

На правах рукописи

Вершков Владислав Александрович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОБТЕКАНИЯ
ШАРНИРНОГО НЕСУЩЕГО ВИНТА ВЕРТОЛЕТА МЕТОДОМ
ДЕФОРМИРУЕМЫХ НЕСТРУКТУРИРОВАННЫХ СЕТОК**

Специальность 05.13.18 – Математическое моделирование,
численные методы и комплексы программ

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва – 2021

Работа выполнена в федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Крицкий Борис Сергеевич

Официальные оппоненты: **Аникин Виктор Андреевич**, доктор технических наук, главный конструктор, акционерное общество «Национальный центр вертолетостроения имени М.Л. Миля и Н.И. Камова»
Батраков Андрей Сергеевич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Казанский национальный исследовательский технический университет – КАИ имени А.Н. Туполева

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

Защита диссертации состоится «__» _____ 2021 г. в __ ч. __ мин. на заседании диссертационного совета Д 212.141.15 при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1, зал Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «__» _____ 202__ года.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент



Аттетков
Александр
Владимирович

Общая характеристика работы

Актуальность темы исследования. Актуальность диссертационной работы обусловлена запросом практики на возможность моделирования сложных явлений при обтекании шарнирного несущего винта (НВ), таких как срыв потока с лопастей, волновой срыв в широком диапазоне режимов полета. Такие возможности могут дать подходы, основанные на сеточных методах. Для моделирования процесса обтекания и, соответственно, определения аэродинамических характеристик (АДХ) шарнирного НВ, лопасти которого совершают сложное пространственное движение, необходимо использовать метод деформации расчетной сетки.

Таким образом, разработка метода, позволяющего рассчитать АДХ шарнирного НВ вертолета при наличии маховых движений лопастей, качании лопастей в плоскости вращения и динамическом изменении угла установки лопастей и выявлять особенности процесса обтекания шарнирного несущего винта в широком диапазоне режимов полета, является важной и актуальной научной задачей.

Степень разработанности темы. К методам вычислительной аэродинамики применительно к расчетам АДХ НВ можно отнести методы, основанные на вихревых теориях винта. Они получили широкое распространение с появлением ЭВМ. Разработка методов расчета аэродинамических характеристик НВ на базе несущей нити (линии) принадлежит В.Э. Баскину, Е.С. Вождаеву, М.Н. Тищенко, Ю.М. Игнаткину и др., на базе несущей поверхности – С.М. Белоцерковскому, Е.С. Вождаеву, Б.Е. Локтеву, Б.С. Крицкому, В.А. Аникину и др.

В последнее время получили широкое распространение сеточные методы на основе систем уравнений Эйлера или Навье – Стокса. Выбор модели турбулентности для замыкания системы осредненных по Рейнольдсу уравнений Навье – Стокса зависит от режима обтекания винта и требований к качеству получаемых результатов.

В настоящее время задачи, решаемые сеточными методами, ограничиваются режимами висения или косо́го обтекания жестких несущих винтов. Такие

исследования проводятся в группах Ю.М. Игнаткина, Т.К. Козубской, С.А. Михайлова, А.Н. Кусюмова, N. Hariharan, L. Sankar, P. Doerffer, O. Szulc и др. Однако в мире мало исследователей, которые используют различные сеточные методы учета сложного движения тела при решении задач определения аэродинамических характеристик шарнирных несущих винтов. В частности, к ним относится лаборатория при Ливерпульском университете во главе с J. Barakos. В своем коде НМВ (Helicopter Multi-Block) он использует метод перекрывающихся сеток (Химера) и метод перестроения части расчетной сетки, окружающей лопасти, на каждом шаге по времени. Однако данные методы имеют ряд ограничений, а именно, теряют порядок точности на интерфейсе, а перестроение сетки на каждом шаге по времени занимает достаточно много времени.

Данная работа является развитием метода численного расчета шарнирного НВ вертолета с жесткими лопастями. Главным отличием работы является использование метода деформирующихся неструктурированных сеток в ограниченной области, в рамках которой сеточные узлы меняют свои координаты при сохранении топологии сетки в целом. Данный подход позволяет сократить время, требуемое на подготовку расчетной сетки на каждом шаге по времени, а также сохранять точность, благодаря отсутствию интерфейсов. Другим главным отличием метода является расчет углов отклонения лопастей от начального положения на основе уравнений движения абсолютно жесткой лопасти с распределенной массой.

Цель диссертационной работы – разработка математической модели процесса обтекания шарнирного НВ с произвольными геометрическими и кинематическими параметрами, метода деформации неструктурированной расчетной сетки в ограниченной области с сохранением топологии для моделирования движения лопастей шарнирного НВ и определение суммарных и распределенных аэродинамических характеристик НВ и параметров течения в его окрестности.

Для достижения поставленной цели потребовалось решение **следующих основных задач:**

1. Разработка на основе системы уравнений Навье-Стокса, осредненных по

Рейнольдсу, математической модели обтекания шарнирного НВ, описывающей параметры течения в его окрестности.

2. Разработка метода деформируемых неструктурированных сеток с сохранением топологии, позволяющего рассчитать АДХ шарнирного НВ вертолета при наличии маховых, качательных движений лопастей и динамическом изменении угла установки лопастей и выявлять особенности процесса обтекания шарнирного НВ.

3. Разработка и верификация проблемно-ориентированного кода Flapping_Rotor для расчета АДХ шарнирного несущего винта вертолета.

4. Численное определение суммарных и распределенных аэродинамических характеристик шарнирного НВ на режимах осевого и косоугольного обтекания и параметров течения в его окрестности.

Методы исследования. Использован численный метод решения системы уравнений Навье – Стокса, осредненных по Рейнольдсу, для сжимаемого газа на основе конечно-объемных схем повышенной точности на гибридных неструктурированных сетках, метод деформации сетки с сохранением топологии и метод решения уравнений движения тела на основе численной схемы «че-харда».

Научная новизна. В диссертации получены следующие новые научные результаты:

1. Разработана математическая модель процесса обтекания шарнирного НВ с произвольными геометрическими и кинематическими параметрами.

2. Разработаны метод и численный алгоритм деформации неструктурированной расчетной сетки в ограниченной области с сохранением топологии для моделирования сложного криволинейного движения лопастей шарнирного НВ.

3. Разработан и валидирован проблемно-ориентированный код Flapping_Rotor для расчета АДХ шарнирного НВ вертолета.

Теоретическая и практическая значимость. В результате проведенного исследования разработан и реализован ряд алгоритмов, позволяющих получить с необходимой точностью оценку АДХ шарнирного НВ вертолета с уче-

том маховых движений лопастей, качания лопастей в плоскости вращения и динамического изменения углов их установки.

Разработанный метод и составляющие его алгоритмы могут использоваться для проведения расчетов по определению аэродинамических характеристик перспективных шарнирных несущих винтов до проведения трубных испытаний винтов, а также могут быть использованы в учебном процессе в ВУЗах авиационного профиля.

Материалы диссертационной работы использовались при создании перспективных несущих винтов в АО «НЦВ Миль и Камов». Разработанная в ходе работы проблемно-ориентированная программа Flapping_Rotor внедрена в практическую деятельность федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» и федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики имени М.В. Келдыша Российской академии наук».

На защиту выносятся следующие положения:

1. Математическая модель процесса обтекания шарнирного НВ с произвольными геометрическими и кинематическими параметрами.

2. Метод и алгоритмы деформации неструктурированной расчетной сетки для моделирования сложного криволинейного движения лопастей шарнирного НВ вертолета.

3. Проблемно-ориентированный код Flapping_Rotor в составе программного комплекса NOISEtte, предназначенный для расчета аэродинамических характеристик шарнирного несущего винта вертолета.

4. Результаты расчета аэродинамических характеристик несущего четырехлопастного винта с шарнирным креплением жестких лопастей на режимах осевого и косо́го обтекания.

Достоверность и обоснованность научных результатов и выводов обеспечивается проверкой всех предложенных численных методов на тестовых задачах с известными точными решениями, на задачах, для которых имеются

численные результаты других авторов, а также сравнением с физическими экспериментами в аэродинамических трубах.

Апробация результатов работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: XVII международная школа-семинар «Модели и методы аэродинамики» (Евпатория, 2017); XVII Научно-техническая конференция по аэроакустике (Звенигород, 2017); XXVIII Научно-техническая конференция по аэродинамике (Жуковский, 2017); 60-я научная конференция МФТИ (Долгопрудный, 2017); XII форум Российского вертолетного общества (Москва, 2017); XXIX Научно-техническая конференция по аэродинамике (Жуковский, 2018); II Симпозиум ЦАГИ-CARDC по фундаментальной и прикладной аэродинамике (Москва, 2018); VII Всероссийская конференция «Вычислительный эксперимент в аэроакустике» (Светлогорск, 2018); 45th European Rotorcraft Forum (Варшава, Польша, 2019); XIII Всероссийская конференция молодых ученых «Проблемы механики 2019; Теория, эксперимент и новые технологии» (Новосибирск, 2019); Научно-технический семинар НИО-5 ФГУП «ЦАГИ» (Жуковский, 2020).

Публикации. Основные результаты диссертации отражены в 13 научных работах, в том числе в 4 статьях в изданиях, включенных в Перечень ВАК РФ, и 2 научных публикации в изданиях, индексируемых в международной системе цитирования Scopus.

Личный вклад соискателя. Все исследования, изложенные в диссертационной работе, проведены лично соискателем в процессе научной деятельности. Из совместных публикаций в диссертацию включен лишь тот материал, который непосредственно принадлежит соискателю, заимствованный материал обозначен в работе ссылками. Численная реализация методов, проведение расчетов и обработка результатов проведены автором лично.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений и списка литературы. Общий объем диссертации 116 страниц, включая 87 рисунков и 3 таблицы. Библиография включает 87 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** дано обоснование наличия и актуальности научной задачи. Проведен обзор источников по выбранной тематике с целью показать степень разработанности выбранной темы исследования. Обозначены объект и предмет исследования. Показаны научная новизна работы и теоретическая и практическая значимость. Поставлена научная задача и описаны частные задачи. Представлены положения, выносимые на защиту.

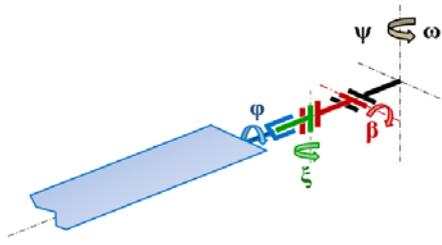


Рис. 1. Шарнирное крепление лопасти НВ

В **первой главе** приводится математическая постановка задачи. Предметом исследования является шарнирный НВ с абсолютно жесткими лопастями, имеющий три степени свободы (Рис. 1). Каждая лопасть может вращаться вокруг шарниров на углы β , ξ и φ , в

плоскостях взмаха, качания и изменяя циклический шаг соответственно. Разработанная математическая модель состоит из двух систем уравнений, описывающих динамику лопасти шарнирного НВ и движение вязкого сжимаемого газа в его окрестности:

$$\left\{ \begin{array}{l} J_{ГШ} \ddot{\beta} + J_{ГШ} \omega^2 \beta = M_T(p, t) - M_{mg}(\beta) \\ J_{ВШ} \ddot{\xi} + J_{ВШ} \omega^2 \xi = M_X(p, t) - M_{кориолис}(\dot{\beta}) \\ \varphi = f(\psi(t), \beta) \\ \psi(t) = \omega t \end{array} \right. \left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \mathbf{Q}}{\partial t} + \nabla \cdot \mathcal{F}_c(\mathbf{Q}) = \nabla \cdot \mathcal{F}_v(\mathbf{Q}, \nabla \mathbf{Q}) \\ \mathbf{Q} = (\rho, \rho u, \rho v, \rho w, E)^T \\ E = \rho \frac{u^2 + v^2 + w^2}{2} + p\varepsilon \\ \varepsilon = p / (\rho(\gamma - 1)) \end{array} \right.$$

Здесь $J_{ГШ}$ и $J_{ВШ}$ – момент инерции лопасти относительно горизонтального (ГШ) и вертикального шарниров (ВШ) соответственно, ω – угловая скорость вращения несущего винта, ψ – азимутальное положение лопасти НВ в момент времени t , M_T и M_X – моменты сил тяги лопасти и ее сопротивления как функции от давления на поверхности лопасти p , M_{mg} и $M_{кориолис}$ – моменты сил тяжести и Кориолиса как функции от угла взмаха β и скорости взмаха $\dot{\beta}$.

Первая система уравнений описывает движение лопасти шарнирного НВ. Вторая система – газодинамическая. Это осредненная по Рейнольдсу система

уравнений Навье-Стокса, замкнутая моделью турбулентности Спаларта-Аллмараса. Граничными условиями являются условие твердой стенки с прилипанием на поверхности твердого тела и условие входа-выхода с фиксацией газодинамических параметров набегающего потока: плотности, давления и вектора скорости потока.

Граничное условие прилипания выполняется при $\mathbf{V} = \mathbf{V}_{\text{границы}}(\varphi(t), \beta(t), \xi(t))$, то есть, когда скорость на поверхности тела равна скорости ее движения в пространстве.

При моделировании движения тела учитывается изменение координат узлов расчетной сетки на каждом шаге по времени методом деформируемых неструктурированных сеток в ограниченной области. Основное отличие используемой дискретной аппроксимации уравнений Рейнольдса от обычной численной схемы на недеформируемой сетке заключается в формуле для вычисления потока консервативных переменных через подвижную грань ij $\mathbf{h}_{ij}(t)$:

$$\mathbf{h}_{ij}(t) = \left[\frac{\mathcal{F}(\mathbf{Q}_i) + \mathcal{F}(\mathbf{Q}_j)}{2} \cdot \tilde{\mathbf{n}}_{ij} - \mathbf{v}_{ij} \frac{\mathbf{Q}_i + \mathbf{Q}_j}{2} \right] - \delta \left[\frac{1}{2} \mathbf{S}^{-1} |\mathbf{\Lambda} - \mathbf{v}_{ij}| \mathbf{S} (\mathbf{Q}_j - \mathbf{Q}_i) \right],$$

где $\mathbf{Q}_i, \mathbf{Q}_j$ – векторы консервативных переменных в узлах i и j ; \mathbf{S} и $\mathbf{\Lambda}$ – матрицы собственных значений и собственных векторов для матрицы $d\mathbf{F}/d\mathbf{Q}$; \mathbf{v}_{ij} – скорость перемещения грани ij ; δ – коэффициент диссипации.

Представлен численный алгоритм деформации расчетной сетки с сохранением топологии для моделирования отклонения и вращения лопасти относительно шарниров, расположенных в одной точке, смещенной от оси вращения несущего винта. Для этого вся расчетная зона разделена на три подобласти: внешнюю, буферную и внутреннюю зоны (Рис. 2).

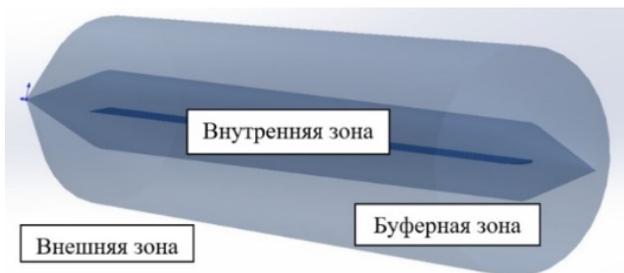


Рис. 2. Области деформации расчетной сетки

Внутренняя область строится вокруг лопасти, буферная зона – вокруг внутренней зоны с определенным отступом. Остальная часть расчетной области считается внешней зоной. Для простоты построения

зон деформации внутренняя и буферная области представляют собой аналитически заданные усеченные конусы, в основаниях которых также построены конусы. Такие формы зоны деформации получаются благодаря аналитической кусочно-линейной весовой функции $f(\mathbf{r}_i)$, определяемой перед расчетом и задающей амплитуду перемещения узла. В 3D $f(\mathbf{r}_i)$ определяется как

$$f_x(x) = \begin{cases} \frac{x}{dx}, & \text{при } 0 \leq x < dx \\ 1, & \text{при } dx \leq x \leq L_{лон} \\ \frac{dx_1 + L_{лон} - x}{dx_1}, & \text{при } L_{лон} < x \leq L_{лон} + dx_1 \end{cases}; \quad f_{rad}(\mathbf{r}_i) = \begin{cases} 1, & \text{при } 0 \leq \alpha < R_{1z}(x) \\ \frac{R_{2z}(x) - \alpha}{R_{2z}(x) - R_{1z}(x)}, & \text{при } R_{1z}(x) \leq \alpha \leq R_{2z}(x); \\ 0, & \text{при } \alpha > R_{2z}(x) \end{cases}$$

$$\alpha = \sqrt{(c \cdot y)^2 + z^2}; \quad f(\mathbf{r}_i) = f_{rad}(\mathbf{r}_i) \cdot f_x(x).$$

Здесь $R_{1z}(x)$, $R_{2z}(x)$ – аналитические кривые, описывающие границы внутренней и внешней зон; x , y , z – координаты узла расчетной сетки; $L_{лон}$ – длина лопасти; dx – расстояние от шарнира до начала оперенной части лопасти; c – управляющий коэффициент, принятый за 1. При таком распределении весовая функция $f(\mathbf{r}_i)$ принимает значение 1 на границе внутренней области и уменьшается при удалении от точки $(x, 0, 0)$ до 0 на границе внешней области.

Радиус-вектор узла i расчетной сетки на $n+1$ шаге по времени находится по закону $\mathbf{r}_i^{n+1} = \mathbf{A}\mathbf{B}\mathbf{r}_i^0$, где \mathbf{A} – матрица поворота на угол ψ , \mathbf{B} – матрица поворота на углы $f(\mathbf{r}_i)\beta$, $f(\mathbf{r}_i)\xi$ и $f(\mathbf{r}_i)\phi$, \mathbf{r}_i^0 – радиус-вектор узла в момент времени $t=0$.

Таким образом, все узлы расчетной сетки поворачиваются как единое целое на угол ψ , моделируя вращение НВ. Узлы, попавшие во внутреннюю область, перемещаются как твердое тело, моделируя маховые, качательные движения и циклическое управление лопастями НВ. В буферной области происходит радиальное линейное уменьшение амплитуды отклонения узлов расчетной сетки от своего первоначального положения с целью объединения внутренней и внешней зон при сохранении качества расчетной сетки.

Во **второй главе** описана модель движения абсолютно жесткой лопасти НВ, принимающая на вход поле давления на поверхности лопасти НВ из модели гидродинамики. Приведены законы, по которым могут задаваться уравнения движения лопасти, вводимые в программу пользователем до начала расчета.

В рамках описываемого метода движение лопастей около ГШ и ВШ рассчитывалось в соответствии с теорией, описанной в монографии М.Л. Миля (Вертолеты. Расчет и проектирование / М.Л. Миль [и др.] М.: Машиностроение, 1966. 456 с).

Лопасть представлена в виде конечного числа точечных масс dm_i , распределенных вдоль размаха лопасти. Рассмотрены силы, действующие на точечную массу в плоскостях взмаха и качания. Решаются уравнения моментов, на основе которых рассчитываются угловые ускорения лопастей в плоскостях качания и взмаха. Затем эти ускорения подставляются в формулу, по которой определяются отклонения лопасти в текущий момент времени.

При задании закона циклического изменения углом установки лопасти учитывается компенсатор взмаха k_φ .

В **третьей главе** представлена разработанная проблемно-ориентированная программа Flapping_Rotor (Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ номер RU2019662055 от 09.09.2019) для учета маховых, качательных движений и циклического управления общим шагом лопастей.

Описаны структура реализованной программы, работающей вместе с отечественным программным комплексом NOISEtte, разработанным в лаборатории ИПМ им. М.В. Келдыша РАН, и решенные тестовые задачи для проверки работоспособности отдельных блоков программы Flapping_Rotor.

В первой задаче значение коэффициента нормальной силы двумерного профиля, колеблющегося в потоке по заданному закону, сравнивалось с численным результатом, полученным в ANSYS CFX, и экспериментальными данными. Полученные численные результаты хорошо количество и качественно согласуются друг с другом и с экспериментальными данными. Показано, что при одинаковой точности результатов NOISEtte с кодом Flapping_Rotor работает в 2 раза быстрее, чем ANSYS CFX.

Во второй задаче смоделирован колеблющийся в потоке двумерный цилиндр и исследована структура пульсаций давления в точке дальнего поля. Полученные результаты хорошо согласуются с численными результатами, полученными другими авторами другими методами.

Третья задача – колебание математического маятника в вакууме. При заданных угле отклонения маятника, точечной массе, сосредоточенной в нижней точке маятника, и ускорении свободного падения смоделировано десять периодов колебания маятника. Получено, что значение периода колебания расхо­дится с аналитической формулой на 0.0007 с при периоде колебания $T=1.9876$ с. Также показано, что введенная поправка, сохраняет устойчивость численной схемы «чехарда» для решения уравнения движения даже при шаге по времени $dt=T/20$, в отличие от базовой схемы, расходящейся при $dt=T/100$.

Четвертая задача – свободное падение твердого стержня, шарнирно за­крепленного с одного конца, от положения равновесия на угол 10 градусов. Были выбраны две модели: с точечной и распределенной массами. Численные траектории конца стержня хорошо согласуются с аналитической формулой.

В качестве пятой задачи выбрана задача обтекания вращающегося стержня, отклоненного от положения равновесия. При отсутствии аэродинами­ческих сил сопротивления воздуха стержень совершал гармонические колеба­ния, а при их наличии стержень совершил затухающие колебания и вернулся в положение равновесия, отклонившись от горизонта на 2° .

В четвертой главе представлены три задачи обтекания жесткого и шар­нирного НВ на режимах осевого и косо­го обтекания. Полученные численные АДХ винтов сравнены друг с другом и с экспериментальными данными, полу­ченными в аэродинамической трубе ЦАГИ. Первая задача – обтекание шарнир­ного НВ на режиме висения, вторая – сравнение картин обтекания жесткого и шарнирного НВ на режиме косо­го обтекания с нулевым углом атаки винта, тре­тья – обтекание шарнирного НВ на режиме косо­го обтекания с углом атаки винта -5° в сравнении с экспериментальными данными. Объект моделирования представляет собой четырехлопастной НВ с распределенной массой в 16 точках вдоль размаха лопасти. Радиус НВ составляет $R = 2.442$ м, хорда $b = 0.16$ м. Профиль НАСА-23015. Крутка линейная. Концевая скорость вращения винта составляет $\omega R = 215$ м/с для первой и второй задач и 220 м/с для третьей задачи. Для решения задач построено несколько неструктурированных расчетных се­ток с призматическим слоем около лопастей НВ с разной плотностью узлов в

области вихревой пелены.

Для решения первой задачи построены грубая и подробная расчетные сетки, содержащие 4,6 млн и 8,3 млн узлов соответственно. В результате моделирования обтекания винтов на режиме висения полученные численные значения силы тяги винта и крутящего момента сравнены с экспериментальными данными. Результат сравнения представлен в Таблице 1.

Таблица 1.

АДХ модели НВ на режиме висения

	T [кгс]	M_k [кгс·м]	β [°]
Грубая сетка	987	310	6.0
Подробная сетка	793	189	4.5
Эксперимент	811.6	180.4	3.2

Видно, что сгущение расчетной сетки приводит к уточнению получаемых АДХ шарнирного НВ на режиме висения. На подробной сетке удалось добиться попадания в 5%-й «коридор доверия», что свидетельствует о хорошей сходимости численных результатов с экспериментальными данными.

В качестве второй задачи с методической точки зрения выбрана задача моделирования обтекания жесткого и шарнирного НВ с циклическим управлением углом установки лопасти и без него на режиме косо обтекания со скоростью набегающего потока $V_\infty = 60$ м/с и нулевым углом атаки винта с целью сравнения численных АДХ НВ друг с другом и оценки влияния шарнирного крепления лопастей на картины обтекания винтов. В результате проведенных вычислительных экспериментов получены графики зависимости всех сил и моментов, действующих на винт. В качестве демонстрации на Рис. 3, 4 представлены графики зависимости коэффициентов силы тяги c_T и крутящего момента m_k несущих винтов от азимута ψ .

Изоповерхности завихренности, рассчитанные по Q-критерию, с заливкой по скорости для всех исследуемых винтов похожи друг на друга. На Рис. 5 представлена вихревая структура около шарнирного винта с управлением.

Для демонстрации деформации расчетной сетки на Рис. 6, 7 представлено сечение расчетной сетки плоскостью в районе относительного радиуса $r/R = 0.9$,

раскрашенное по значению весовой функции $f(\mathbf{r}_i)$ для верхнего и нижнего положения лопасти шарнирного НВ.

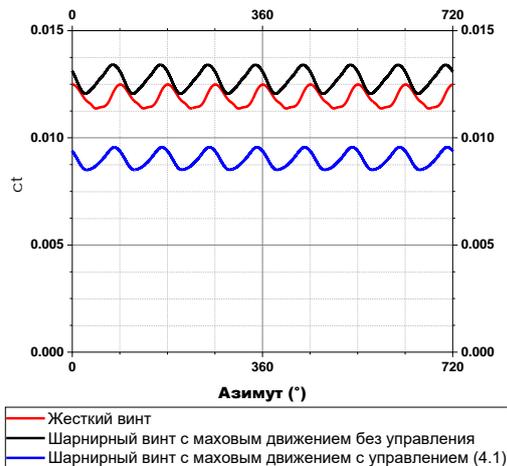


Рис. 3. Зависимость c_T от ψ

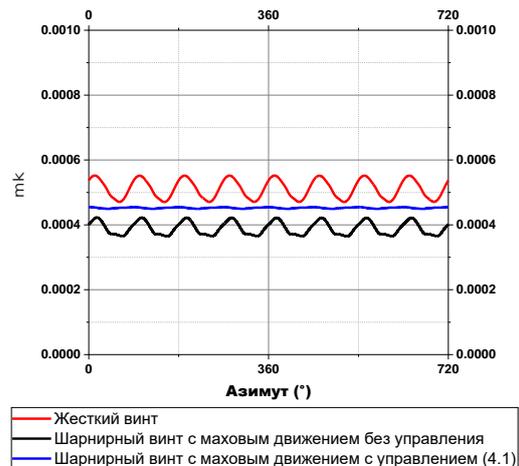


Рис.4. Зависимость m_k от ψ

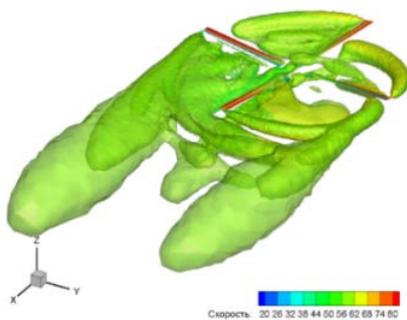


Рис. 5. Изоповерхность завихренности около шарнирного НВ с управлением в 3D

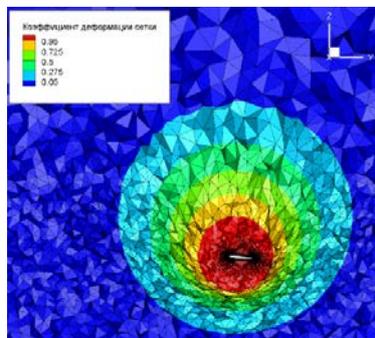


Рис. 6. Расчетная сетка в сечении лопасти шарнирного НВ в нижнем положении

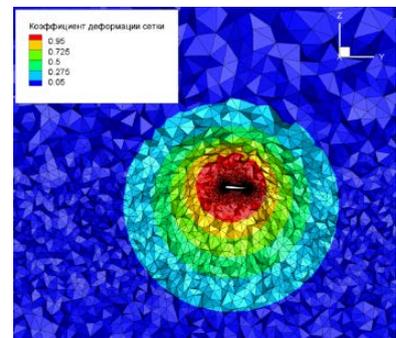


Рис. 7. Расчетная сетка в сечении лопасти шарнирного НВ в верхнем положении

В третьей задаче приводится сравнение численных результатов обтекания шарнирного НВ под углом атаки винта $\alpha_H = -5^\circ$ потоком со скоростью $V_\infty = 40$ м/с с экспериментальными данными. Построено две расчетные сетки MESH1, MESH2, содержащие 4,6 млн и 7,1 млн узлов соответственно. На Рис. 8, 9 представлены зависимости коэффициентов силы тяги c_T и крутящего момента m_k НВ от азимута ψ в сравнении с экспериментальными данными.

На графиках видно, что получаемые в результате моделирования АДХ шарнирного НВ хорошо согласуются с экспериментальными данными по c_T и удовлетворительно – по m_k . При уточнении расчетной сетки в области вихревой

пелены наблюдается лучшее согласование численных АДХ НВ с экспериментальными, в частности, коэффициента крутящего момента m_k .

На Рис.10 представлена картина завихренности около шарнирного НВ, посчитанная по Q-критерию, на основе расчета на сетке MESH2. Видны концевые жгуты на расстоянии диаметра вниз по потоку, а также концевые вихри, разрешающиеся вплоть до угла 360° . Вихревые жгуты имеют одинаковую интенсивность и размер, а также немного наклонены в сторону азимута 90° .

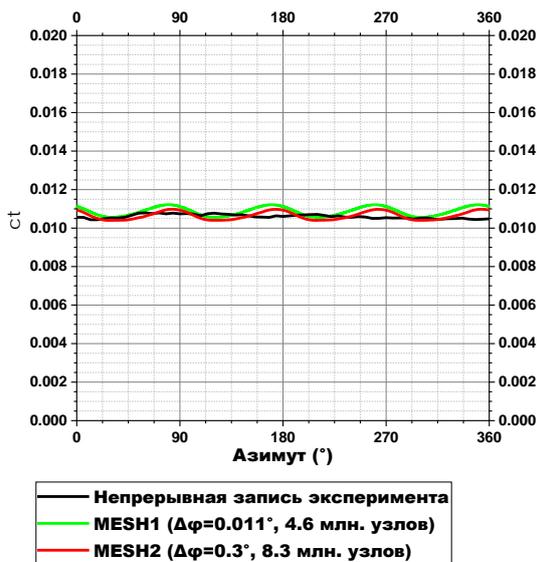


Рис.8. Зависимость c_T от ψ

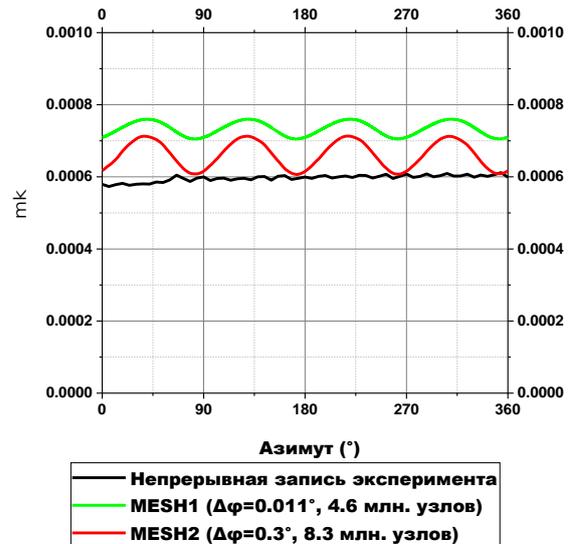


Рис.9. Зависимость m_k от ψ

На Рис. 11, 12 представлены распределения разности давления в точке на поверхности лопасти и давления невозмущенного потока $\Delta p = p - p_0$ вдоль хорды лопасти НВ в сечениях $r/R=0.5, 0.7$ и 0.9 при азимутальных положениях лопастей НВ $\psi=180^\circ$ и 270° .

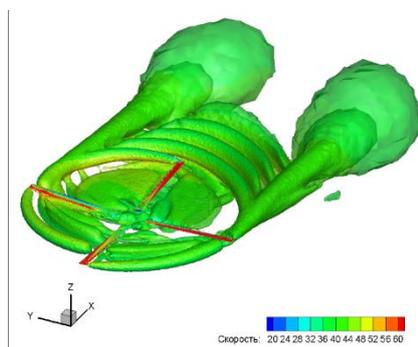


Рис. 10. Изоповерхность завихренности около шарнирного НВ в 3D

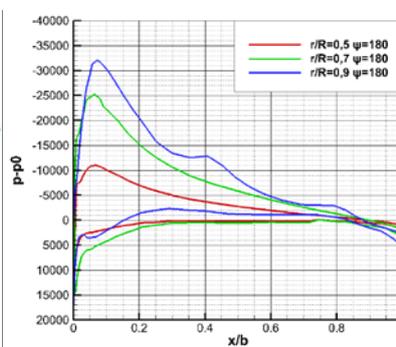


Рис. 11. Распределение Δp в сечениях лопасти на азимуте 180°

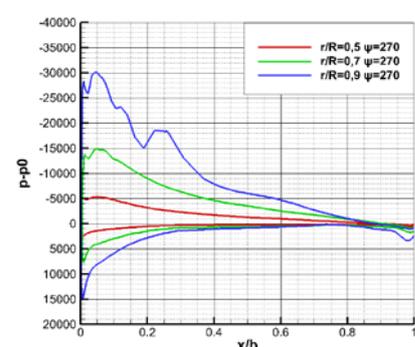


Рис. 12. Распределение Δp в сечениях лопасти на азимуте 270°

В результате анализа графиков получено, что уменьшенная Δp в сечениях $r/R = 0.5$ и 0.7 на лопасти на азимуте 270° , по сравнению с Δp в тех же сечениях на лопастях при других азимутах, приводит к минимуму тяги лопасти на этом азимуте, однако отношение Δp на верхней и нижней поверхностях в концевом сечении $r/R = 0.9$ на этом азимуте такое же, как и у лопасти на азимуте 180° в том же сечении. Сечение $r/R = 0.5$ лопасти на азимуте 270° находится близко к зоне обратного обтекания и, как следствие, к срыву потока, что видно на графике Δp в этом сечении.

Таким образом, предлагаемый метод может быть использован при проведении параметрических исследований в обеспечении аэродинамического проектирования шарнирных несущих винтов вертолета.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

1. Разработана математическая модель для решения связанной задачи гидродинамики шарнирного НВ и движения лопастей шарнирного НВ, позволяющая определять АДХ и выявлять особенности обтекания шарнирного НВ с произвольными массово-инерционными и кинематическими характеристиками на различных режимах. Используемый метод деформированных сеток с сохранением топологии позволяет сохранять точность решения, однако имеет ограничение на величину линейного отклонения тела от начального своего положения.

2. Создана проблемно-ориентированная программа `Flapping_Rotor` для расчета аэродинамических характеристик шарнирного несущего винта вертолета с лопастями произвольной формы. Проведена валидация разработанной программы на ряде тестовых задач. В результате сравнения на одной из задач получено, что при одинаковой точности получаемых результатов реализованный метод работает в 2 раза быстрее коммерческого пакета CFD программ ANSYS со встроенным методом деформации сетки.

3. С помощью разработанной модели, основанной на разработанных методах и алгоритмах деформации расчетной сетки и динамической модели движения лопастей, определены аэродинамические характеристики реального шарнирного четырехлопастного несущего винта на режиме осевого и косого обтекания, выявлены различия в картинах обтекания шарнирного и жесткого НВ,

сделан вывод о том, что численные аэродинамические и, как следствие, акустические характеристики жесткого НВ, не применимы для анализа аэроакустических характеристик шарнирного НВ.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В РАБОТАХ

1. Вершков В.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М. Численное моделирование обтекания несущего винта вертолета с учетом циклического управления и махового движения лопастей // Материалы XXVIII научно-технической конференции по аэродинамике. Жуковский, 2017. С. 78. (0.06 п.л./ 0.05 п.л.)

2. Вершков В.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М. Моделирование обтекания несущего винта вертолета с маховым движением лопастей для задач аэроакустики // Тезисы докладов V открытой Всероссийской (XVII научно-технической) конференции по аэроакустике. Звенигород, 2017. С.23. (0.06 п.л./ 0.05 п.л.)

3. **Бахвалов П.А., Вершков В.А. Рёберно-ориентированные схемы на подвижных гибридных сетках в коде NOISEtte. М., 2018. 36 с. (Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша. №127).** (2.25 п.л./ 1.6 п.л.)

4. Вершков В.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М. Численные исследования по методике расчета аэродинамических характеристик несущего винта вертолета сеточными методами // Материалы XXIX научно-технической конференции по аэродинамике, Жуковский, 2018. С. 80. (0.06 п.л./ 0.05 п.л.)

5. Вершков В.А. Исследования по методике деформации сетки для учета циклического управления и маховых движений лопастей в задаче обтекания несущего винта вертолета // Модели и методы аэродинамики: Материалы XVIII Международной школы-семинара. Евпатория, 2018. С. 49-50. (0.06 п.л.)

6. Абалакин И.В., Вершков В.А., Жданова Н.С. Численное моделирование звука от колеблющегося цилиндра с использованием методов деформируемых сеток и погруженных границ // Вычислительный эксперимент в аэроакустике: Тезисы докладов VII Всероссийской конференции. Светлогорск, 2018. С. 10-11. (0.1 п.л./ 0.06 п.л.)

7. Vershkov V.A., Kritsky B.S., Mirgazov R.M. The mesh deformation method application to helicopter rotor aerodynamics problem // Abstracts of TsAGI-CARDC Second Symposium of Fundamental and Applied Aerodynamics. М., 2018. P. 40-41. (0.06 п.л./ 0.05 п.л.)

8. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU2019662055. Программа расчета сложного криволинейного движения лопастей для моделирования аэроакустики несущего винта вертолета сеточными методами Flapping_Rotor / В.А. Вершков, Б.С. Крицкий, Р.М. Миргазов. Зарегистрировано в Реестре программ для ЭВМ 09.09.2019.

9. **Вершков В.А. Алгоритм деформации сетки для учета циклического управления и маховых движений лопастей в задаче обтекания несущего винта вертолета // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 2. С. 62-74. (1.5 п.л.)**

10. Вершков В.А., Крицкий Б.С., Миргазов Р.М. Особенности моделирования обтекания несущего винта вертолета с учетом произвольного движения лопастей // Научный вестник МГТУ ГА. 2019. Т. 22. № 3. С. 25-34. (1.25 п.л./ 1.1 п.л.)

11. Бобков В.Г., Вершков В.А. Метод деформируемых сеток в задачах аэродинамики и аэроакустики несущего винта вертолета // Проблемы механики: Теория, эксперимент и новые технологии: Тезисы докладов XIII Всероссийской конференции молодых ученых. Новосибирск, 2019. С. 36-37. (0.06 п.л./ 0.05 п.л.)

12. Вершков В.А. Численные исследования аэродинамических и акустических характеристик модельного жесткого несущего винта вертолета на режиме горизонтального полета // Материалы XXX научно-технической конференции по аэродинамике. Жуковский, 2019. С. 77. (0.06 п.л.)

13. **Numerical simulation of acoustic fields induced by a flow past an oscillating solid / V.A. Vershkov [et al.] // Mathematical Models and Computer Simulations. 2020. N. 12. P. 422-432. (1.0 п.л./ 0.6 п.л.)**

14. **Numerical simulation of flow around rigid rotor in forward flight / V.A. Vershkov [et al.] // Fluid Dynamic. 2020. Vol. 55. N. 4. P. 534-544. (1.1 п.л./ 0.7 п.л.)**