

РАСЧЁТНО-ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК АВТОРОТИРУЮЩЕГО НЕСУЩЕГО ВИНТА МОТОВЕЗДЕХОДА

Киселёв И.А., Мензульский С.Ю., Елисеев П.С., Цветков О.И.

Московский государственный технический университет им. Н.Э.Баумана, Москва

Ключевые слова: мотовездеход, авторотирующий несущий винт, конечно-элементная модель, напряжённо-деформированное состояние, тензометрия, валидация.

Аннотация. В МГТУ им. Н.Э. Баумана ведутся работы по созданию экспериментальных образцов наземно-воздушных вездеходов. В статье представлены результаты экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния несущего винта автожира «Казачок», предполагаемого к использованию в составе лётного прототипа наземно-воздушного вездехода. Испытания заключались в тензометрировании лопасти несущего винта, нагружении концевой хорды лопасти грузом и измерении возникающих вдоль размаха лопасти линейных деформаций. Также была разработана и валидирована по результатам испытаний конечно-элементная модель несущего винта автожира «Казачок». Средняя величина отклонения расчётных и экспериментальных величин деформаций составила менее 4%. После валидации модели был проведён расчёт напряжённо-деформированного состояния авторотирующего несущего винта под воздействием максимальных проектных нагрузок. Из результатов расчётов следует, что несущий винт соответствует требованиям по прочности, предъявляемыми нормами лётной годности винтокрылых летательных аппаратов.

COMPUTATIONAL AND EXPERIMENTAL STUDIES OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS OF THE AUTOROTATING MAIN ROTOR OF AN ALL-TERRAIN VEHICLE

Kiselev I.A., Menzulski S.Yu., Eliseev P.S., Tsvetkov O.I.

Bauman Moscow State Technical University, Moscow

Keywords: all-terrain vehicle, autorotating main rotor, finite element model, stress-strain state, strain gauge, validation.

Abstract. Bauman Moscow State Technical University is working on the creation of experimental samples of ground-air all-terrain vehicles. The article presents the results of experimental studies of the stress-strain state of the main rotor of the Kazachok gyroplane, intended for use as part of a flight prototype of a ground-to-air all-terrain vehicle. The tests consisted in tensometry of the blade and the tail of the main rotor, loading the end chord of the blade with a load and measuring linear deformations occurring along the blade span. A finite element model of the main rotor of the Kazachok gyroplane was also developed and validated based on the test results. The average deviation of the calculated and experimental values of deformations was less than 4%. After validation of the model, the stress-strain state of the autorotation rotor was calculated under the influence of maximum design loads. It follows from the results of calculations of the stress-strain state that the main rotor meets the strength requirements imposed by the airworthiness standards of rotary-wing aircraft.

Введение

С 2020 года МГТУ им. Н.Э. Баумана проводятся работы по созданию наземно-воздушных вездеходов (НВВ), способных перемещаться по земле и в воздухе. В процессе предпроектного анализа НВВ было принято решение об использовании аэродинамической схемы автожира и, соответственно, установке на прототип авторотирующего несущего винта (НВ) с общим горизонтальным шарниром (ГШ). Одной из основных проблем, возникающих при создании прототипа НВВ, является прочность ответственных элементов конструкции, в том числе – несущего винта. Также, для обеспечения необходимой точности расчёта тяговых характеристик НВ при высоких безразмерных скоростях вдоль плоскости диска, необходимо адекватно моделировать упругость лопастей и решать связанную аэроупругую задачу [1, 2].

Материалы и методы исследований

В рамках инициативной научно-исследовательской работы в МГТУ им. Н.Э. Баумана был изготовлен специализированный экспериментальный стенд (рис. 1) на базе мотовездехода BRP Outlander бхб с установленным авторотирующим несущим винтом от автожира «Казачок».



Рис. 1. Общий вид специализированного стенда

Специализированный стенд состоит из испытываемого НВ, силовой рамы, системы предраскрутки НВ, датчиков тяги, системы телеметрии, дисплея и защитной рамы. Силовая рама предназначена для монтажа составных частей стенда. Геометрия силовой рамы была разработана в соответствии с рекомендациями [3]. Система предраскрутки НВ, включающая в себя мотор-редуктор и фрикционную муфту, перед началом ходовых испытаний обеспечивает раскрутку несущего винта [4]. Четыре тензодатчика тяги балочного типа предназначены для измерения аэродинамических сил, возникающих на несущем винте во время ходовых испытаний. Система телеметрии предназначена для опроса датчиков тяги НВ, частоты вращения НВ и скорости специализированного стенда, а также записи полученных данных на твердотельное запоминающее устройство. С целью предотвращения опрокидывания экспериментального стенда [5] или разрушения НВ центробежными силами, в процессе ходовых испытаний система телеметрии выводит на дисплей интегральные показания датчиков тяги, разность сил между датчиками левого и правого борта, а также частоту вращения НВ. Для безопасности пилота в состав стенда включена стальная защитная трубчатая рама.

Помимо ходовых испытаний, специализированный стенд был использован для экспериментальных исследований напряжённо-деформированного состояния несущего винта мотовездехода (рис. 2). Жесткостные испытания заключались в тензометрировании лопасти и комлевой части НВ, нагружении концевой хорды лопасти грузом весом 99,47 Н и измерении возникающих вдоль размаха лопасти линейных деформаций. Целью испытаний являлась наработка валидационного базиса для прочностных и частотных расчётов несущих винтов НВВ [6].

Три тензодатчика были установлены на нижнюю поверхность лопасти несущего винта. Лопасть, не используемая для установки тензодатчиков, была зафиксирована с помощью крепёжной стропы. Перед нагружением конструкции, имеющийся в ней уровень деформаций от собственного веса принимался в качестве точки отсчёта (нулевого). Нагружение было выполнено ступенями приложения нагрузки. В процессе нагружения по схеме (рис. 3) лопасти винта находятся преимущественно в состоянии изгиба, при этом нижние слои материала оказываются сжатыми, а верхние – растянутыми. Закручивание лопастей исключается за счет приложения нагрузки на 25% хорды лопасти. При рассматриваемом

напряженно-деформированном состоянии в точках измерения наибольшее по модулю значение имеет третье главное напряжение, ориентированное вдоль размаха лопасти, остальные главные напряжения имеют существенно меньшее значение, их действием можно пренебречь. Показания тензодатчиков продемонстрировали высокую степень повторяемости.



Рис. 2. Жесткостные испытания несущего винта специализированного стенда



Рис. 3. Схема установки тензодатчиков

В качестве регистрирующей аппаратуры применяется комбинированный электронный блок National Instruments USB-9233, содержащий источник питания, операционный усилитель для подключения выхода тензомостов и аналого-цифровой преобразователь. Измерения выполнялись при помощи разработанной авторами настоящей статьи программы на языке LabView [7], позволяющей управлять сбором данных, выполняемым электронным блоком National Instruments USB-9233. Перед началом испытаний, до приложения внешней нагрузки, но с учетом собственного веса, программа позволяет зафиксировать начальные показания всех тензомостов и принять их за точку отсчета (ноль) для последующих измерений. Далее нагружение выполняется шагами увеличения нагрузки. Для каждого шага нагрузки оценивается приращение деформаций в каждой точке измерения и затем указанное приращение усредняется отдельно для каждой точки измерения между шагами нагружения для снижения случайных ошибок регистрации. После приложения очередной ступени нагрузки выполнялась выдержка для окончания переходных процессов перед регистрацией значений приращения деформации в точках измерения.

Результаты

В качестве регистрирующей аппаратуры применяется комбинированный электронный блок National Instruments USB-9233, содержащий источник питания, операционный усилитель для подключения выхода тензомостов и аналого-цифровой преобразователь. Измерения выполнялись при помощи разработанной авторами настоящей статьи программы на языке LabView [7], позволяющей управлять сбором данных, выполняемым электронным блоком National Instruments USB-9233. Перед началом испытаний, до приложения внешней нагрузки, но с учетом собственного веса, программа позволяет зафиксировать начальные показания

всех тензозомостов и принять их за точку отсчета (ноль) для последующих измерений. Далее нагружение выполняется шагами увеличения нагрузки. Для каждого шага нагрузки оценивается приращение деформаций в каждой точке измерения, и затем указанное приращение усредняется отдельно для каждой точки измерения между шагами нагружения для снижения случайных ошибок регистрации. После приложения очередной ступени нагрузки выполнялась выдержка для окончания переходных процессов перед регистрацией значений приращения деформации в точках измерения.

Результаты жесткостных испытаний, осреднённые по трём измерениям, представлены в таблице 1.

Табл. 1. Результаты жесткостных испытаний несущего винта специализированного стенда

№ ступени нагружения	Вес груза, Н	Прогиб лопасти, мм	Показания тензодатчика №1	Показания тензодатчика №2	Показания тензодатчика №3
1	0,00	0	0,000000	0,000000	0,000000
2	34,43	215	-0,000201	-0,000134	-0,000053
3	70,04	449	-0,000405	-0,000268	-0,000105
4	99,47	643	-0,000571	-0,000375	-0,000147

По предоставленной изготовителем рабочей конструкторской документации, была разработана конечно-элементная модель (КЭМ) испытанного несущего винта (рис. 4) и проведён расчёт напряжённо-деформированного состояния НВ в процессе испытаний (рис. 5). Модель содержит более 200000 гексагональных конечных элементов (850000 узлов).

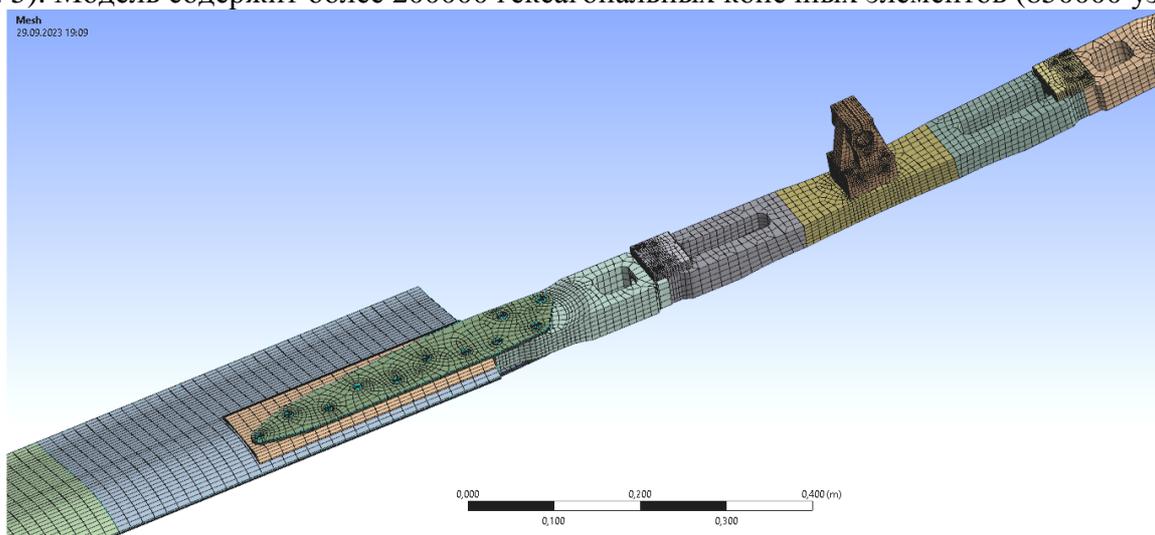


Рис. 4. Конечно-элементная модель несущего винта автожира «Казачок»

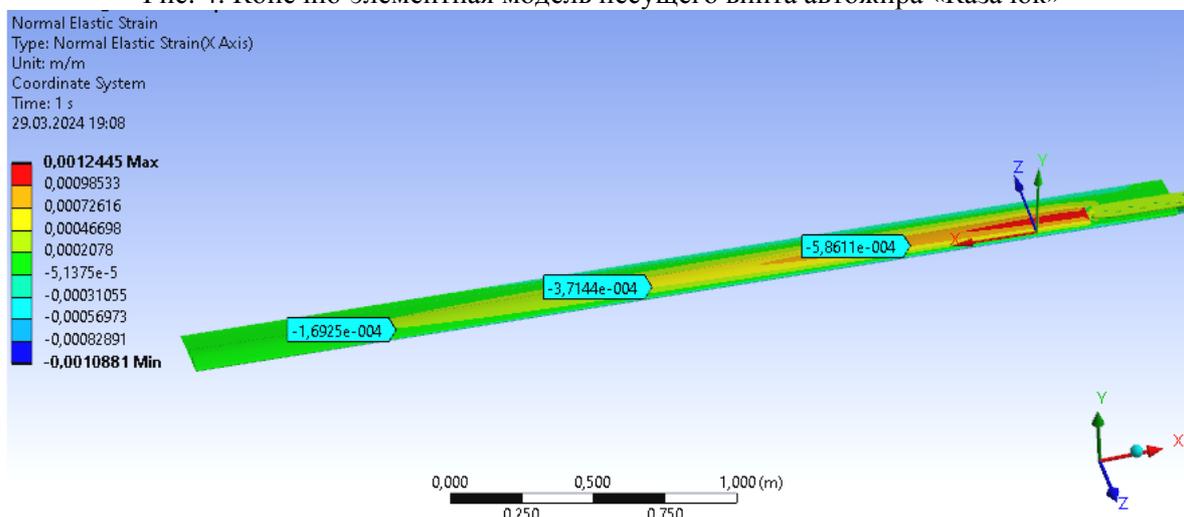


Рис. 5. Результаты расчёта линейных деформаций НВ, при нагружении края лопасти нагрузкой 99,47 Н

Результаты расчётов линейных деформаций несущего винта приведены в таблице 2.

Табл. 2. Расчётные величины прогибов и линейных деформаций несущего винта специализированного стенда

№ ступени нагружения	Прилагаемая нагрузка, Н	Прогиб лопасти, мм	Линейные деформации в точке №1	Линейные деформации в точке №2	Линейные деформации в точке №3
1	0,00	0	0,000000	0,000000	0,000000
2	34,43	224	-0,000203	-0,000128	-0,000058
3	70,04	454	-0,000413	-0,000261	-0,000119
4	99,47	645	-0,000586	-0,000371	-0,000169

Расчёт погрешности конечно-элементной модели выполнен по формуле:

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{(x_э - x_p)}{x_э},$$

где \bar{x} – значение среднего отклонения, $x_э$ – экспериментально измеренная линейная деформация, x_p – расчётная линейная деформация, n – количество валидируемых точек. По результатам расчётов \bar{x} составляет 3,9%.

При наличии адекватной конечно-элементной модели, рационально провести расчёт прочностных характеристик несущего винта (рис. 6). Согласно рекомендациям производителя, максимально допустимая частота вращения НВ составляет 390 об/мин при тяге 7500 Н. Данные нагрузки, а также вес НВ, были приложены к разработанной КЭМ. Распределение подъёмной силы по лопасти НВ было сформулировано аналитически согласно [8, 9].

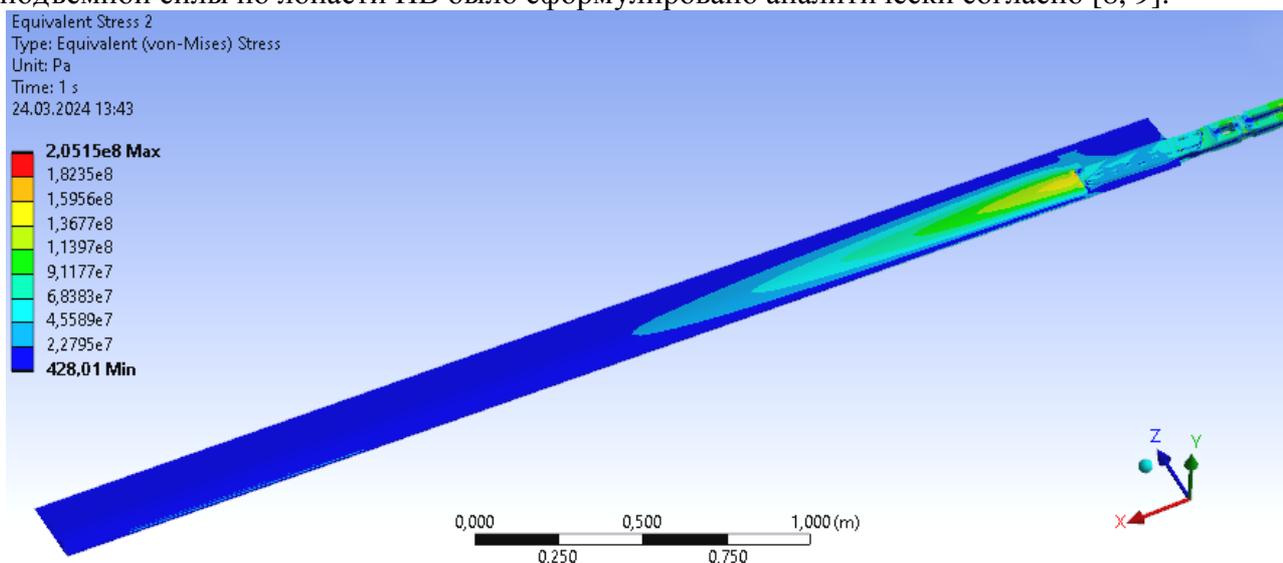


Рис. 6. Эпюра напряжений конструкции НВ автожира «Казачок»

Для конструкционного материала лопастей НВ, анодированного алюминиевого сплава Д16Т, предел текучести равен 420 МПа [10]. Коэффициент запаса прочности несущего винта определяется по формуле:

$$k = \frac{\sigma_T}{\sigma_{\max}},$$

где k – коэффициент запаса прочности, σ_T – предел текучести материала, σ_{\max} – максимальные расчётные напряжения. Таким образом, коэффициент запаса прочности несущего винта имеет величину 2,05, что соответствует требованиям норм лётной годности винтокрылых летательных аппаратов [11].

Выводы

1. Разработана и валидирована по результатам испытаний КЭМ несущего винта автожира «Казачок». Сравнение расчётных и экспериментальных величин деформаций НВ показывает, что точность модели составляет свыше 96%.

2. Высокая точность разработанной КЭМ позволяет использовать её для дальнейших работ по моделированию динамики конструкции и аэроупругости авторотирующего несущего винта.

3. При максимальной эксплуатационной нагрузке, несущий винт автожира «Казачок» соответствует требованиям раздела С (прочность) норм лётной годности винтокрылых летательных аппаратов и может быть использован на лётном прототипе наземно-воздушного вездехода.

Благодарности. Авторы благодарят Безуевскую Ольгу Фёдоровну за моральную поддержку при написании статьи.

Список литературы

1. Полинцев О.Е. Динамика и прочность авторотирующего несущего винта: Дисс. ... канд. техн. наук. – Иркутск: Институт динамики систем и теории управления СО РАН, 2003. – 279 с.
2. Калмыков А.А. Динамические модели автожира и нормирование условий нагружения конструкции: Дисс. ... канд. техн. наук. – Иркутск: Институт динамики систем и теории управления СО РАН, 2005. – 252 с.
3. Вдовин Д.С., Чичекин И.В., Левенков Я.Ю., Фоминых А.Б. Разработка методики создания динамической математической модели квадроцикла для расчёта на ранних стадиях проектирования нагрузок, действующих на раму и ходовую часть // Труды НАМИ. – 2021. – Т. 285, № 2. – С. 46-57. – doi.org/10.51187/0135-3152-2021-2-46-57.
4. Братухин И. П. Автожиры. Теория и расчёт. – М.: ГосМашМетИздат, 1934. – 111 с.
5. Lyashenko M., Potapov P., Dolotov A., Diakov A.S., Evseev K.B., Zverev A.V. Analysis of ATV transmission operation according to the results of tests on a dynamometer test bench // Design technologies for wheeled and tracked vehicles (ММВС). 2019, vol. 820, p. 012018. doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012018.
6. Миль М.Л., Некрасов А.В., Браверман А.С., Гродко Л.Н., Лейканд М.А. Вертолеты. Расчет и проектирование. – М.: Машиностроение, 1967. – Кн. 2. – 424 с.
7. Медведев А.Ю., Цебренько К.Н. Разработка и исследование методов проектирования реконфигурируемых систем ввода-вывода в среде LabView на базе станции Elvis // International journal of humanities and natural sciences. – 2023. – Т. 1-2(76). – С. 89-93.
8. Глауэрт Г. Основы теории крыльев и винта. – Л.: Государственное научно-техническое издательство, 1931. – 164 с.
9. Glauert H., Lock C.N.H. A Summary of the Experimental and Theoretical Investigations of the Characteristics of an Autogiro // Br. ARC R & M. 1928, vol. 1162; 1928. – 61 p.
10. Грищенко Н.А., Сидельников С.Б., Губанов И.Ю. Механические свойства алюминиевых сплавов. – М.: НИЦ ИНФРА-М, 2023. – 195 с.
11. Авиационные правила, часть 27: Одобрены постановлением 34-ой сессии Совета по авиации и использованию воздушного пространства от 6 декабря 2013 года.

References

1. Polyntsev O.E. Dynamics and strength of the autorotating rotor: Diss. ... cand. of tech. sc. – Irkutsk: Institute of system dynamics and control theory SB RAS, 2003. – 279 p.
2. Kalmykov A.A. Dynamic gyroplane models and normalization of structural loading conditions: Diss. ... cand. of tech. sc. – Irkutsk: Institute of system dynamics and control theory SB RAS, 2005. – 252 p.
3. Vdovin D.S., Chichekin I.V., Levenkov Ya.Yu., Fominykh A.B. Development of a methodology for creating a dynamic mathematical model of an ATV for calculating loads acting on the frame and chassis at the early stages of design // Proceedings of NAMI. 2021, vol. 285, no. 2, pp. 46-57. doi.org/10.51187/0135-3152-2021-2-46-57.
4. Bratukhin I. P. Gyroplanes. Theory and calculation. – М.: Gosmashmetizdat, 1934. – 111 p.
5. Lyashenko M., Potapov P., Dolotov A., Diakov A.S., Evseev K.B., Zverev A.V. Analysis of ATV transmission operation according to the results of tests on a dynamometer test bench // Design technologies for wheeled and tracked vehicles (ММВС). 2019, vol. 820, p. 012018. doi.org/10.1088/1757-899X/820/1/012018.
6. Mil M.L., Nekrasov A.V., Braverman A.S., Grodtko L.N., Leykand M.A. Helicopters. Calculation and design. – М.: Mechanical Engineering, 1967. – Book 2. – 424 p.
7. Medvedev A.Yu., Tsebrnenko K.N. Development and research of design methods for reconfigurable I/O systems in the labview environment based on the elvis station // International journal of humanities and natural sciences. 2023, vol. 1-2(76), pp. 89-93.

8. Glauert H. Fundamentals of the theory of wings and propeller. – L.: State scientific and technical publishing house, 1931. – 164 p.
9. Glauert H., Lock C.N.H. A Summary of the Experimental and Theoretical Investigations of the Characteristics of an Autogiro // Br. ARC R & M. 1928, vol. 1162; 1928. – 61 p.
10. Grishenko N.A., Sidelnikov S.B., Gubanov I.Yu. Mechanical properties of aluminum alloys. – M.: NIC INFRA-M, 2023. – 195 p.
11. Aviation Regulations, Part 27: Approved by the Resolution of the 34th session of the Council on aviation and the use of airspace dated December 6, 2013.

Сведения об авторах:

Information about authors:

Киселев Игорь Алексеевич – кандидат технических наук, доцент кафедры «Прикладная механика»	Kiselyov Igor Alekseevich – candidate of technical sciences, associate professor of the Department of applied mechanics
Мензульский Сергей Юрьевич – кандидат технических наук, заведующий лабораторией специальной робототехники Инжинирингового центра «Автоматика и робототехника»	Menzulski Sergey Yuryevich – candidate of technical sciences, head of the laboratory of special robotics of the Engineering center «Automation and robotics»
Елисеев Павел Сергеевич – инженер кафедры «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса»	Yeliseev Pavel Sergeevich – engineer of the Department of transport and technological means and equipment of the forestry complex
Цветков Олег Игоревич – ведущий инженер лаборатории специальной робототехники Инжинирингового центра «Автоматика и робототехника»	Tsvetkov Oleg Igorevich – leading engineer of the laboratory of special robotics of the Engineering center «Automation and robotics»
s_menz@mail.ru	

Получена 14.11.2023