

Акционерное общество
«Казанский вертолетный завод»
(АО «Казанский вертолетный завод»)
ул. Тэцевская, д. 14, г. Казань,
Республика Татарстан, Россия, 420085
Тел. +7(843) 549-66-99, факс +7(843) 549-65-21
ОГРН 1021603881683, ОКПО 07506317
ИНН 1656002652, КПП 997450001
e-mail: kvz@kazanhelicopters.com
www.russianhelicopters.aero

27.10.2021 № 35554-138

на № _____

О направлении отзыва на
диссертационную работу

Учёному секретарю
диссертационного совета
Д212.125.10
Денискиной А.Р.

Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-
80, ГСП-3, 125993
тел.: 8 (499) 158-43-33
e-mail: mai@mai.ru

Уважаемая Антонина Робертовна!

Направляю Вам Отзыв официального оппонента доктора технических наук, доцента, заместителя начальника отдела расчетов ОКБ АО «Казанский вертолетный завод» Неделько Дмитрия Валерьевича на диссертацию Каргаева Максима Владимировича на тему «Метод проектирования лопастей несущего винта с учётом ветрового воздействия», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов».

Приложение: Отзыв на диссертацию, 2 экз. на 9 л. каждый.

Заместитель управляющего директора –
главный конструктор ОКБ



А.О. Гарипов

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель управляющего директора –
главный конструктор ОКБ
АО «Казанский вертолетный завод»



А.О. Гарипов

«26» 10 2021 г.

ОТЗЫВ

официального оппонента доктора технических наук, доцента, заместителя
начальника отдела расчетов ОКБ АО «Казанский вертолетный завод»

НЕДЕЛЬКО Дмитрия Валерьевича

на диссертацию КАРГАЕВА Максима Владимировича

на тему «Метод проектирования лопастей несущего винта с учётом ветрового воздействия», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов»

Необходимость эксплуатации вертолетов в условиях сильного ветрового воздействия - прибрежных территориях северной части России и Арктической зоне, требует пересмотра существующих методов проектирования и процедур эксплуатации вертолетов. При эксплуатации вертолеты, находящиеся на стоянке, в течение длительного времени подвергаются воздействию ветра. При отсутствии вращения несущего винта лопасти имеют высокую чувствительность к ветровому нагружению. Известны случаи разрушения лопастей несущего винта (ЛНВ) в процессе эксплуатации вертолетов. Данные обстоятельства могут приводить не только к финансовым потерям эксплуатантов, но также и к увеличению рисков возникновения аварий и снижению безопасности полетов.

Существующие нормы летной годности вертолетов не содержат достаточных формализованных требований, позволяющих проектировать ЛНВ под заданные ветровые режимы и обеспечивать безопасную эксплуатацию вертолетов в условиях ветрового нагружения. Эти обстоятельства вызывают необходимость в проведении комплексных исследований, направленных на выяснение физической картины ветрового нагружения лопастей, поиск и исследование основных факторов, влияющих на характеристики статической и усталостной прочности лопастей, их динамическую и статическую устойчивость, а также необходимость разработки метода проектирования ЛНВ вертолета, учитывающего явления ветрового нагружения.

В представленной на отзыв работе предложено решение данной проблемы, поэтому исследования, проведенные автором диссертации, представляются актуальными и практически важными.

Отдел документационного
обеспечения МАИ

«01» 11 2021 г.

Целью диссертационной работы является разработка метода проектирования лопастей несущего винта вертолета с учетом ветрового воздействия. Экономический эффект достигается за счет сокращения (исключения) числа случаев разрушения лопастей от ветра в эксплуатации как серийных, так и вновь разрабатываемых вертолетов.

В качестве **объекта исследования** выбраны невращающиеся зашвартованные и незашвартованные ЛНВ вертолета. А в качестве предмета исследований – явления ветрового нагружения невращающихся зашвартованных и незашвартованных ЛНВ вертолета. Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается удовлетворительным совпадением результатов численных экспериментов с данными испытаний натуральных ЛНВ под воздействием: массовых сил и дискретно распределенной нагрузки, а также ветровой нагрузки от стоящего рядом вертолета. Косвенно достоверность также подтверждается результатами расчетов уровня нагружения ЛНВ отечественных вертолетов, подвергшихся разрушению от ветра в процессе эксплуатации.

Диссертация содержит 159 страниц текста, 41 рисунок, 3 таблицы; состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы из 120 наименований и приложения.

Диссертация написана грамотным научно-техническим языком.

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель диссертации, задачи, решенные в ходе работы, и положения, выносимые на защиту. Показаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методология и методы исследования. Степень разработанности темы исследования представлена в виде обзора отечественных и зарубежных научных работ в области проектирования ЛНВ вертолета. Также приведена информация о степени достоверности, апробации и внедрении результатов исследования.

В первой главе анализируется статическая прочность ЛНВ вертолета при действии ветра на стоянке. Сформулированы допущения, принятые при определении аэродинамических сил и рассмотрении устойчивости ЛНВ. Определена схема обтекания невращающейся лопасти ветровым потоком, включая скорости и углы атаки сечений лопасти. При определении критической скорости потери устойчивости ЛНВ рассмотрен изгиб в плоскости ее наименьшей жесткости.

Предложен численный метод определения критической для ЛНВ скорости ветра и получены аналитические зависимости для ее вычисления. Установлено, что потеря устойчивости незашвартованной ЛНВ вертолета под воздействием ветра возможна только на режимах обдувки с отрицательными углами скольжения – при расположении лопасти концевой частью навстречу ветровому потоку. Для оценки характеристик устойчивости ЛНВ вертолета под

воздействием ветра предложен критерий – ветровой коэффициент лопасти.

Описан метод расчета изгибных напряжений в незашвартованной ЛНВ вертолета на базе линейной модели нагружения при стационарном воздействии ветра. Рассмотрен изгиб лопасти в плоскости наименьшей жесткости. Определен коэффициент увеличения нагрузки, на основе которого построено решение, позволяющее избегать необходимости прямого интегрирования исходного дифференциального уравнения изгиба лопасти под воздействием ветра. Получены аналитические зависимости для определения параметров напряженно-деформированного состояния лопасти (прогибов, углов поворота, изгибающих моментов и напряжений) под действием стационарного ветрового потока при допущениях об «аэрожесткой» лопасти, прогибы которой не изменяют углов атаки сечений. Установлено, что упругость вносит существенные изменения в картину распределения изгибающих моментов. По мере возрастания скорости потока указанная закономерность проявляется сильнее.

Получено нелинейное уравнение зашвартованной ЛНВ при ветровом нагружении. Предложен метод расчета изгибных напряжений в зашвартованной и незашвартованной ЛНВ вертолета на базе нелинейной модели нагружения при стационарном воздействии ветра. В основе разработанного метода расчета напряжений в ЛНВ лежит метод последовательных возмущений параметров, предложенный В.В. Петровым. При малых скоростях ветра наблюдается хорошая сходимость результатов расчетов по линейной и нелинейной моделям нагружения. По мере увеличения расчетной скорости ветра различие в расчетных значениях напряжений растет и при значениях, близких или равных критической скорости ветра, разница достигает максимальной величины – напряжения, рассчитанные на основе линейной модели, стремятся к бесконечности.

Нелинейная модель лишена данного недостатка. На основе результатов расчетов сделан вывод о том, что изгибающие моменты (напряжения) от ветрового нагружения превосходят напряжения от действия массовых сил ЛНВ и, следовательно, должны учитываться при ее проектировании. Получены значения предельных для эксплуатации скоростей ветра по условиям прочности и отсутствия взмаха лопасти.

В диссертации описаны экспериментальные исследования статической прочности ЛНВ при имитации воздействия ветра с помощью дискретно распределенной нагрузки. Для проверки точности статических расчетов напряжений в ЛНВ использованы замеры напряжений в лопасти под действием массовых сил, а также под действием дискретно-распределенных нагрузок, выполненные в АО «НЦВ Миль и Камов». При испытаниях лопасть нагружалась статическим изгибающим моментом от дискретно распределенных поперечных сил, прикладываемых к лопасти с помощью ложементов, закрепленных в четырех сечениях. Дискретно распределенная нагрузка имитирует действие на лопасть ветрового потока. Ступени испытаний подобраны из условия

обеспечения требований норм прочности вертолетов – безопасной скорости ветра 40 м/с. Получена удовлетворительная сходимость результатов численных статических расчетов напряжений в лопасти с экспериментальными данными.

Во второй главе исследована динамическая прочность ЛНВ вертолета при действии ветра на стоянке. Выведены нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие движение зашвартованной и незашвартованной лопасти при нестационарном воздействии ветра. Предложен метод расчета напряжений в зашвартованных и незашвартованных лопастях вертолета, обдуваемых ветровым потоком. В предложенном методе расчета напряжений исходное уравнение колебаний методом Б.Г. Галеркина приводится к системе дифференциальных уравнений. Для численного интегрирования этой системы использован метод Ньюмарка с применением на каждом шаге интегрирования по времени дополнительных итерационных процессов.

Установлено, что значительные величины напряжений, вызываемые ветром, а также факт нахождения вертолета в стояночном положении в течении более чем 80% времени эксплуатации, обязывают разработчиков вертолетной техники учитывать случаи воздействия ветра при определении ресурса лопасти. Исследована динамическая устойчивость ЛНВ при гармоническом воздействии ветра и показана возможность появления неустойчивости. Получены формулы для расчета границ областей динамической неустойчивости зашвартованной и незашвартованной ЛНВ вертолета.

На основе уравнений параметрических колебаний лопасти определены критические частоты и коэффициенты возбуждения, соответствующие главному и двум побочным резонансам. Сделан вывод о том, что в эксплуатационном диапазоне скоростей ветра наиболее опасной является главная область неустойчивости, а вторая, и тем более третья области неустойчивости, ввиду наличия затухания практически не реализуются. Показано, что наличие затухания делает невозможным наступления резонанса при достаточно малых коэффициентах возбуждения. При проектировании ЛНВ предложено на этапе поверочных расчетов выполнять её проверку на динамическую устойчивость и при необходимости выполнять отстройку от потери устойчивости.

Предложен метод расчета полетного ресурса ЛНВ с учетом воздействия ветра на стоянке. Получено уравнение для определения полетного ресурса ЛНВ с учетом полетного и ветрового спектров нагружения. Для расчета параметров уравнения совместно использованы динамическая модель ветра, схематизация реализации ветра и метод расчета напряжений в ЛНВ.

Расчеты полетного ресурса лопастей выполнены для трех городов РФ в пяти вариантах эксплуатации вертолета. Установлено, что колебания лопасти при действии ветра во время пребывания вертолета на стоянке могут быть причиной расходования значительной части ее ресурса. Показано, что расход ресурса лопасти на стоянке зависит не только от среднегодовой скорости ветра,

но также от его временной изменчивости, требующей рассмотрения скорости ветра как случайного процесса коррелированного во времени. Расчетным способом показано, что для мест эксплуатации с небольшими среднегодовыми скоростями и изменчивостью ветра расчет полетного ресурса лопасти может проводиться без учета ветра на стоянке. При этом для получения требуемой величины ресурса лопасти при эксплуатации вертолета в местах с большими среднегодовыми скоростями и изменчивостью ветра необходимо ограничивать либо срок службы лопасти, учитывая результаты расчета ресурса с учетом ветра, либо допустимый эксплуатационный диапазон скоростей ветра. Отмечено, что срок службы лопастей можно увеличить за счет использования штатной швартовки лопастей на стоянке вертолета.

Описаны экспериментальные исследования ветрового воздействия на незашвартованные ЛНВ вертолета Ми-28 от индуктивного потока, создаваемого рядом стоящим вертолетом Ми-26, выполненные в АО «НЦВ Миль и Камов». Получена удовлетворительная сходимость результатов численных динамических расчетов напряжений в лопасти с экспериментальными данными.

В третьей главе предложен метод проектирования ЛНВ, учитывающий ветровое воздействие. Рассмотрены текущие требования, предъявляемые к проектируемым ЛНВ, а также сформулированы дополнительные требования к лопастям, обусловленные воздействием ветра на стоянке вертолета. Отмечается, что на итоговые массово-жесткостные параметры лопасти в большей степени влияют требования непревышения допустимых величин напряжений и прогибов конца лопасти. Алгоритм предлагаемого метода проектирования ЛНВ, учитывающий явления ветрового нагружения, приведен в виде блок-схемы. Каждый блок алгоритма предлагаемого метода проектирования ЛНВ, как и логика перехода между отдельными блоками, имеют текстовое описание. Автор констатирует, что учет новых требований, обусловленных воздействием ветра на стоянке вертолета, не приводит к существенному усложнению существующей процедуры проектирования лопастей.

В заключении сделан вывод о том, что цель диссертационной работы достигнута, задачи, поставленные в процессе работы над диссертацией, решены в полном объеме.

В диссертационной работе автором решены следующие задачи:

1. Исследованы статическая и динамическая устойчивости лопасти несущего винта вертолета, находящейся на стоянке под воздействием ветра.
2. Разработаны методы определения параметров напряженно-деформированного состояния зашвартованной и незашвартованной лопастей несущего винта при стационарном и нестационарном воздействиях ветра на основе линейной и нелинейной моделей нагружения.

3. Разработан метод определения полетного ресурса лопастей несущего винта вертолета с учетом ветрового спектра нагружения на стоянке вертолета.

4. Сформулированы дополнительные требования к лопастям несущего винта вертолета, предназначенным для эксплуатации в условиях ветра.

5. Дополнены существующие в практике ОКБ алгоритмы проектирования лопастей несущего винта в части учета дополнительных требований ветрового нагружения.

Научная новизна работы заключается в следующем.

1. На базе линейной и нелинейной моделей нагружения разработаны методы расчета статических напряжений в зашвартованной и незашвартованной лопастях вертолета, обдуваемых ветровым потоком.

2. На базе нелинейной модели нагружения уточнен метод расчета динамических напряжений в зашвартованной и незашвартованной лопастях вертолета, обдуваемых ветровым потоком.

3. Исследована возможность потери как статической, так и динамической устойчивости зашвартованных и незашвартованных лопастей несущего винта вертолета, находящихся на стоянке под воздействием ветра.

4. Разработана методика расчета ресурса лопастей несущего винта вертолета с учетом их ветрового нагружения на стоянке.

5. Сформулированы дополнительные требования к лопастям несущего винта, обусловленные явлениями их ветрового нагружения на стоянке вертолета.

6. Разработан метод проектирования лопастей несущего винта вертолета, учитывающий дополнительные требования, обусловленные ветровым воздействием окружающей среды на стоянке вертолета в различных природно-климатических условиях.

Практическая значимость работы заключается в том, что результаты диссертационной работы позволяют

эксплуатирующим организациям:

- обеспечить безопасную эксплуатацию лопастей несущих винтов вертолетов в условиях сильного ветрового воздействия (в том числе Арктической зоны);

- снизить финансовые затраты на приобретение новых комплектов лопастей взамен вышедших из строя из-за воздействия ветра;

- своевременно принимать меры по обеспечению сохранности лопастей несущего винта в случае превышения безопасных значений скорости ветра;

- определять районы, в которых возможно безопасное безаэродромное базирование вертолета по условиям отсутствия ущерба от ветрового воздействия.

разработчикам вертолетной техники:

- проектировать лопасти несущего винта под заданные ветровые режимы;

- определить величину предельной скорости ветра на стоянке для различных типов зашвартованных и незашвартованных лопастей;

- уточнить методику исследования технического состояния агрегатов несущей системы, подвергшихся воздействию штормового ветра на стоянке;

- включить в летную и техническую документацию вертолетов дополнительные рекомендации по обеспечению сохранности лопастей несущего винта, эксплуатирующихся в условиях ветра.

Следует отметить, что результаты диссертационной работы внедрены и используются в АО «НЦВ Миль и Камов» и АО «ЮТэйр-Инжиниринг», а также использованы в научно-исследовательской работе соискателя, поддержанной грантом РФФИ № 20-38-90028 «Исследование явлений ветрового нагружения невращающихся лопастей несущего винта вертолета с целью обеспечения их безопасной эксплуатации в условиях ветрового воздействия Арктической зоны». Сроки освоения разработанных в диссертации теоретических положений и начало их практического использования могут быть существенно сокращены за счет применения разработанных и зарегистрированных автором 6 программ для ЭВМ, позволяющих выполнять расчеты, связанные с воздействием ветра на лопасти несущего винта.

Теоретическая значимость работы состоит в том, что автором впервые получены следующие результаты:

1. Получены аналитические зависимости для расчета: критических скоростей ветрового потока, приводящих к потере лопастью статической устойчивости; прогибов, углов поворота, изгибающих моментов и напряжений в сечениях лопасти для случая стационарного воздействия ветра; критических частот, коэффициентов возбуждения и границ главной и двух побочных областей динамической неустойчивости зашвартованной и незашвартованной лопасти несущего винта.

2. Составлены нелинейные уравнения статического нагружения зашвартованной и незашвартованной лопасти, обдуваемой ветровым потоком. Предложена вычислительная схема его решения на основе метода последовательных возмущений параметров, предложенных В.В. Петровым.

3. Выведены нелинейные дифференциальные уравнения в частных производных, описывающие движение зашвартованной и незашвартованной лопасти при нестационарном воздействии ветра. Разработан метод их решения на основе сведения методом Галеркина исходного уравнения к системе линейных дифференциальных уравнений и последующего их интегрирования методом Ньюмарка.

4. Составлены системы уравнений для определения амплитуд колебаний лопасти в пределах четных и нечетных областей динамической неустойчивости.

5. Получено уравнение для определения полетного ресурса лопасти с учетом полетного и ветрового спектров нагружения и предложен метод задания параметров этого уравнения.

6. Сформулированы и интегрированы в алгоритм проектирования требования к ЛНВ вертолета, предназначенным для эксплуатации в условиях ветра.

Публикации и апробация работы

Основные положения и результаты диссертационной работы были представлены в виде докладов и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, конкурсах и форумах: «Вертолёты XXI века» (Москва, 2017 г.); XLIV, XLV, XLVI и XLVII Международной молодёжной научной конференции «Гагаринские чтения» (Москва, 2018, 2019, 2020, 2021 гг.); X Всероссийском конкурсе молодых учёных (Миасс, 2018 г.); V научно-практической конференции молодых учёных и специалистов «Исследования и перспективные разработки в машиностроении» (Комсомольск-на-Амуре, 2018 г.); 17-й, 18-й и 19-й Международной конференции «Авиация и космонавтика» (Москва, 2018, 2019, 2020 гг.); X и XII Всероссийском межотраслевом конкурсе научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики» (Москва, 2018, 2020 гг.); XII Общероссийской научно-технической конференции «Молодёжь. Техника. Космос» (Санкт-Петербург, 2020 г.); 45th European Rotorcraft Forum (Варшава, 2019 г.); 46th European Rotorcraft Forum (Москва, 2020 г.).

Автором лично и в соавторстве опубликовано 6 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ, 2 статьи – в изданиях, цитируемых международной базой SCOPUS, а также 11 работ в трудах и материалах научных конференций.

В качестве замечаний можно отметить следующие:

1. Приведенный в работе эксперимент, в котором источником ветрового воздействия на лопасти вертолета с заторможенным от вращения винтом является другой вертолет, расположенный рядом и создающий воздушный поток вращающимся несущим винтом, следовало бы провести с записью напряжений от ветра в нескольких сечениях контрольной лопасти. Это позволило бы оценить правильность использованного подхода усреднения по радиусу лопасти радиальной скорости потока в струе от винта и перехода к эквивалентному ветровому воздействию.

2. В работе экспериментально подтверждены модели и методы расчета параметров напряженно-деформированного состояния лопасти несущего винта при стационарном и нестационарном ветровых воздействиях, однако эксперименты, подтверждающие правильность определения критических величин (частот и скоростей ветра, при которых происходит потеря устойчивости) явлений статической и динамической потерь устойчивости не приведены. Поэтому при проектировании лопастей придется принимать в расчет завышенные коэффициенты запаса прочности, что может стать причиной утяжеления их конструкции.

3. В заключении диссертационной работы не сформулированы возможные и целесообразные направления дальнейших исследований.


Отмеченные выше замечания не влияют на общую положительную оценку оппонентом диссертационной работы, не снижают научной и практической ценности проведенного соискателем исследования.

**Заключение о соответствии работы требованиям,
установленным в Положении о присуждении ученых степеней**

Диссертационная работа Каргаева Максима Владимировича является завершенной и самостоятельно выполненной научно-квалификационной работой. Автором решена важная научная задача проектирования лопастей несущих винтов вертолетов с учетом явлений их ветрового нагружения, изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития вертолетостроения страны. Тема и содержание диссертации соответствуют паспорту специальности 05.07.02 – «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов». Автореферат и опубликованные работы в полной мере отражают содержание диссертации и полученные автором основные результаты.

Диссертация соответствует всем требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней», предъявляемым ВАК РФ к кандидатским диссертациям, утвержденного Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года №842, а ее автор Каргаев Максим Владимирович заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.02 «Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов».


Заместитель начальника отдела расчетов
ОКБ АО «Казанский вертолетный завод»,
доктор технических наук, доцент
Адрес электронной почты:
nedelko_dv@kazanhelicopters.com
Телефон: +7 (843) 549-66-52


Д.В. Неделько
26.10.2021

Полное наименование организации:
Акционерное общество «Казанский вертолетный завод».
Почтовый адрес: 420085, Россия, г. Казань, ул. Тэцевская, 14.
Адрес электронной почты: kvz@kazanhelicopters.com
Телефон: +7 (843) 549-66-99

Подпись Неделько Дмитрия Валерьевича удостоверяю:
Начальник отдела учета персонала и организационной
эффективности АО «Казанский вертолетный завод»




О.Н. Зигуляева
26.10.2021