

## **ОТЗЫВ**

официального оппонента, кандидата технических наук,

**Ивчина Валерия Андреевича**

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 решению важной проблемы современного вертолетостроения – разработке современных методов для расчета аэродинамических и акустических характеристик несущего и рулевого винтов вертолета.

Проектирование винтов вертолета являются важной комбинированной задачей, в которой требуется определять аэродинамические, динамические, прочностные и акустические характеристик винтов. Как правило, решением такой задачи является комплекс компромиссных конструктивных решений, поиск которых требует наличие точной методики расчета каждого из указанных параметров винтов. В настоящее время наименее разработанными методами являются методы расчета акустических параметров винтов. Эта задача является наиболее сложной и ресурсоемкой, так как требует наличия методов расчета распределения аэродинамических нагрузок по размаху лопасти.

В связи с этим, в диссертации разрабатываются новые расчетные методы, которые позволяют на этапе проектирования вертолета определять и подбирать оптимальную геометрическую конфигурацию лопастей несущего и рулевого винтов, обеспечивающую минимальный

уровень шума в дальнем поле в сочетании с хорошими аэродинамическими характеристиками винтов вертолета

## 1. АКТУАЛЬНОСТЬ ДЛЯ НАУКИ И ПРАКТИКИ

Актуальность темы исследований определяется большим научным и практическим интересом к проблемам аэродинамики и акустики вертолетов со стороны разработчиков современных гражданских и военных вертолетов России с ее огромными, порой труднодоступными, территориями. Россия остро нуждается в летательных аппаратах, которым не требуется специально подготовленных площадок и которые могут обеспечить доставку людей и грузов практически в любую местность. Этими аппаратами могут быть только вертолеты и винтокрылые летательные аппараты, которые в процессе эксплуатации не требуют специально подготовленных взлетно-посадочных площадок. Создание таких аппаратов невозможно без солидной теоретической и экспериментальной базы, точных и достоверных методов расчета.

Одной из важных проблем при выполнении расчетов в области аэродинамики вертолета является аэродинамическое проектирование лопастей винтов вертолетов. От качества лопастей винтов вертолета зависит, каким будет проектируемый вертолет и обеспечит ли он необходимую эффективность эксплуатации. В отличие от методов расчета крыла, которое работает практически в стационарном режиме обтекания, сечения лопастей несущего винта при поступательном полете вертолета, обтекаются существенно нестационарным потоком, который постоянно меняет свои параметры: по отношению к сечению лопасти. Изменения обтекания сечений лопасти касаются скорости потока, чисел Маха, чисел Рейнольдса, углов атаки и скольжения. Разработка методов расчета такого обтекания является весьма сложной задачей, которая требует своего решения.

С другой стороны, для расчета акустических характеристик винтов в дальнем поле знания нагрузок на лопастях винтов вертолета является необходимым, но не достаточным условием. Для расчета акустических характеристик винтов требуется наличие методов, которые позволяют анализировать распределенные нагрузки на лопастях и определять их влияние на акустические параметры среды в заданной точке пространства.

В настоящее время главным методом получения реальных акустических характеристик несущих, рулевых винтов и вертолета в целом являются натурные эксперименты. Некоторое качественное и количественное представление об акустических характеристиках винтов могут дать и экспериментальные исследования моделей винтов в аэродинамических трубах. Однако последние являются весьма

приближенными методами, поскольку переход от моделей к натуре весьма сложен и недостоверен. В целом, экспериментальные и натурные методы определения акустических характеристик винтов вертолета очень трудоемки и дороги.

В настоящее время появились современные расчетные методы, которые позволяют заменить экспериментальные исследования вычислительным экспериментом, стоимость и трудоемкость которого значительно ниже по сравнению с экспериментальными и натурными исследованиями акустических характеристик винтов вертолета. Применение таких расчетных методов позволяет на этапах разработки проектов вертолетов оперативно оценивать аэродинамические и акустические характеристики винтов вертолета и вносить необходимые изменения в аэродинамические компоновки лопастей винтов. В настоящее время степень изученности и понимания в вопросах обтекания лопастей винтов вертолета и их акустических характеристик, особенно в присутствии фюзеляжа, нельзя считать завершенной. Поэтому актуальным остается развитие и совершенствование вычислительных методов на основе новых научных подходов и математических методах их реализации.

Указанные проблемы говорят об актуальности представленной работы и ее практической значимости для отечественной вертолетной промышленности, усилия которой направлены на обеспечение передового уровня в области проектирования и производства российских вертолетов. Эта цель может быть достигнута только путем разработки новых расчетных методов, обеспечивающих прогресс летно-технических, экологических и эксплуатационных характеристик, расширение сфер и условий военного и гражданского применения вертолетов.

Главной целью рассматриваемой работы является:

- Разработка и реализация методов в комплексе программ для расчета аэродинамических и акустических характеристик винтов вертолета с применением численного моделирования их обтекания;
- Разработка вычислительного метода расчета вращающегося винта вертолета на различных режимах полета;
- Разработка параллельных алгоритмов повышенной точности для расчета на сетках больших размеров;
- Разработка алгоритмов повышенной точности для расчета акустических параметров винтов вертолета в дальнем поле.

## 2. ОСНОВНЫЕ НАУЧНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Диссертация состоит из введения, четырех разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка цитируемой литературы из 112 наименований. Общий объем диссертации составляет 176 страниц текста вместе с иллюстрациями и таблицами.

Во введении автор обосновывает актуальность задачи, определяет область и цели исследований, проводит обзор существующих расчетных методов, обосновывает актуальность работы и приводит основные положения, вынесенные на защиту. Приводится краткая структура диссертации.

Первая глава содержит описания многомодельной методики расчета аэродинамических и акустических характеристик винтов вертолета на основе решений уравнений Навье-Стокса. В ней рассматриваются принятые в работе допущения, способы создания расчетных сеток и сопряжение различных модельных областей между собой путем разработки правильных граничных условий. В работе выделяются три расчетные области, в каждой из которых используется своя собственная модель. Особенное внимание уделяется области, в которой находится вращающийся винт с конечным числом лопастей.

Проведен анализ основных режимов полета вертолета, существующих методов расчета этих режимов, разработанных на основе решения уравнений Навье-Стокса, и рекомендованы методы оптимальные для каждого из этих режимов.

Вторая глава посвящена разработке численных алгоритмов моделирования течения около винтов и расчета шума в дальнем поле. Сформулирована «экономная» разностная схема повышенной точности на основе квазиодномерной реконструкции переменных на гибридных неструктурированных сетках. Также приведен метод моделирования газодинамического течения в широком диапазоне скоростей, свойственном обтеканию лопастей винтов вертолета, как на осевых режимах, так и на режимах с поступательной скоростью полета. Рассмотрены три основных подхода для решения этой задачи. Обосновывается выбор низкоскоростной модификация метода Роу для решения задач, поставленных в рассматриваемой работе.

В данной главе рассматривается реализация метода моделирования шума винта дальнем поле. В работе разработан модифицированный алгоритм расчета шума винта в дальнем поле, обеспечивающий более скоростной метод расчета с интерполяцией необходимых физических параметров и их производных в ближнем поле в фиксированных точках неподвижной осесимметричной контрольной поверхности.

Представлены результаты решения ряда тестовых задач по разработанному алгоритму, которые демонстрируют работоспособность разработанных расчетных методов.

В третьей главе представлено описание состава программного комплекса, предназначенного для расчетов аэродинамических и акустических характеристик винтов вертолета, который разработан на базе алгоритмов, представленных в предыдущих разделах диссертации. Одним из важных особенностей разработанного комплекса является система автоматического регрессионного тестирования работоспособности всего комплекса, позволяющая контролировать качество разрабатываемого кода.

Четвертая глава посвящена моделированию аэродинамических и акустических характеристик винтов вертолета различных модификаций на режимах осевого обтекания.

Проведено моделирование характеристик двухлопастного модельного винта, результаты экспериментальных исследований которого представлены в работах Карадонны и Танга. Проведенные сравнения результатов расчета траектории концевой вихря лопастей винта, а также распределение коэффициента давления на поверхности лопасти по методике, разработанной в диссертации, хорошо согласуются с результатами эксперимента в области достаточного сеточного разрешения.

Было выполнено моделирование акустических параметров модельного винта и сравнение полученных результатов с экспериментальными данными, полученными в КНИИТУ-КАИ. Результаты сравнения данных эксперимента и расчета показали хорошее соответствие, что показывает пригодность разработанного численного метода расчета акустических характеристик винта для практического применения.

Третий вычислительный эксперимент был выполнен для расчета аэродинамических и акустических характеристик винта в кольце, модель которого была разработана и испытана на АО "КАМОВ". Результаты расчетов, полученных в вычислительном эксперименте для винта хорошо сходятся с результатами эксперимента. В вычислительном эксперименте были рассчитаны также акустические характеристики системы "винт в кольце", которые в модельном эксперименте не были получены.

Четвертый вычислительный эксперимент был проведен для модельного винта, также разработанного и испытанного на АО "КАМОВ". В эксперименте рассмотрены различные подходы к решению задачи расчета интегральных характеристик винтов и сравнение полученных результатов с данными эксперимента.

По результатам анализа материалов диссертации, к основным научным результатам, полученным в работе, следует отнести:

1. Разработку нового алгоритма и его реализацию в виде комплекса программ для решения задачи расчета аэродинамических характеристик винтов вертолета на режимах висения;
2. Разработку численного алгоритма расчета акустических характеристик винтов вертолета путем модификации интегрального метода Фокса Уильямса - Хокинга, обеспечивающего отсутствие особенностей в пространственно-временном интеграле;
3. Разработку системы автоматического регрессионного тестирования расчетного комплекса, позволяющего контролировать достоверность выполняемых расчетов в рамках установленных допущений и ограничений.

### **3. ДОСТОВЕРНОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Достоверность полученных в диссертации результатов обосновывается проведенными вычислительными экспериментами и сравнениями полученных результатов с данными экспериментов на моделях несущих винтов вертолета, в том числе и для винта в кольце.

### **4. ПРАКТИЧЕСКАЯ ЗНАЧИМОСТЬ ПОЛУЧЕННЫХ В ДИССЕРТАЦИИ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Практическая значимость полученных в диссертации результатов определяется возможностью и целесообразностью их использования при проектировании новых и модернизации серийных вертолетов, выпускаемых российской авиационной промышленностью.

Результаты, проведенных в работе исследований, могут быть использованы в практике отечественного вертолетостроения, для оптимизации аэродинамических и акустических параметров винтов вертолета.

Разработанный автором параллельный программный комплекс для суперкомпьютеров позволяет оценить эффективность конструктивных решений по разработке аэродинамических компоновок лопастей несущих и рулевых винтов, формируемых на проектной стадии исследований, как в части аэродинамических характеристик, так и в части акустических параметров.

## **5. АПРОБАЦИЯ ПОЛОЖЕНИЙ ДИССЕРТАЦИИ**

Изложенные в диссертации положения докладывались и получили одобрение на всероссийских и международных конференциях в течении 2012 - 2016 гг. По теме диссертации автором опубликовано 24 печатных работы в различных изданиях, в том числе 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК России.

## **6. ЗАМЕЧАНИЯ ПО ДИССЕРТАЦИИ**

1. Отсутствует разъяснений таких терминов, примененных в диссертации, как "проблемно-ориентированный комплекс", "промышленно-ориентированный комплекс".
2. В работе обсуждаются различные режимы полета и их возможное моделирование, хотя практически решена только задача осисимметричного обтекания винтов вертолета и винта в кольце на режимах с нулевой поступательной скоростью.
3. Отсутствуют сравнения с аналогичными работами, выполненными другими авторами, например, В.А. Ивчиным и В.Г. Судаковым, Л.И. Гариповой.
4. При расчетах винта в кольце необходимо сравнить характеристики винта в кольце и изолированного винта при оценке относительного КПД винта.
5. В работе отсутствуют исследования по влиянию границ ближнего поля на точность расчета акустических параметров винтов в дальнем поле.

## **7. СООТВЕТСТВИЕ РАБОТЫ ТРЕБОВАНИЯМ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫМ К ДИССЕРТАЦИЯМ**

Представленная диссертационная работа удовлетворяет всем требованиям Положения о порядке присуждения ученых степеней, предъявляемых к кандидатским диссертациям и дает достаточное представление о целях и задачах, решаемых в диссертации, а также об основных положениях и результатах исследований. Диссертация написана понятным языком и хорошо структурирована.

## **8. АВТОРЕФЕРАТ**

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

