

На правах рукописи



Каргаев Максим Владимирович

**МЕТОД ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛОПАСТЕЙ НЕСУЩЕГО ВИНТА
ВЕРТОЛЕТА С УЧЕТОМ ВЕТРОВОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ**

05.07.02 – Проектирование, конструкция и производство летательных аппаратов

Автореферат диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель к.т.н., доцент
Игнаткин Юрий Михайлович

Официальные оппоненты: Дудник Виталий Владимирович,
д.т.н.,
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Донской государственный технический университет», профессор кафедр «Технологии производства авиационных комплексов специального назначения», «Производственная безопасность»

Неделько Дмитрий Валерьевич,
д.т.н., доцент
акционерное общество «Казанский вертолетный завод», заместитель начальника отдела

Ведущая организация: Акционерное общество научно-производственная компания «ПАНХ», г. Краснодар

Защита диссертации состоится 18 ноября 2021 года в 12:00 часов на заседании диссертационного совета Д212.125.10, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», Волоколамское ш., д. 4, г. Москва, А-80, ГСП-3, 125993

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» <https://mai.ru/events/defence/>

Автореферат разослан «___» _____ 2021 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Денискина Антонина Робертовна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования.

В настоящее время, в нашей стране принято решение о дальнейшем освоении регионов Арктической зоны, которая отличается сильными ветрами (скорость до 40-60 м/с у земли). Данное решение закреплено в Указе Президента РФ от 26 октября 2020 г. № 645 «О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года». При реализации данного Указа предполагается использовать вертолеты.

Необходимость эксплуатации вертолетов в условиях сильного ветрового воздействия - прибрежных территориях северной части России и Арктической зоне, требует пересмотра существующих методов и процедур проектирования и эксплуатации вертолетов.

При эксплуатации вертолеты, находящиеся на стоянке, в течение длительного времени подвергаются воздействию ветра, которое выражается в создании аэродинамических нагрузок на невращающихся лопастях вертолета. При этом лопасти несущего винта (ЛНВ) испытывают значительные изгибные напряжения. Поскольку параметры лопастей традиционно выбираются исходя из условий их работы в поле центробежных сил, обуславливающих им необходимую жесткость по восприятию аэродинамических нагрузок, то при отсутствии вращения винта обладают весьма небольшой собственной жесткостью. Этот факт обуславливает их высокую чувствительность к ветровому нагружению. В зависимости от направления и скорости ветра, а также упругих и массовых характеристик лопасти, напряжения, вызываемые ветровым воздействием, могут достигать значительных величин.

Известно, что ветровое нагружение способно приводить к повреждениям ЛНВ вертолета, препятствующих возможности их дальнейшей эксплуатации. Это происходит как с зашвартованными, так и с незашвартованными лопастями. Для ЛНВ возможны случаи: изгиба лонжерона с появлением остаточных деформаций, вплоть до его разрушения; появления гофров на хвостовых отсеках; касания лопастью земли или хвостовой балки вертолета. Известны случаи разрушения ЛНВ вертолетов типа Ми-6, Ми-26, Ми-8 и Ми-24 при воздействиях ветра. Примеры ЛНВ вертолетов типа Ми-8 и Ми-26, подвергшихся воздействию ветра на стоянке вертолета, приведены на рисунке 1.

Эксплуатация вертолетов в условиях сильного ветрового воздействия может приводить не только к финансовым потерям эксплуатантов вертолетов (высокая стоимость и длительность замены комплекта лопастей), но также и к увеличению рисков возникновения аварий и снижению безопасности полетов.

Как показывает опыт эксплуатации вертолетов, в настоящее время задача защиты ЛНВ от повреждений, связанных с воздействием ветра на стоянке,

практически, остается до конца нерешенной. 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. Однако конструкторам для выбора параметров проектируемых лопастей необходимо иметь четкое представление о явлениях ветрового нагружения, а также иметь математические модели, позволяющие с приемлемой точностью рассчитывать ветровые характеристики и параметры напряженно-деформированного состояния лопасти.



а



б

Рисунок 1 – Примеры последствий воздействия ветра на невращающиеся лопасти несущего винта вертолётов
а – Ми-8, *б* – Ми-26

Эти обстоятельства вызывают необходимость в проведении комплексных исследований, направленных на выяснение физической картины ветрового нагружения лопасти - 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.

Объект и предмет исследования.

Объект – невращающиеся зашвартованные и незашвартованные лопасти несущего винта вертолета.

Предмет – явления ветрового нагружения невращающихся зашвартованных и незашвартованных лопастей несущего винта вертолета.

Степень разработанности темы исследования.

Среди отечественных работ, посвященных методам проектирования ЛНВ, известны научные труды Некрасова А.В., Иванова А.Н., Богданова Ю.С., Скулкова Д.Д., Пчелкина В.М., Павленко Н.С., Бондаренко В.С., Бурцева Б.Н. Среди зарубежных авторов можно выделить современные научные работы Pflumm T., Garre W., Hajek M., Amoozgar M.R., Shaw A.D., Zhang J., Wnag C., Friswell M.I., Lemanski S.L., Weaver P.M., Hill G.F.J., Li L., Volovoi V.V., Hodges D.H., Visweswaraiah S.B., Ghiasi H., Pasini D., Lessard L., Cesnik C.E.S.

Вопросы автоматизации проектирования ЛНВ вертолета, выбор параметров сечений лопасти, как и общий метод, включая алгоритмы проектирования лопасти, приведены в работах Бондаренко В.С. Подходы системного проектирования несущих винтов вертолетов изложены в работе Бурцева Б.Н.

Процедура определения безопасного полетного ресурса ЛНВ вертолета описана в работах Миля М.Л., Некрасова А.В., Бравермана А.С. и Михеева Р.А.

В работе Павленко Н.С. и Братухиной А.И. изложена методика расчета динамических напряжений в ЛНВ под действием ветра на стоянке вертолета на основе линейной модели. Также впервые выполнен расчет ресурса ЛНВ от ветровых нагрузок на стоянке вертолета. Путем сравнения данных из эксплуатации и расчетных данных, установлен факт возможности преждевременного выхода из строя конструкции лопасти под воздействием ветра. При этом при расчете ресурса не учитывалась повреждаемость от полетного спектра нагружения.

Расчету напряжений в невращающейся лопасти рулевого винта при ее ударе по упору горизонтального шарнира от действия порыва ветра посвящена работа Мягкого Ю.А. и Рождественского М.Г. На основе выполненных расчетов установлена возможность повреждения элементов лопасти от ветровых нагрузок.

Задача расчета напряжений в лопасти несущего винта вертолета, поднятой порывом ветра при ее падении на упор ограничителя свеса, решена и представлена в работе Михеева Р.А.

Для решения задач динамики ЛНВ под воздействием ветра, а также задач усталостной прочности, в отличие от задач статики, необходимо иметь динамическую модель ветра. Модели, отвечающие указанным требованиям представлены в работах Бобронникова В.Т., Обухова С.Г. и Плотникова И.А., Удалова С.Н.

Таким образом, в настоящее время существует множество теоретических и экспериментальных работ, связанных с решением прочностных, аэродинамических и проектировочных задач применительно к ЛНВ вертолетов. Тем не менее, остаются неисследованными вопросы, связанные:

- со статической и динамической устойчивостью зашвартованной и

- незашвартованной ЛНВ вертолета, находящегося на стоянке под воздействием ветра;
- с определением параметров напряженно-деформированного состояния зашвартованной и незашвартованной ЛНВ при стационарном и нестационарном воздействиях ветра на основе линейной и нелинейной моделей нагружения;
 - с определением полетного ресурса ЛНВ вертолета с учетом ветрового спектра нагружения на стоянке вертолета;
 - с разработкой необходимых требований к ЛНВ вертолета, предназначенным для эксплуатации в условиях ветра;
 - с отсутствием метода проектирования ЛНВ вертолета под заданные ветровые режимы.

Цель и задачи исследования.

Цель – разработка метода проектирования лопастей несущего винта вертолета с учетом ветрового воздействия.

Для достижения цели поставлены и решены следующие задачи:

1. Исследовать статическую и динамическую устойчивости лопасти несущего винта вертолета, находящейся на стоянке под воздействием ветра.
2. Разработать 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. Разработать метод определения полетного ресурса лопастей несущего винта вертолета с учетом ветрового спектра нагружения на стоянке вертолета.
4. Сформулировать дополнительные требования к лопастям несущего винта вертолета, предназначенным для эксплуатации в условиях ветра.
5. Дополнить существующие в практике ОКБ алгоритмы проектирования лопастей несущего винта в части учета дополнительных требований ветрового нагружения.

Научная новизна исследования.

1. Разработан метод проектирования лопастей несущего винта вертолета, учитывающий дополнительные требования, обусловленные ветровым воздействием окружающей среды на стоянке вертолета в различных природно-климатических условиях.
2. Исследована возможность потери как статической, так и динамической устойчивости зашвартованных и незашвартованных лопастей несущего винта вертолета, находящихся на стоянке под воздействием ветра.
3. Разработана методика расчета ресурса лопастей несущего винта вертолета с учетом их ветрового нагружения на стоянке.

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

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

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

Теоретическая значимость работы.

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 для 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 В.В. Петрова.

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.

Практическая значимость работы.

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.

Методология и методы исследования.

Для решения поставленных в диссертации задач использовались:

- аналитические и численные методы математического моделирования;
- теория дифференциальных уравнений и уравнения Матье-Хилла;
- теории упругости, сопротивления материалов, выносливости и надежности;
- методы Б.Г. Галеркина, В.В. Петрова, Ньюмарка, преобразования Фурье и теория матриц.

Для разработки программ для ЭВМ и проведения вычислительных экспериментов использовались компьютерные пакеты Maple, Matlab и VBA.

Положения, выносимые на защиту.

1. Метод проектирования лопастей несущего винта вертолета, учитывающий дополнительные требования, обусловленные воздействием ветра на стоянке вертолета.

2. Математическая модель и метод определения полетного ресурса лопастей несущего винта вертолета, учитывающие, помимо полетного спектра нагружения, их ветровое нагружение на стоянке.

3. Нелинейные математические модели стационарного и нестационарного ветрового нагружения зашвартованной и незашвартованной лопасти несущего винта вертолета и методы определения параметров напряженно-деформированного состояния (напряжений, изгибающих моментов, прогибов) лопасти и сил натяжения швартовочного троса на базе линейной и нелинейной моделей нагружения.

4. Аналитические зависимости для расчета: критических скоростей ветрового потока, при которых происходит потеря статической устойчивости лопасти несущего винта вертолета, находящейся на стоянке под воздействием ветра, а также критических частот, коэффициентов возбуждения и границ главной и двух побочных областей динамической неустойчивости для зашвартованной и незашвартованной лопасти при гармоническом воздействии ветра.

Степень достоверности и апробация результатов.

Достоверность полученных в диссертации результатов подтверждается:

1. Удовлетворительным совпадением результатов численных экспериментов с данными испытаний натурных лопастей несущего винта под воздействием:

- собственной массы лопасти и дискретно распределенной нагрузки;
- ветровой нагрузки от стоящего рядом вертолета.

2. Результатами расчетов уровня нагружения лопастей несущих винтов, подвергшихся разрушению от ветра в процессе эксплуатации.

Все изложенные в диссертации результаты получены лично автором, либо при его непосредственном участии.

Внедрение результатов работы:

1. Результаты диссертационной работы внедрены и используются в АО «НЦВ Миль и Камов» и АО «ЮТэйр-Инжиниринг».

2. Результаты диссертационной работы использованы в научно-исследовательской работе, 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».

3. Разработаны и зарегистрированы 6 программ для ЭВМ, позволяющих выполнять расчеты, связанные с воздействием ветра на лопасти несущего винта.

Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 8-ми статьях, из них 6 – в журналах, входящих в Перечень ВАК, 2 – в изданиях, цитируемых международной базой SCOPUS, а также в 11 трудах и материалах научных конференций.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, конкурсах и форумах: «Вертолёт 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.).

Структура и объем работы.

Диссертация объёмом 159 страниц содержит 41 рисунок, 3 таблицы и состоит из введения, 3-х глав, заключения, списка литературы из 120 наименований и приложения.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, определены объект и предмет исследования, сформулированы цель диссертации, задачи, решаемые 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 содержится информация о степени достоверности, апробации и внедрении результатов исследования.

В первой главе исследована статическая прочность ЛНВ вертолета при действии ветра на стоянке.

В *параграфе 1.1* сформулированы допущения, принятые при определении аэродинамических сил и рассмотрении устойчивости ЛНВ. Определена схема обтекания ЛНВ ветровым потоком (рисунок 2), включая скорости и углы атаки сечений лопасти. При определении критической скорости потери устойчивости ЛНВ рассматривался изгиб в плоскости ее наименьшей жесткости.

Предложен численный метод определения критической скорости ветра $V_{кр}$ для ЛНВ, а также получены аналитические зависимости

$$V_{кр} = \sqrt{2q_{кр}/\rho}, \quad q_{кр} = -\frac{2.11}{\delta_{в(неодн)}} \sin 2\chi, \quad \delta_{в(неодн)} = \int_0^l \frac{1}{EI(r)} \int_r^l \int_r^l C_n^\alpha(r) b(r) dr^3.$$

Результаты расчета критической скорости для ЛНВ, спроектированной для вертолетов типа Ми-8, приведены на рисунке 3.

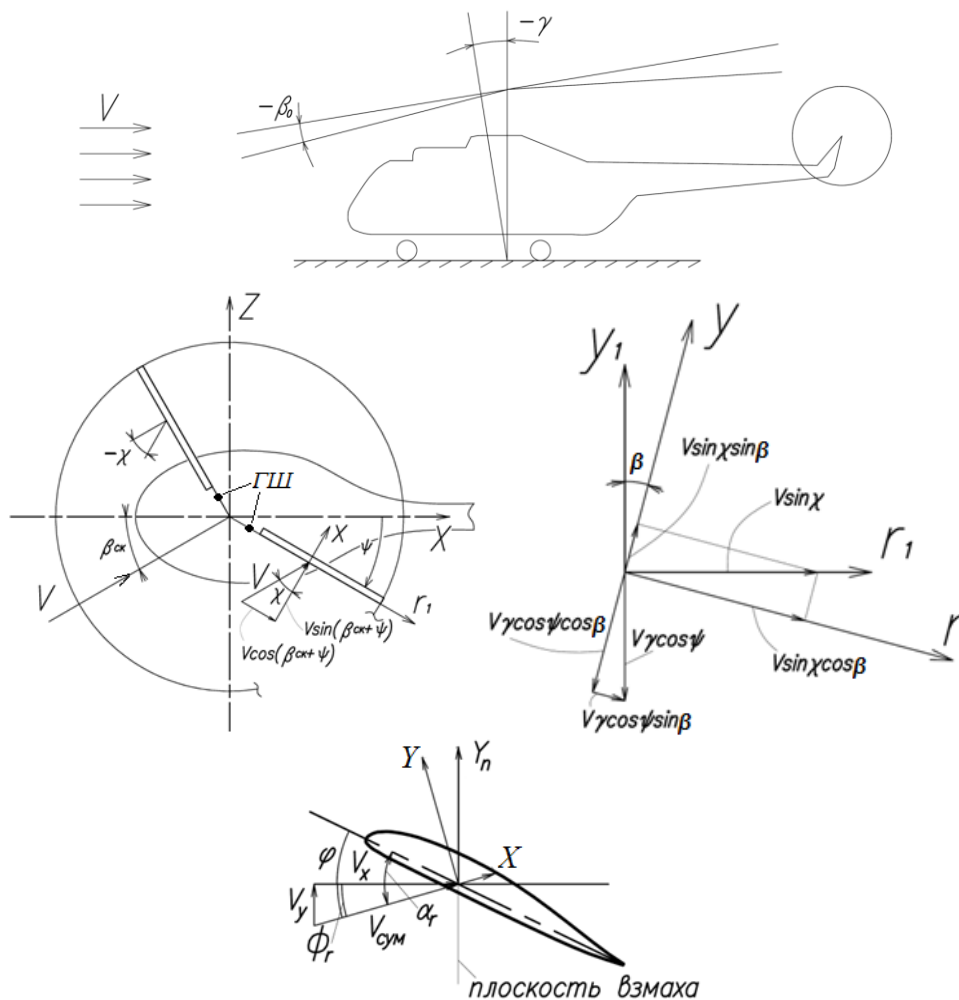
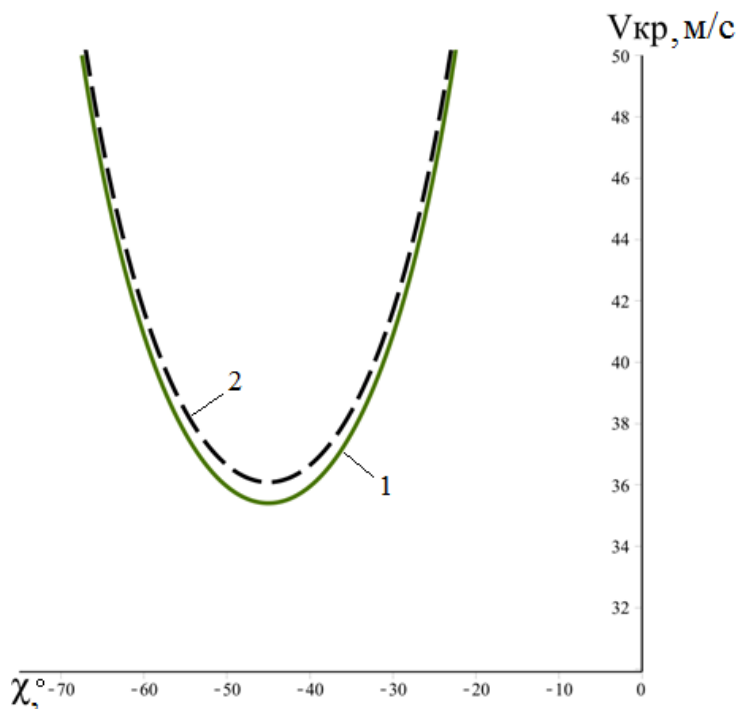


Рисунок 2 – Схема обтекания лопасти несущего винта ветровым потоком



1 – обдув с передней кромки, 2 – обдув с задней кромки

Рисунок 3 – Изменение критической скорости лопасти несущего винта в зависимости от направления обдува

Видно, что при заданном направлении обдува вертолета потеря устойчивости ЛНВ возможна лишь при отрицательных значениях угла скольжения лопасти χ .

Зависимость критической скорости от направления обдува лопасти имеет весьма пологий минимум в области $\chi = -45^\circ$, ($\psi = 135^\circ$ при обдуве лопасти с передней кромки при $\beta_{ск} = 0$). Минимальное значение критической скорости, соответствующее углу скольжения $\chi = -45^\circ$, составляет 35,4 м/с.

В параграфе 1.2 предложен метод расчета напряжений в незашвартованной ЛНВ на базе линейной модели нагружения. Рассмотрен изгиб лопасти в плоскости наименьшей жесткости. Для определения параметров напряженно-деформированного состояния лопасти (прогибов y , углов поворота θ , изгибающих моментов M и напряжений σ) под действием стационарного ветрового потока получены аналитические зависимости

$$y_{аж} = \frac{\rho V^2}{2} \cos^2 \chi \int_0^r \int_0^r \frac{1}{EI} \int_r^l \int_r^l C_n^\alpha b \alpha_{аж} dr^4 - \int_0^r \int_0^r \frac{1}{EI} \int_r^l \int_r^l mg dr^4,$$

$$\theta_{аж} = \frac{\rho V^2}{2} \cos^2 \chi \int_0^r \frac{1}{EI} \int_r^l \int_r^l C_n^\alpha b \alpha_{аж} dr^3 - \int_0^r \frac{1}{EI} \int_r^l \int_r^l mg dr^3,$$

$$M_{аж} = \frac{\rho V^2}{2} \cos^2 \chi \int_r^l \int_r^l C_n^\alpha b \alpha_{аж} dr^2 - \int_r^l \int_r^l mg dr^2,$$

$$y = K_B y_{аж}, \quad \theta = K_B \theta_{аж}, \quad M = K_B M_{аж}, \quad \sigma = M/W, \quad K_B = \frac{1}{1 + \frac{q \sin 2\chi}{q_{кр}^{\min}}}.$$

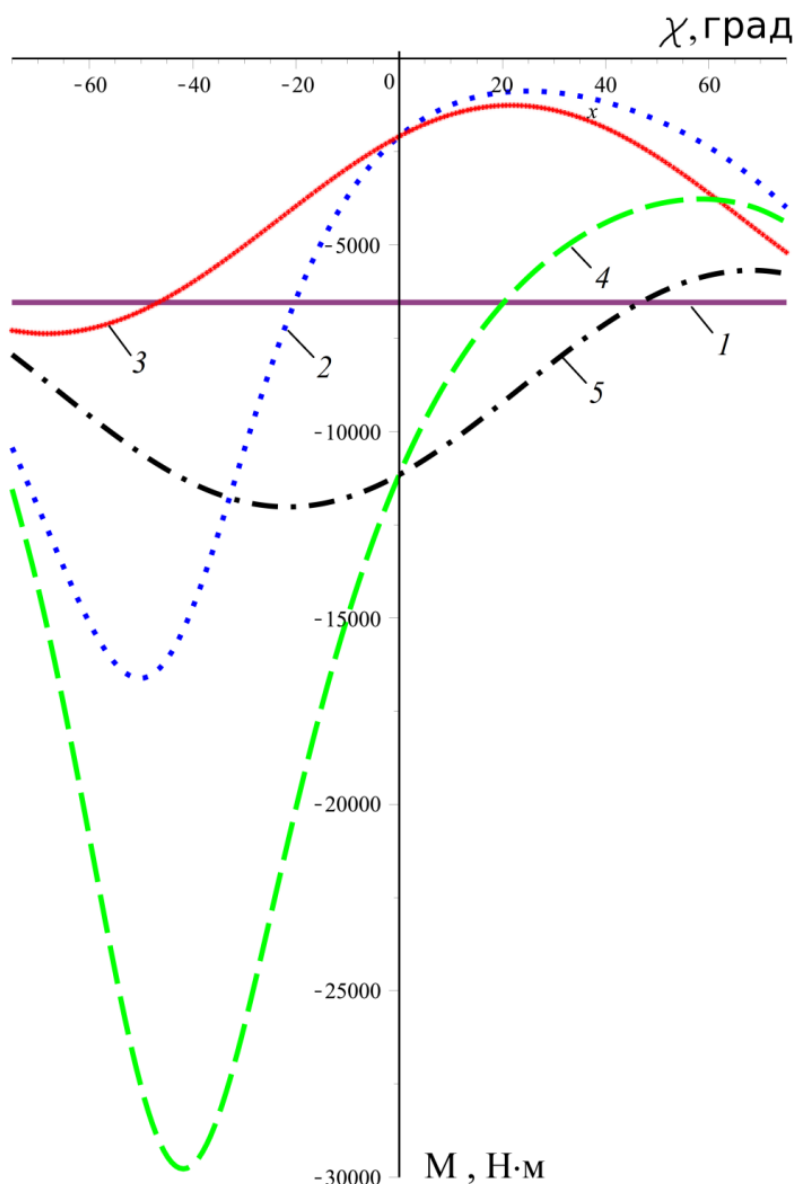
Данные выражения получены непосредственно через их значения для «аэрожесткой» лопасти, прогибы которой не изменяют углов атаки сечений.

По изложенной методике проведены расчеты изгибающих моментов в заделке ЛНВ, спроектированной для вертолетов типа Ми-8, в зависимости от угла скольжения при обдуве вертолета спереди вдоль его продольной оси, с учетом и без учета влияния упругих деформаций на распределение аэродинамической нагрузки. Результаты расчетов изгибающих моментов приведены на рисунке 4.

Как видно, упругость вносит существенные изменения в картину распределения изгибающих моментов. По мере возрастания скорости потока указанная закономерность проявляется сильнее.

В параграфе 1.3 предложен метод расчета напряжений в зашвартованной и незашвартованной ЛНВ на базе нелинейной модели нагружения. Полученное нелинейное уравнение зашвартованной ЛНВ при ветровом нагружении имеет вид

$$EI \frac{y''}{(1+y'^2)^{3/2}} = - \int_r^l \int_r^l mg dr^2 - N_{mp} (\sin \gamma_{mp} [r_l - r] + \cos \gamma_{mp} [y_l - y]) + \int_r^l \int_r^l Y_n (1 - \frac{y'^2}{2}) dr^2 + \int_r^l Y_n y' (y_l - y) dr.$$



1 – изгиб лопасти под действием массовых сил, 2 – обдув с задней кромки «аэроупругой» лопасти, 3 – обдув с задней кромки «аэрожесткой» лопасти, 4 – обдув с передней кромки «аэроупругой» лопасти, 5 – обдув с передней кромки «аэрожесткой» лопасти

Рисунок 4 – Изменение изгибающего момента в заделке лопасти при $\theta_0 = -5^\circ$, $V = 28$ м/с

В основе разработанного метода расчета напряжений в ЛНВ лежит метод последовательных возмущений параметров Петрова В.В. Ниже приведены расчеты, выполненные для ЛНВ вертолетов типа Ми-8. Сравнение распределений изгибных напряжений по длине лопасти, рассчитанных по предлагаемой методике (кривые 1) и методике, основанной на линейной модели нагружения (кривые 2), изложенной в *параграфе 1.2*, приведено на рисунке 5. Наблюдается хорошая сходимость результатов расчетов по линейной и нелинейной моделям нагружения

при малых скоростях ветра. По мере увеличения расчетной скорости ветра растет различие в расчетных значениях напряжений (рисунок 5, а). 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.

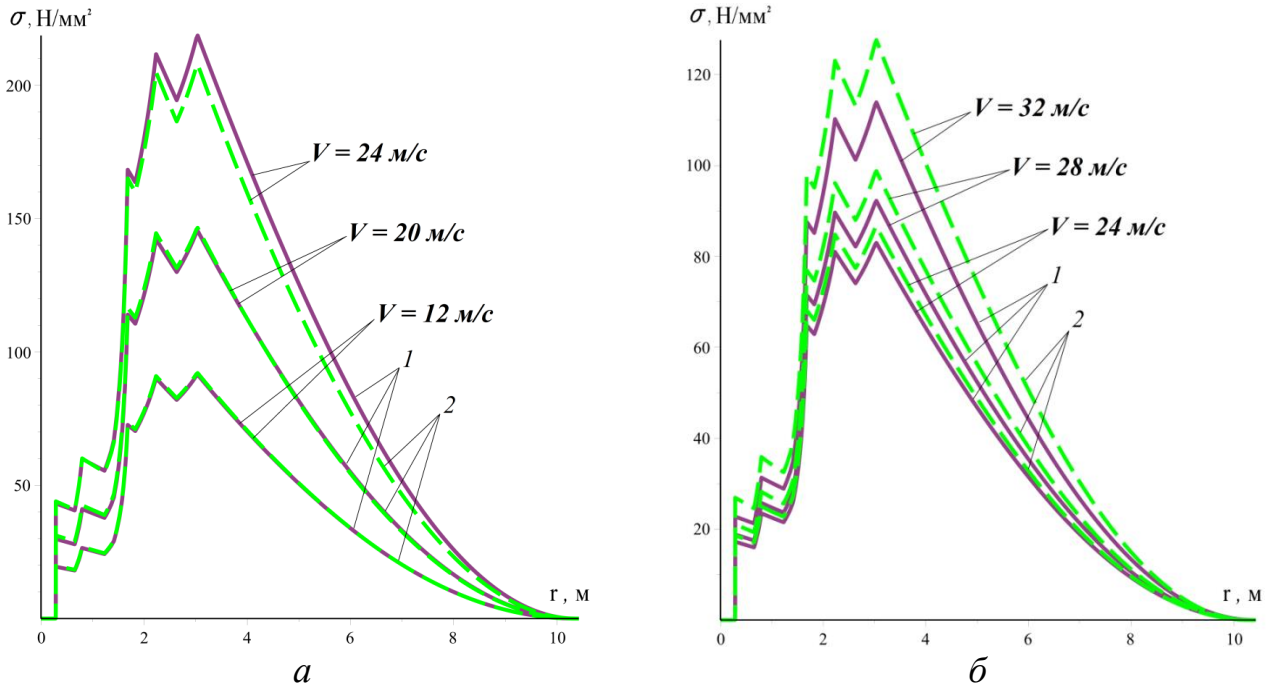


Рисунок 5 – Распределение изгибных напряжений по длине лопасти
 а – обдув с передней кромки при $\theta_0 = -10^\circ$, $\psi = 135^\circ$;
 б – обдув с передней кромки при $\theta_0 = 10^\circ$, $\psi = 150^\circ$

Отметим, что при углах скольжения χ , отстоящих от критического, и положительных углах θ_0 , удовлетворительная сходимость результатов расчетов на основе линейной и нелинейной моделей нагружения сохраняется до больших значений расчетной скорости ветра (рисунок 5, б). Выполненные по предложенным методикам расчеты показали, что изгибающие моменты (напряжения) от ветрового нагружения превосходят напряжения от действия массовых сил ЛНВ и, следовательно, должны учитываться при ее проектировании.

Важными параметрами, характеризующими нагруженность ЛНВ при ветровом воздействии, являются значения скоростей ветра, соответствующие предельным нагрузкам: $\sigma_{0,2}$ – предельное напряжение по условию прочности лонжерона лопасти; $M(0) = 0$ – условие взмаха лопасти над нижним упором горизонтального шарнира. Интерес представляют минимальные значения этих скоростей при наиболее неблагоприятных (критических) направлениях обдува.

На рисунке 6 приведены графики зависимости критических углов скольжения (рисунок 6, а) и соответствующих им значений предельных по условию прочности скоростей ветра (рисунок 6, б) в зависимости от угла установки, где: 1 – обдув с передней кромки, 2 – обдув с задней кромки.

Предельные скорости ветра по условию взмаха лопасти приведены на рисунке 7, где: 1 – обдув с задней кромки зашвартованной лопасти, 2 – обдув с передней кромки, незашвартованной лопасти, 3 – обдув с передней кромки зашвартованной лопасти, 4 – обдув с задней кромки, незашвартованной лопасти.

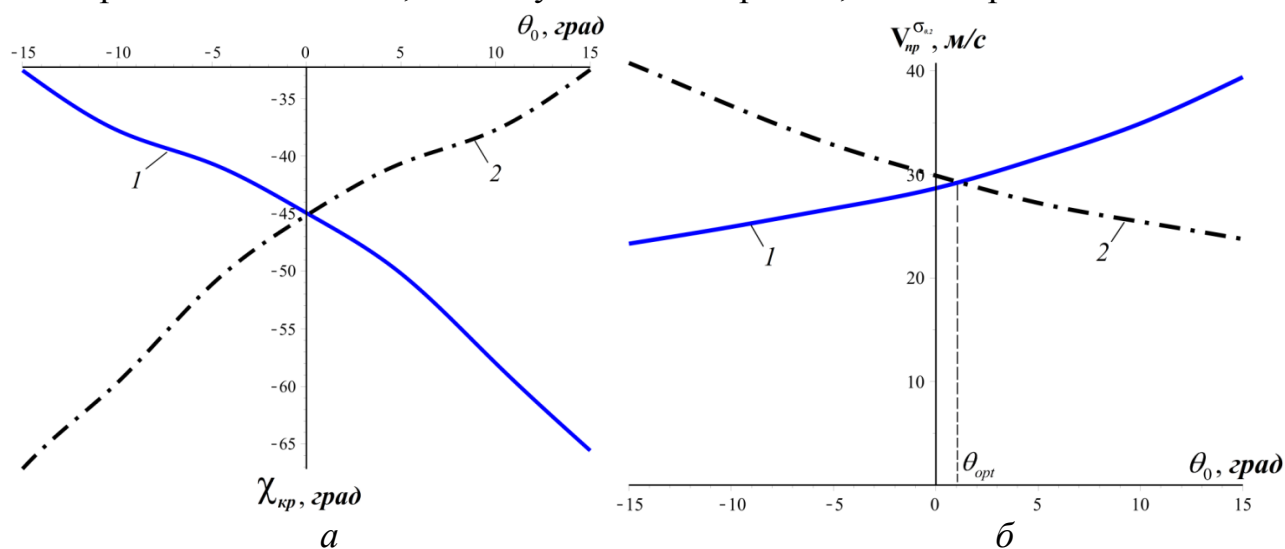


Рисунок 6 – Зависимости критического угла скольжения и соответствующих им значений предельных по условию прочности скоростей ветра от угла установки ЛНВ

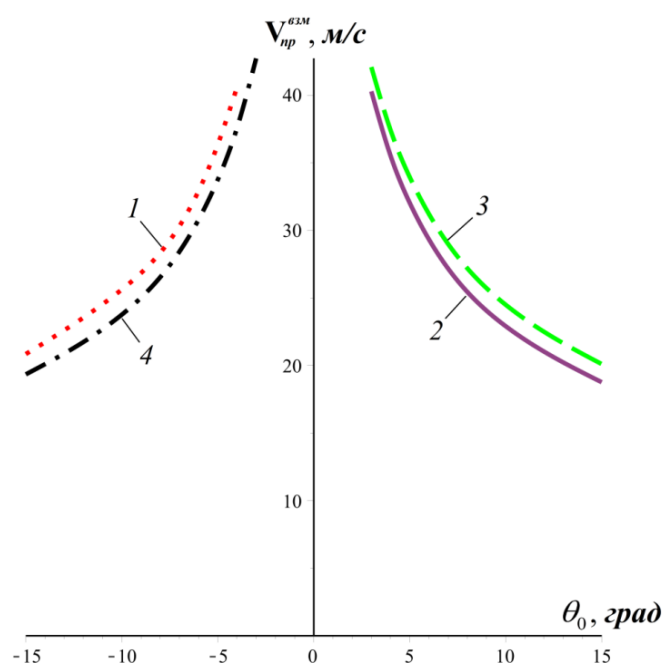
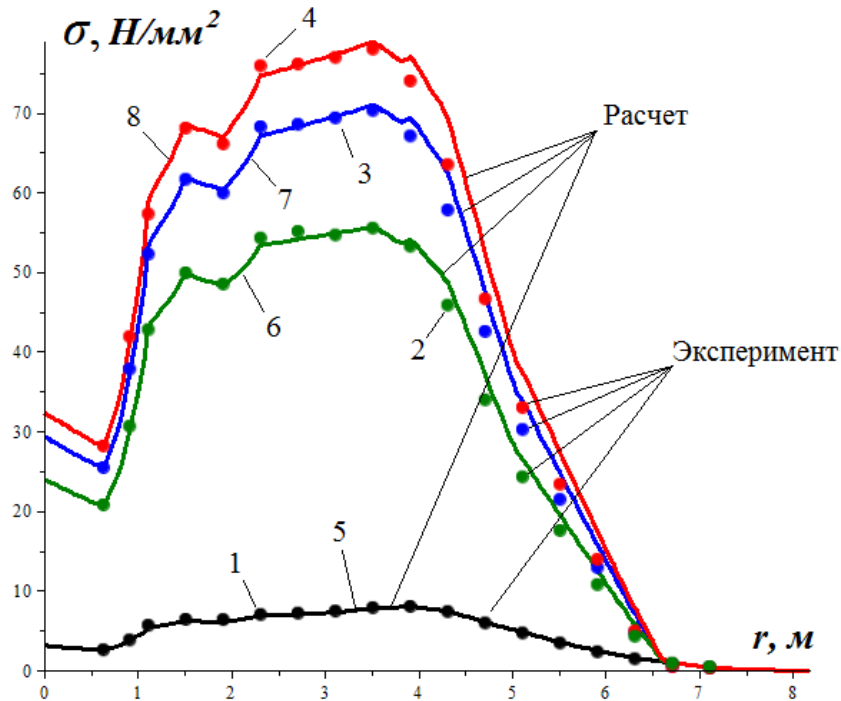


Рисунок 7 – Предельные по условию взмаха лопасти скорости ветра

Таким образом, значение предельной безопасной для эксплуатации горизонтальной скорости ветра составляет 18,7 м/с. Отметим, что в данном расчетном случае предельные скорости по условию взмаха для зашвартованной лопасти лишь немного превышают таковые для незашвартованной лопасти. Такой результат обусловлен двумя основными факторами: отсутствием предварительного натяжения швартовочного троса и малой его расчетной жесткостью на растяжение.

В параграфе 1.4 приведены экспериментальные исследования статической прочности ЛНВ при имитации ветровой нагрузки с помощью дискретно распределенной нагрузки. Для проверки точности статических расчетов напряжений в ЛНВ, выполненных в главе 1, использованы замеры напряжений в лопасти под действием массовых сил, а также под действием дискретно-распределенных нагрузок, выполненные в АО «НЦВ Миль и Камов». Результаты сравнения напряжений, возникающих в ЛНВ вертолета Ми-28 при рассматриваемых случаях нагружения, приведены на рисунке 8.



- 1 – эксперимент (нагружение под действием массовых сил лопасти);
 2 – эксперимент (1-й случай нагружения); 3 – эксперимент (2-й случай нагружения); 4 – эксперимент (3-й случай нагружения); 5 – расчет (нагружение под действием массовых сил лопасти); 6 – расчет (1-й случай нагружения);
 7 – расчет (2-й случай нагружения); 8 – расчет (3-й случай нагружения)

Рисунок 8 – Распределения напряжений по длине лопасти при рассматриваемых случаях нагружения

При испытаниях ЛНВ нагружалась статическим изгибающим моментом от дискретно распределенных поперечных сил, прикладываемых к лопасти с помощью ложементов, закрепленных в четырех сечениях, указанных на рисунке 9.

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.

На основе анализа полученных результатов можно судить об удовлетворительном совпадении результатов численного статического расчета напряжений в ЛНВ и экспериментальных данных.

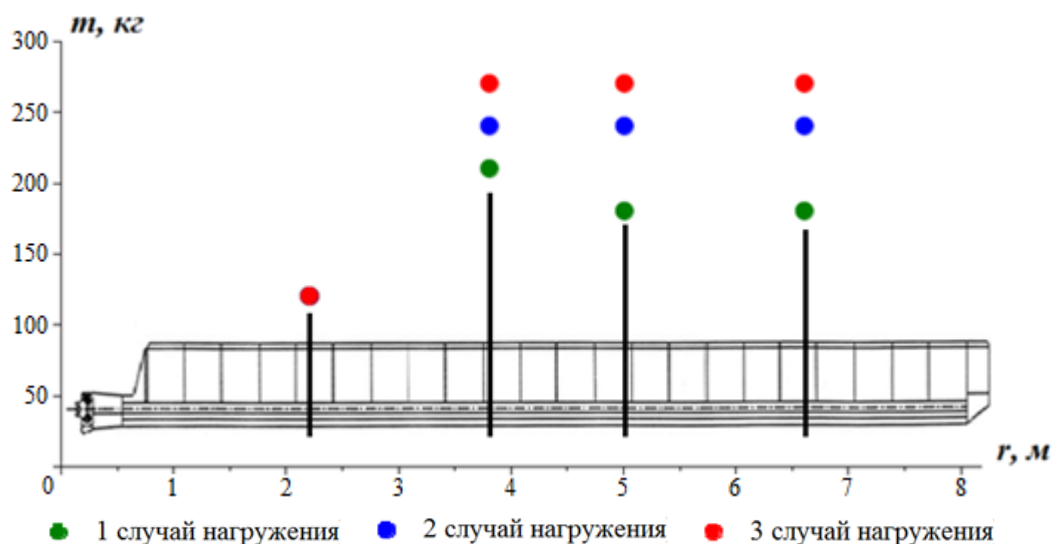


Рисунок 9 – Дискретно распределенное нагружение лопасти несущего винта

Во второй главе исследована динамическая прочность лопастей несущего винта вертолета при действии ветра на стоянке.

В параграфе 2.1 предложен метод расчета динамических напряжений в ЛНВ на базе нелинейной модели нагружения при нестационарном воздействии ветра.

Полученное нелинейное уравнение в частных производных зашвартованной лопасти при нестационарном ветровом нагружении имеет вид

$$m\ddot{y} + (EIy'')'' + \frac{3}{2}(EIy''y'^2)'' - (Ty')' + (N_{mp}^*y')' - Y_n(1 - \frac{y'^2}{2}) + mg + w_{mp} \sin \gamma_{mp} = 0.$$

В предложенном методе расчета напряжений в ЛНВ данное уравнение методом Галеркина Б.Г. приводится к системе дифференциальных уравнений. Для численного интегрирования этой системы использован метод Ньюмарка с применением дополнительных итерационных процессов на каждом шаге интегрирования по времени.

Ниже приведены расчетные зависимости, полученные для ЛНВ, спроектированной для вертолетов типа Ми-38, расположенной на азимуте $\psi = 90^\circ$, при действии порывов ветра разной интенсивности и продолжительности. При этом для расчетов по зависимости $V(t)$ с $V_{\max} = 25$ м/с выбран угол $\theta_0 = -10^\circ$, по зависимости $V(t)$ с $V_{\max} = 21$ м/с – угол $\theta_0 = 5^\circ$. Расчет зашвартованной лопасти проводился по обеим зависимостям скоростей ветра при силе предварительного натяжения швартовочного троса 0 Н и 100 Н.

Результаты расчетов приведены на рисунке 10, где обозначения кривых соответствуют расчетным случаям: 1 – $\theta_0 = -10^\circ$ и $N_{\text{тр}} = 100$ Н; 2 – $\theta_0 = -10^\circ$ и $N_{\text{тр}} = 0$ Н; 3 – $\theta_0 = 5^\circ$ и $N_{\text{тр}} = 100$ Н; 4 – $\theta_0 = 5^\circ$ и $N_{\text{тр}} = 0$ Н; 5 – $\theta_0 = -10^\circ$, лопасть не зашвартована; 6 – $\theta_0 = 5^\circ$, лопасть не зашвартована; 7 – изгиб лопасти под действием собственной массы.

Изменение прогибов конца лопасти по абсолютной величине приведены на рисунке 10, а. Расчетным для лопасти является момент времени, соответствующий наибольшему отклонению конца лопасти. При этом имеют место максимальные деформации лопасти, а в лонжероне действуют наибольшие изгибные напряжения. Распределения напряжений по длине лопасти, соответствующие наибольшим прогибам конца лопасти для заданных условий нагружения, приведены на рисунке 10, б. Совпадение зависимостей наибольших напряжений 1, 2 и 5 вызвано не работающей «вниз» швартовкой лопасти.

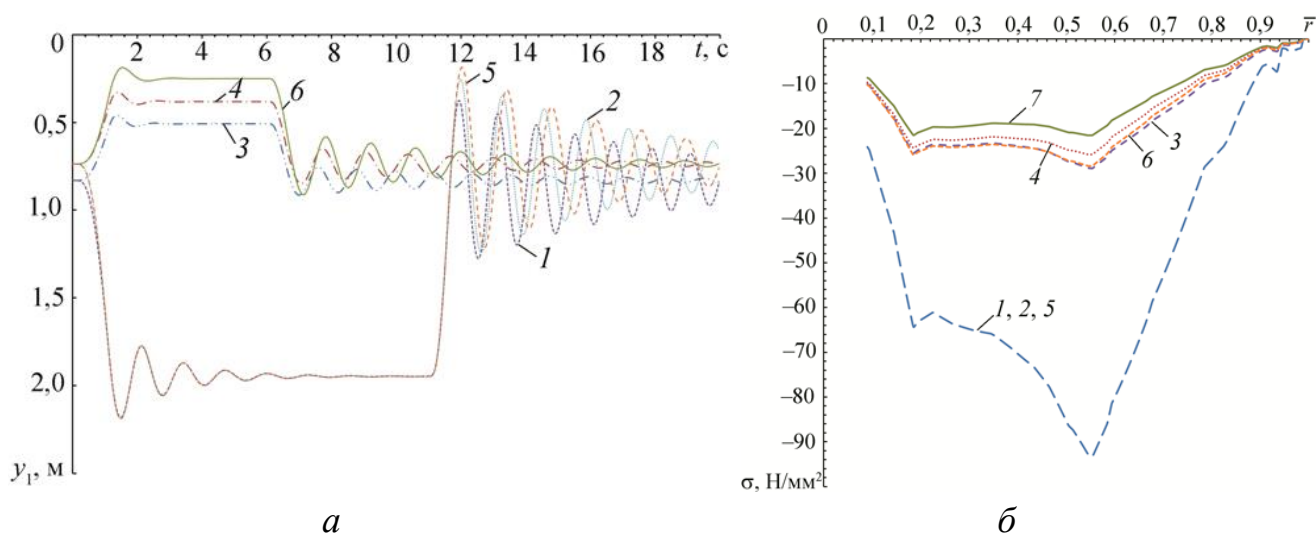
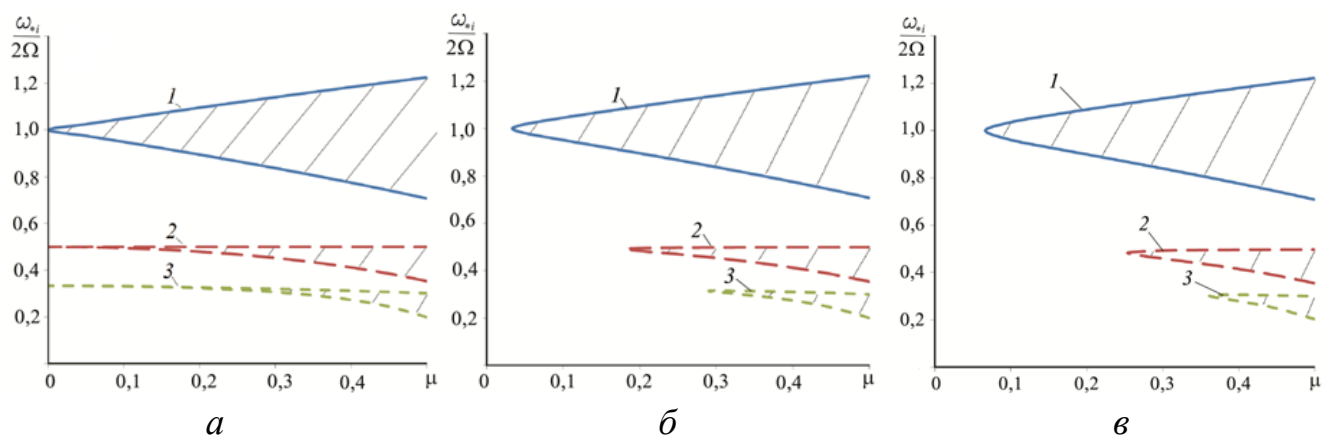


Рисунок 10 – Зависимости изменения прогибов конца лопасти от времени и распределения напряжений по длине лопасти для заданных расчетных случаев

В параграфе 2.2 исследована динамическая устойчивость ЛНВ при гармоническом воздействии ветра. 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. Расположение первых трех областей динамической неустойчивости на плоскости $(\mu, \omega_*/2\Omega)$ для незашвартованной лопасти, имеющей различные коэффициенты затухания ϵ , приведено на рисунке 11.

Для решения вопроса о динамической устойчивости ЛНВ на плоскости $(\mu, \omega_*/2\Omega)$ нужно найти точку, соответствующую данному соотношению параметров. Если точка попадает в незаштрихованную область, значит начальная форма лопасти динамически устойчива. Если же точка окажется в заштрихованной области, то будет иметь место динамическая неустойчивость лопасти. Наличие затухания делает невозможным наступления резонанса при достаточно малых коэффициентах возбуждения.



1 – главная область, 2 – вторая область, 3 – третья область

Рисунок 11 – Расположение областей динамической неустойчивости при различных значениях коэффициента затухания ε

$a - \varepsilon = 0$; $b - \varepsilon = 0,1$; $v - \varepsilon = 0,2$

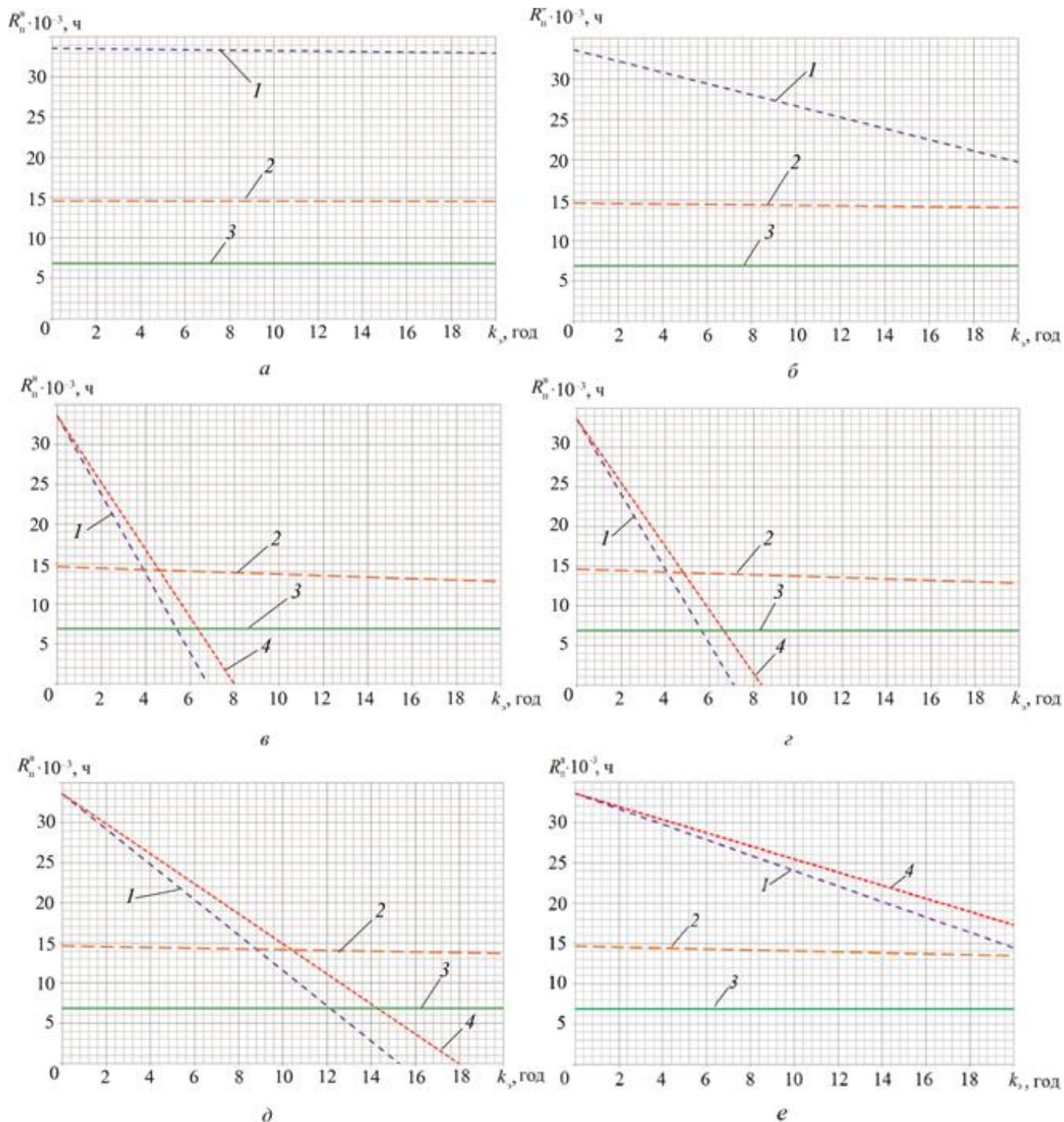
В параграфе 2.3 предложен метод расчета полетного ресурса ЛНВ с учетом воздействия ветра на стоянке. Получено уравнение для определения полетного ресурса ЛНВ с учетом полетного и ветрового спектров нагружения. Для расчета параметров уравнения совместно используются динамическая модель ветра, схематизация реализации ветра и метод расчета напряжений в ЛНВ, изложенный в параграфе 2.1. Расчеты полетного ресурса лопастей выполнены для трех городов РФ в пяти вариантах эксплуатации вертолета (рисунок 12).

В параграфе 2.4 приведены экспериментальные исследования ветрового воздействия на незашвартованные ЛНВ вертолета Ми-28 от индуктивного потока, создаваемого рядом стоящим вертолетом Ми-26. Принципиальная схема эксперимента по изучению ветрового воздействия на ЛНВ стоящего вертолета приведена на рисунке 13.

Зависимости полученных в эксперименте напряжений от времени, возникающих в ЛНВ вертолета Ми-28 при рассматриваемом случае нагружения, в сравнении с расчетными максимальными значениями напряжений, полученными для порыва ветра условной скорости ветра $V_{\text{ветра}} = 8,57$ м/с при углах $\theta_0 = -15^\circ$ и $\theta_0 = 10^\circ$, приведены на рисунке 14.

На основе анализа полученных результатов можно судить об удовлетворительном совпадении результатов численного динамического расчета напряжений в ЛНВ и экспериментальных данных.

В третьей главе предложен метод проектирования лопастей несущего винта вертолета, учитывающий ветровое воздействие. Рассмотрены текущие требования, предъявляемые к проектируемым ЛНВ, а также сформулированы дополнительные требования к лопастям, обусловленные воздействием ветра на стоянке вертолета.



1 – R_{Π}^B среднего участка лопасти, $t_{\text{сн}} = 100$ ч; 2 – R_{Π}^B комлевого участка лопасти, $t_{\text{сн}} = 100$ ч; 3 – R_{Π} без учета ветра; 4 – R_{Π}^B среднего участка лопасти, $t_{\text{сн}} = 1400$ ч

Рисунок 12 – Зависимости полетного ресурса ЛНВ от времени эксплуатации и годового налета вертолета

a – вариант 1; *б* – вариант 2; *в* – вариант 3; *г* – вариант 4; *д* – эксплуатация вертолета на территориях с малыми и большими среднегодовыми скоростями и изменчивостью ветра (вариант 5); *e* – вариант 3 с ограничением по эксплуатационной скорости ветра $V = 29,91$ м/с

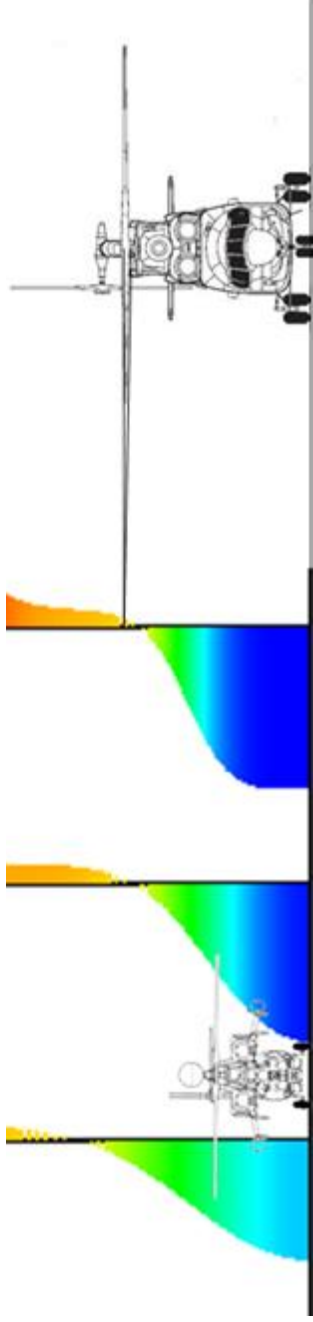
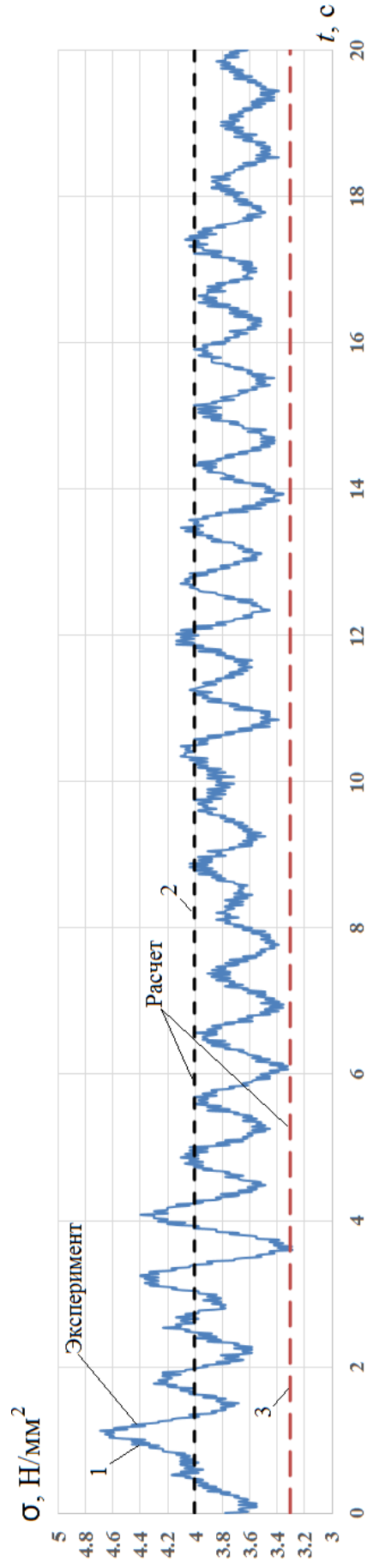


Рисунок 13 – Принципиальная схема эксперимента



1 – эксперимент; 2 – расчет при $\theta_0 = -15^\circ$; 3 – расчет при $\theta_0 = 10^\circ$
 Рисунок 14 – Сравнение напряжений в ЛНВ вертолета Ми-28, полученных экспериментальным и расчетным способами

Алгоритм предлагаемого метода проектирования ЛНВ, учитывающий явления ветрового нагружения (блоки выделены красным цветом штриховой линией) в виде блок-схемы приведен на рисунке 15. Каждый блок алгоритма предлагаемого метода проектирования ЛНВ, как и логика перехода между отдельными блоками, рассмотрены в тексте диссертационной работы.

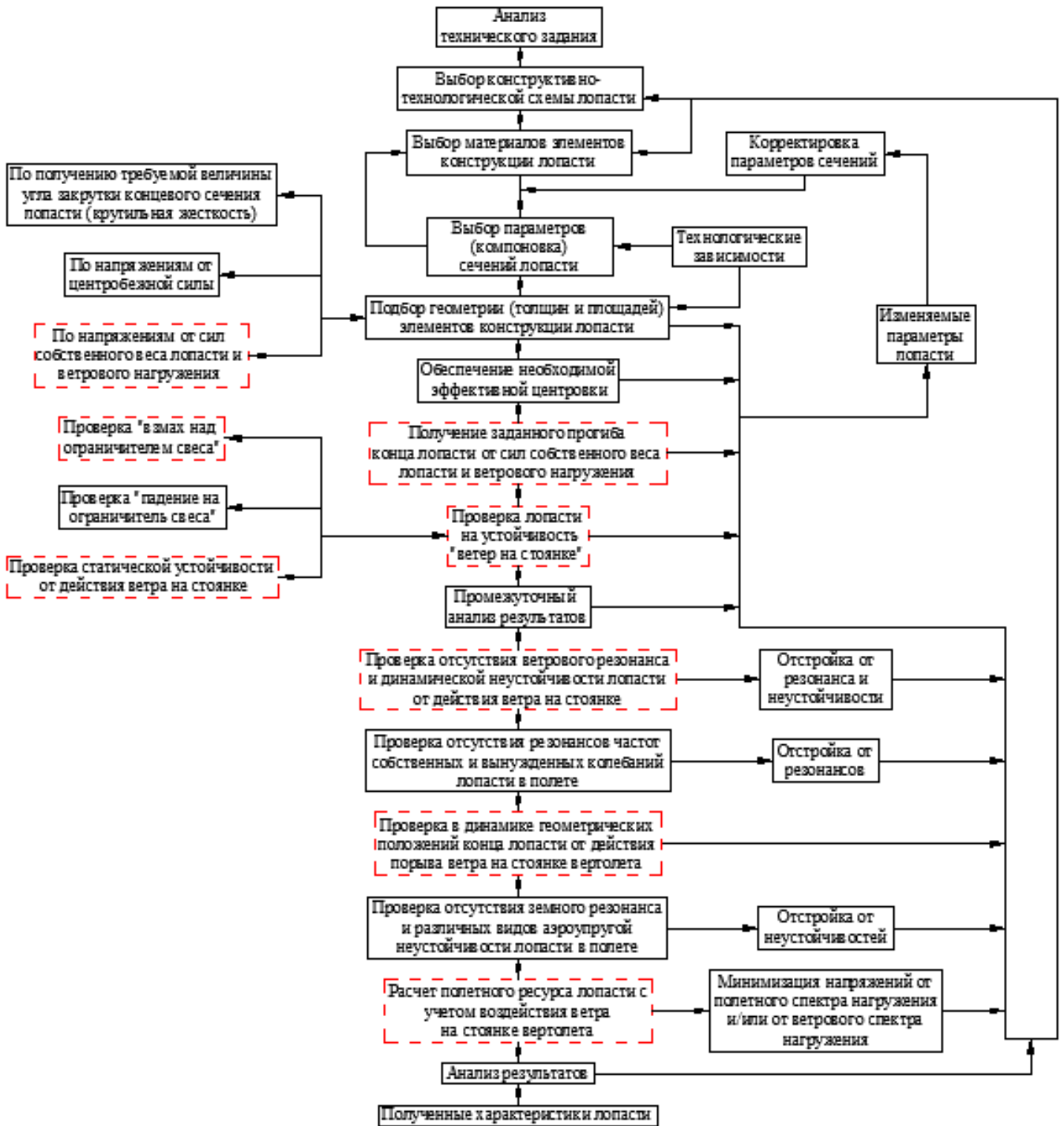


Рисунок 15 – Блок-схема алгоритма проектирования лопастей несущего винта вертолета с учетом явлений ветрового нагружения

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработан метод проектирования лопастей несущего винта вертолета с учетом ветрового воздействия, обеспечивающий их безопасную эксплуатацию в различных природно-климатических условиях, в том числе Арктической зоне. Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, изложены новые научно обоснованные технические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития авиационной промышленности страны. Достоверность полученных результатов подтверждена удовлетворительным совпадением результатов численных экспериментов с данными испытаний натуральных лопастей несущего винта. Практическая значимость работы подтверждена внедрением результатов исследований в АО «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова» и АО «ЮТэйр-Инжиниринг».

В ходе исследований решены следующие задачи:

1. Исследованы статическая и динамическая устойчивости лопасти несущего винта вертолета, находящейся на стоянке под воздействием ветра. Установлена возможность потери устойчивости невращающихся лопастей 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. Подтверждена необходимость учета напряжений в лопасти, возникающих под действием ветра, при ее проектировании.

3. Разработан метод определения полетного ресурса лопастей несущего винта вертолета с учетом ветрового спектра нагружения на стоянке вертолета. Установлено, что на величину ресурса лопастей влияет их ветровое нагружение на стоянке вертолета.

4. Сформулированы дополнительные требования к лопастям несущего винта вертолета, предназначенным для эксплуатации в условиях ветра. Среди них, на итоговые массово-жесткостные параметры лопасти в большей степени влияют требования не превышения допустимых величин напряжений и прогибов конца лопасти.

5. Дополнены существующие в практике ОКБ алгоритмы проектирования лопастей несущего винта в части учета дополнительных требований ветрового нагружения. Учет новых требований, обусловленных воздействием ветра на стоянке вертолета, не приводит к существенному усложнению существующей процедуры проектирования лопастей.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях

1. Каргаев, М.В. Статическая устойчивость незашвартованных лопастей несущего винта вертолета, находящегося на стоянке под воздействием ветра / М.В. Каргаев, Л.А. Мироненко // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25, № 2. – С. 43–51.
2. Каргаев, М.В. Расчёт изгибных напряжений в незашвартованной лопасти вертолётной обдуваемой ветровым потоком / М.В. Каргаев, Л.А. Мироненко // Вестник Московского авиационного института. – 2018. – Т. 25, № 3. – С. 34–43.
3. Каргаев М.В. Расчёт напряжений в лопасти несущего винта вертолета на базе нелинейной модели нагружения при статическом воздействии ветра / М.В. Каргаев // Вестник Московского авиационного института. – 2019. – Т. 26, № 2. – С. 34–42.
4. Каргаев, М.В. Расчет динамических напряжений в лопасти несущего винта вертолета на базе нелинейной модели нагружения при нестационарном воздействии ветра / М.В. Каргаев // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2020. – № 4. – С. 52–60.
5. Каргаев, М.В. Динамическая устойчивость лопасти несущего винта вертолета при гармоническом воздействии ветра / М.В. Каргаев // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2020. – № 11. – С. 21–31.
6. Каргаев, М.В. Расчет полетного ресурса лопасти несущего винта вертолета с учетом воздействия ветра на стоянке / М.В. Каргаев // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2021. – № 1. – С. 27–37.

Публикации в изданиях, индексируемых в базе данных SCOPUS

7. Kargaev, M.V. On the design of a helicopter rotor blades exposed to the wind flow/ M.V. Kargaev, Yu.M. Ignatkin // 45th European Rotorcraft Forum 2019. Proceedings of a meeting held 17-20 September 2019. – 2019. – Vol. 1. – P. 318-327.
8. Kargaev, M.V. Design issues of dynamics of helicopter main rotor blades under the influence of wind in the parking lot/ M.V. Kargaev, Yu.M. Ignatkin // 46th European Rotorcraft Forum 2020. Proceedings of a meeting held 8-11 September 2020. – 2020. – Vol. 1. – P. 130-141.

Другие публикации

9. Каргаев М.В. Особенности проектирования лопастей несущего винта арктического вертолета / М.В. Каргаев // Сборник тезисов работ международной научной конференции XLVII Гагаринские чтения 2021. – М.: Издательство «Перо», 2021. – С. 41-42.
10. Каргаев М.В. Анализ влияния ветра на эксплуатационные характеристики лопастей несущего винта вертолета / М.В. Каргаев // Молодежь. Техника. Космос: труды двенадцатой общерос. молодежн. науч.-техн. конф. В 4 т. Т. 1. – Спб.: Балт. гос. техн. ун-т, 2020. – С. 150-154.

11. Каргаев М.В. Динамическая прочность лопастей несущего винта вертолета в условиях наземной эксплуатации / М.В. Каргаев // 12-й Всероссийский конкурс «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики – 2020». 23-27 ноября 2020 года. Москва. Сборник аннотаций конкурсных работ. – М.: Типография «Логотип», 2020. – С. 191-192.

12. Каргаев М.В. Прогнозирование изменения полетного ресурса лопастей несущего винта вертолета, в связи с воздействием ветра на стоянке / М.В. Каргаев // 19-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 23-27 ноября 2020 года. Москва. Тезисы. – М.: Издательство «Перо», 2020. – С. 464-465.

13. Каргаев М.В. Определение областей динамической неустойчивости для лопасти несущего винта вертолета при гармоническом воздействии ветра. Г12 «Гагаринские чтения – 2020»: Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2020. – С. 66-67.

14. Каргаев М.В. Расчет динамических напряжений в лопасти несущего винта вертолета при действии ветра на стоянке / М.В. Каргаев // 18-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2019». 18-22 ноября 2019 года. Москва. Тезисы. – М.: Типография «Логотип», 2019. – С. 20-21.

15. Каргаев М.В. Анализ эффективности швартовки лопастей несущего винта вертолета при статическом воздействии ветра / М.В. Каргаев // Г12 «Гагаринские чтения – 2019»: Сборник тезисов докладов. – М.: МАИ, 2019. – С. 51.

16. Каргаев М.В. Безопасная эксплуатация вертолетной техники в условиях ветрового воздействия / М.В. Каргаев // 10-й Всероссийский межотраслевой молодежный конкурс научно-технических работ и проектов «Молодёжь и будущее авиации и космонавтики». Аннотации конкурсных работ. – М.: Моск. Авиационный ин-т (национальный исследовательский университет), 2018. – С. 57-58.

17. Каргаев М.В. Определение оптимального угла установки лопастей несущего винта вертолета, находящегося на стоянке, при статическом воздействии ветра / М.В. Каргаев // 17-я Международная конференция «Авиация и космонавтика – 2018». 19-23 ноября 2018 года. Москва. Тезисы. – М.: Типография «Люксор», 2018. – С. 25-26.

18. Каргаев М.В. К вопросу проектирования лопастей несущего винта вертолета, подверженных воздействию ветрового потока / М.В. Каргаев // Итоги диссертационных исследований. Том 2. – Материалы X Всероссийского конкурса молодых ученых. – М.: РАН, 2018. – С. 45-53.

19. Каргаев М.В. Расчёт напряжений в незашвартованной лопасти несущего винта вертолета находящегося на стоянке, при статическом воздействии ветра / М.В. Каргаев, Л.А. Мироненко // Гагаринские чтения – 2018: XLIV Международная молодёжная научная конференция: Сборник тезисов докладов. Том 1. – М.: Моск. Авиационный ин-т (национальный исследовательский университет), 2018. – С. 52.