

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе ФГБОУ ВО
«Московский авиационный институт
(национальный исследовательский
университет)» МАИ



д.т.н., профессор
Ю.А. Равикович

(подпись)

«19» сентября 2018 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)» МАИ, г. Москва

на диссертационную работу **Бобкова Владимира Георгиевича**

«Численное моделирование обтекания винта вертолета

и определение аэроакустических характеристик», представленную к защите на
соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по
специальности

**05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и
комплексы программ**

Диссертационная работа Бобкова В.Г. посвящена развитию
численных методов моделирования винта вертолета и созданию
программного комплекса для определения его аэродинамических и
акустических характеристик.

1. Актуальность темы исследований

В современном вертолетостроении большое внимание уделяется
оптимизации аэродинамических и акустических характеристик винтов
вертолета. Производители стремятся, как достичь высокого

аэродинамического качества винта, так и снизить акустический шум производимый винтами. Ранее для подобной оптимизации использовались натурные эксперименты, но в настоящее время для этого все чаще применяется вычислительный эксперимент. Применение вычислительных методик для определения аэродинамических и акустических характеристик винта на ранних этапах проектирования вертолета позволяет существенно сократить ресурсоемкость процесса разработки и существенно повысить точность определения характеристик винта.

Численное моделирование обтекания винта вертолета является сложной задачей и требует использования специальных численных методик в силу существенной нестационарности потока, широкого диапазона изменения скоростей вблизи лопасти и сложной геометрии винта. Еще больше усложняет задачу необходимость моделирования акустического поля как вблизи винта, так и в дальнем поле, требующая использования методов повышенной точности.

Несмотря на то, что существующие методики моделирования обтекания винта на основе вихревых теорий, позволяют достаточно быстро определять аэродинамические характеристики винта, точность этих методов недостаточно высока для определения акустических свойств винта. Сейчас наиболее востребованными для моделирования обтекания винта вертолета и акустического поля вблизи винта являются сеточные методы на основе полного газодинамического описания на основе уравнений Навье-Стокса. При этом вычислительные мощности современных суперкомпьютеров не позволяют за адекватное время смоделировать акустическое поле на основе полного газодинамического описания вдали от винта с той же точностью, что и в ближнем поле. Для моделирования акустики в дальнем поле необходимо использование специальных методик на основе решения волнового уравнения. Диссертационная работа Бобкова В.Г. посвящена разработке и исследованию современных численных методик моделирования обтекания

винта вертолета для определения аэродинамических и акустических характеристик как в ближнем, так и в дальнем полях.

2. Новизна полученных результатов

Результаты, представленные в работе, являются новыми. Автором впервые сформулирован и применен метод расчета акустических характеристик винта вертолета с использованием интегрального метода Фокса Уильямса-Хокинга, с параметризацией контрольной поверхности в инерциальной, связанной с фюзеляжем вертолета, системе координат, отличной от расчетной неинерциальной вращающейся системы координат, связанной с винтом вертолета. Автором разработана многомодельная методика проведения промышленно-ориентированных расчетов по оценке аэродинамических и акустических характеристик несущего винта вертолета на основе уравнений Навье-Стокса, записанных в неинерциальной вращающейся системе координат.

3. Достоверность полученных результатов

Достоверность результатов работы обоснована и подтверждена согласованностью результатов численного эксперимента с аналитическими решениями тестовых задач, а также согласованностью характеристик винтов вертолета, полученных в результате расчетов, с экспериментальными данными.

4. Значимость полученных результатов

Теоретическая значимость работы заключается в построении новой математической модели для описания распространения акустических колебаний в дальнем поле вращающегося винта на основе интегрального метода Фокса Уильямса-Хокинга, с параметризацией контрольной поверхности в инерциальной системе координат. В работе построена карта моделей, позволяющая оптимальным образом выбрать математические

модели в зависимости от режима эксплуатации винта и требований по составу и точности определяемых характеристик.

Практическая значимость результатов состоит в реализации разработанных алгоритмов в параллельном промышленно-ориентированном комплексе программ для расчета аэродинамических и акустических характеристик винта вертолета. Разработанный комплекс программ позволяет существенно снизить стоимость разработки новых и модернизации существующих моделей вертолетов за счет сокращения числа натуральных экспериментов и существенного ускорения процесса оптимизации винта вертолета. Программный комплекс внедрен в практическую деятельность АО «Камов» и может быть использован в рабочем процессе на этапах проектирования вертолетов на отечественных вертолетостроительных предприятиях «Московский вертолетный завод им. М. Л. Миля», «Казанский вертолетостроительный завод», а также в исследовательских институтах таких как «ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского» и «Московский авиационный институт».

5. Общая характеристика работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка цитируемой литературы из 112 наименований и трех приложений. Общий объем диссертации составляет 176 страниц.

Во введении автором обоснованы актуальность, научная новизна и практическая значимость работы, сформулированы цели и задачи. Приведен обзор существующих методик определения характеристик винта вертолета, сформулированы положения, выносимые на защиту. Также приведена краткая структура диссертации.

В первой главе диссертации описана многомодельная методика, позволяющая выбрать оптимальный набор моделей для ближнего и дальнего полей в зависимости от режима эксплуатации винта, набора характеристик,

которые необходимо определить, требованиям к точности определения характеристик и имеющимися вычислительными ресурсами. Для моделирования течения в ближнем поле используется полное газодинамическое описание на основе уравнений Навье-Стокса, записанных в неинерциальной вращающейся системе координат с использованием вихреразрешающих подходов для описания турбулентности. Моделирование распространения акустических возмущений в дальнем поле производится с помощью оригинальной методики на основе интегрального уравнения Фокса Уильямса – Хокинга.

Во второй главе дано описание численных методов, используемых для проведения расчетов по моделям, приведенных в первой главе. Приводится схема повышенной точности для гибридных неструктурированных сеток на основе квазиодномерной реконструкции переменных для уравнений Навье-Стокса. Сформулирована методика моделирования течения в широком диапазоне скоростей. Далее следует вывод оригинальной методики моделирования распространения акустических возмущений в дальнем поле на основе интегральной формулы Фокса Уильямса – Хокинга и результаты ее верификации. Также во второй главе приводится описание методов моделирования течений в широком диапазоне чисел Маха, что является существенным моментом при моделировании вращающегося винта вертолета, при котором скорость потока вблизи лопасти прямо пропорциональна удалению от оси вращения.

Третья глава посвящена реализации описанных численных методик в параллельном проблемно-ориентированном программном комплексе. Описаны структура вычислительного ядра комплекса, и структура входящих в состав комплекса модулей, в том числе модуль подготовки и преобразования расчетной сетки, модули расчета аэродинамических и акустических характеристик винта вертолета. Также приведено описание

реализованной в ходе разработки системы автоматического регрессионного тестирования программного комплекса.

Четвертая глава носит валидационный характер – в ней автор приводит результаты численного моделирования различных конфигураций винтов вертолета в режиме осевого обтекания с использованием разработанного программного комплекса. Приведены результаты решения задачи о моделировании винта Карадонны-Танга. Показано, что распределение коэффициента давления по поверхности лопасти, полученное в расчете, хорошо согласуется с экспериментальными данными. Приведенное сравнение положения ядра концевой вихря хорошо согласующиеся с данными эксперимента в областях с достаточным сеточным разрешением. Далее приведены результаты численного моделирования модельного винта КНИТУ-КАИ, винта АО «Камов» типа «винт в кольце» и модельного несущего винта АО «Камов» сложной геометрической конфигурации. Для всех исследуемых конфигураций сравнение характеристик винта, полученных в численных расчетах, показывают удовлетворительное согласование с экспериментальными данными.

В заключении работы сформулированы основные выводы и результаты работы, среди которых можно выделить следующие:

1) разработана методика моделирования обтекания винта вертолета на основе системы уравнений Навье-Стокса в неинерциальной вращающейся системе координат и сформулирована карта моделей, позволяющая сделать оптимальный выбор набора моделей для проведения численного эксперимента;

2) разработан оригинальный численный алгоритм расчета акустических характеристик винта вертолета на основе интегрального метода Фокса Уильямса– Хокинга для оценки шума в дальнем поле;

3) создан проблемно-ориентированный программный комплекс для расчета аэродинамических и акустических характеристик винта вертолета.

В приложении А работы приводится подробный вывод вида системы уравнений Навье-Стокса в неинерциальной вращающейся системе координат.

Приложения Б и В содержат вспомогательные формулы.

Материалы диссертации опубликованы в 24 печатных работах, из них 7 статей - в рецензируемых изданиях, входящих в список ВАК, 2 статьи в сборниках трудов конференций и 15 тезисов докладов.

6. Замечания к работе

В ходе рассмотрения диссертации и автореферата были сделаны следующие замечания:

1) в диссертации на стр. 44 в формуле для осредненного давления допущена ошибка – размерность интеграла не совпадает с размерностью давления;

2) в разделе 2.3, посвященном верификации методики моделирования акустических характеристик в дальнем поле, в постановке верификационной задачи предполагается измерение пульсаций давления в точках сильно удаленных от источников, однако выбранные контрольные точки располагаются на расстоянии 106 радиусов контрольной поверхности от источника, которое представляется недостаточно большим;

3) не приведено решений задач, позволяющих судить о точности реализованного алгоритма определения акустических характеристик винта в дальнем поле;

4) в задаче о моделировании винта АО «Камов» на графике поляры винта при сравнении результатов расчета с экспериментальными данными приведены только результаты DES-расчета, что не позволяет в полной мере судить о качестве используемой модели.

Указанные замечания не снижают ценности представленной диссертационной работы и положительного впечатления о ней.

7. Соответствие диссертационной работы требованиям, предъявляемым к диссертациям

Содержание диссертационной работы в полной мере соответствует паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: автором разработаны и реализованы в виде комплекса программ оригинальные модели и численные методы, которые применены для моделирования обтекания винта вертолета и определения его характеристик.

Автореферат правильно в полной мере отражает содержание диссертации.

Текст диссертации написан понятным языком, хорошо структурирован и дает достаточное представление о целях и задачах, решаемых в работе, а также об основных положениях и результатах исследований. Представленная диссертация является самостоятельной научной работой, результаты которой могут использоваться при проектировании вертолетов и уже используются в практической деятельности АО «Камов».

8. Заключение

Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, выполненной на высоком научно-техническом уровне, которая решает задачу численного моделирования винта вертолета в режиме осевого обтекания, имеющую существенное значение для создания и совершенствования авиационной техники.

Диссертационная работа «Численное моделирование обтекания винта вертолета и определение аэроакустических характеристик» удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор Бобков Владимир Георгиевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 05.13.18 – «Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ».

Отзыв обсужден, одобрен и утвержден в качестве официального отзыва на расширенном заседании кафедры 102 «Проектирование вертолётов» с участием специалистов кафедры 806 «Вычислительная математика и программирование», протокол № 2 от 18 сентября 2018 г.

Отзыв составили

Игнаткин Юрий Михайлович,
кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой 102
«Проектирование вертолётов»



Ю.М. Игнаткин

Колесник Сергей Александрович,
доктор физико-математических наук,
доцент, профессор кафедры 806
«Вычислительная математика и
программирование»



С.А. Колесник

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» МАИ

Почтовый адрес:

125993, Российская Федерация, г. Москва, Волоколамское шоссе, д. 4, г.

Москва, А-80, ГСП-3

Телефон: +7 (499) 158-29-77; 44-74; 46-10; 48-35

E-mail: mai@mai.ru, k102@mai.ru