu o sozdanii matematicheskoy modeli dvizheniya vertoleta i gruzu na ego vneshej podveske* [To the question of creating a mathemat-ical model for the movement of a helicopter and its cargo on external sling] *Materialy XVIII shkoly-seminara "Aehrodinamika letatel'nyh apparatov"* [Proceedings of the XVIII school-seminar "Aerodynamics of aircraft"]. Zhukovskiy, Central'nyj Aehrogidrodinamicheskij institut imeni prof. N.E. Zhukovskogo (CAGI), 2007. P. 56. (in Russian)
10. **Babenko G.N., Efimov V.V., Ivchin V.A.** *Ocenka adekvatnosti matematicheskoy modeli dinamiki vertoleta s грузом на vneshej podveske v chasti upravlyaemosti* [Assessing the adequacy of mathematical models of the Mi-8MTV helicopter dynamics in terms of controllability]. *Nauchny Vestnik MGTU GA* [Scientific Bulletin of MSTUCA], 2016, No. 226, pp. 175–182. (in Russian)
11. Flight Manual AS 355 N Supplement External Load Transport "Cargo Swing" 1134 Kg.

INFORMATION ABOUT THE AUTHOR

Grigory N. Babenko, Senior Lecturer of Aircraft Aerodynamics, Structures and Strength Chair, Moscow State Technical University of Civil Aviation, babenkogn@gmail.com.

Поступила в редакцию
Принята в печать

10.09.2017
28.12.2017

Received
Accepted for publication

10.09.2017
28.12.2017