

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ

**Диссертационный совет:** 24.2.327.09

**Соискатель:** Макеев Павел Вячеславович

**Тема диссертации:** Методы численного моделирования нестационарных аэродинамических характеристик и формирования границ области режимов вихревого кольца винтов и их приложение к задачам повышения безопасности полета вертолетов

**Специальность:** 2.5.12. «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов»

**Решение диссертационного совета по результатам защиты диссертации:**

На заседании 10 июня 2025 года диссертационный совет пришел к выводу о том, что диссертация полностью удовлетворяет пунктам 9-14 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. №842, и принял решение присудить Макееву Павлу Вячеславовичу ученую степень доктора технических наук.

**Присутствовали:** д.т.н., проф. В.Н. Евдокименков, к.т.н., доц. Д.Ю. Стрелец, д.т.н., академик РАН О.М. Алифанов, д.т.н., доц. А.Г. Викулов, д.ф.-м.н., доц. А.В. Волков, д.т.н. Л.М. Гавва, д.т.н., проф. В.Г. Дмитриев, д.т.н., проф. А.А. Дудченко, д.т.н., доц. В.М. Краев, д.ф.-м.н., доц. А.Л. Медведский, д.т.н., доц. О.В. Митрофанов, д.т.н., доц. А.М. Молчанов, д.т.н., проф. А.В. Ненарокомов, д.т.н., доц. С.Г. Парафесь, д.ф.-м.н., проф. Л.Н. Рабинский, д.ф.-м.н., доц. Г.В. Федотенков, д.т.н. В.И. Шевяков.

Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.327.09, к.т.н., доцент



 Д.Ю. Стрелец

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 24.2.327.09,**  
созданного на базе федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования «Московский  
авиационный институт (национальный исследовательский университет)»  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации  
(МАИ),

**по диссертации на соискание ученой степени доктора наук**

аттестационное дело № \_\_\_\_\_

решение диссертационного совета от 10.06.2025 г. № 7-25

О присуждении **Макееву Павлу Вячеславовичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени доктора технических наук.

Диссертация «Методы численного моделирования нестационарных аэродинамических характеристик и формирования границ области режимов вихревого кольца винтов и их приложение к задачам повышения безопасности полета вертолетов» по специальности 2.5.12. «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов» принята к защите 3 марта 2025 г., протокол заседания № 4-25, диссертационным советом 24.2.327.09, созданным на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» (МАИ, Московский авиационный институт), 125993, Москва, Волоколамское шоссе, 4, приказ Минобрнауки России о создании совета № 1738/нк от 13.12.2022 г., приказ о внесении изменений в состав совета № 1326/нк от 22.06.2023 г., приказ о внесении изменений № 1986/нк от 18.10.2023 г.

**Соискатель** Макеев Павел Вячеславович, 08 мая 1984 года рождения.

В 2007 году окончил с отличием государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования Московский авиационный институт (государственный технический университет) по специальности «Самолето- и вертолетостроение», специализация «Вертолетостроение» (диплом ВСА № 0583127, регистрационный номер 2007/I-277 от 01 марта 2007 года). В 2010 г. окончил очную аспирантуру государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Московский авиационный институт (государственный технический университет)» и защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук на «Спецтему» (диплом серия ДКН № 120821, решение Высшей аттестационной комиссии Министерства образования и науки Российской Федерации о выдаче диплома от 22 октября 2010 года № 38к/29) по специальности 05.07.01 – «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов». В 2018 году по представлению



федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» присвоено ученое звание доцента по специальности 05.07.01 – «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов» (аттестат серия ЗДЦ № 017892, приказ Министерства науки и высшего образования Российской Федерации от 5 сентября 2018 года №142/нк-2).

В период подготовки диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук Макеев Павел Вячеславович работал в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» в должности доцента на кафедре 102 «Проектирование вертолетов», а также в должности научного сотрудника «Научно-исследовательского отдела кафедры 102» Института №1 «Авиационная техника».

В настоящее время соискатель Макеев Павел Вячеславович работает в должности доцента на кафедре 102 «Проектирование вертолетов» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)».

Диссертация выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)» на кафедре 102 «Проектирование вертолетов».

#### **Официальные оппоненты:**

**1. Крицкий Борис Сергеевич** – гражданин Российской Федерации, доктор технических наук, профессор, Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», Московская область, г. Жуковский, главный научный сотрудник.

**2. Ефимов Вадим Викторович** – гражданин Российской Федерации, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА), г. Москва, профессор.

**3. Кусюмов Александр Николаевич** – гражданин Российской Федерации, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего

образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ», г. Казань, профессор.

Все оппоненты дали положительные отзывы о диссертации.

**Ведущая организация** – Акционерное общество «Казанский вертолетный завод», г. Казань, в своем положительном отзыве, обсужденном на заседании научно-технического совета АО «Казанский вертолетный завод» (протокол № 47 от 21 апреля 2025 года), подписанном начальником отдела расчетов, доктором технических наук, доцентом Неделько Д.В, ученым секретарем научно-технического совета, кандидатом технических наук Сафиуллиным А.Ф. и утвержденном заместителем генерального директора, главным конструктором опытно-конструкторского бюро, председателем научно-технического совета АО «Казанский вертолетный завод» Гариповым А.О., указала, что представленная к защите диссертационная работа удовлетворяет требованиям ВАК Российской Федерации, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а её автор, Макеев Павел Вячеславович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 2.5.12. – «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов».

Основные результаты диссертации изложены в 41 печатной работе, из них 19 статей в рецензируемых журналах, входящих в Перечень ВАК РФ (специальность 2.5.12.), 6 статей в журналах, входящих в международные базы данных Scopus и WoS, 3 статьи в сборниках трудов конференций, проиндексированных в международной базе данных Scopus, 12 тезисов докладов на российских и международных форумах и конференциях и 1 изданное в установленном порядке учебно-методическое пособие.

Наиболее значимыми научными работами по теме диссертации являются:

**Статьи в рецензируемых журналах Перечня ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации.**

1. Игнаткин Ю.М., Макеев П.В., Шомов А.И., Гревцов Б.С. Нелинейная лопастная вихревая теория винта и ее приложения для расчета аэродинамических характеристик несущих и рулевых винтов вертолета // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т. 16. – №5. – С. 24-31. (№ 289, перечень ВАК, действ. до 30.06. 2015). Личный вклад соискателя заключается в разработке ряда алгоритмов нелинейной лопастной вихревой модели винта, а так же выполнении валидации и верификации.



2. Игнаткин Ю.М., **Макеев П.В.**, Шомов А.И. Исследование аэродинамических характеристик несущего винта вертолета на режиме «вихревое кольцо» на базе нелинейной лопастной вихревой теории // Вестник Московского авиационного института. – 2009. – Т.16. – №6. – С. 11-15. (№ 289, перечень ВАК, действ. до 30.06. 2015). Личный вклад соискателя заключается в разработке и валидации метода расчета на базе нелинейной лопастной вихревой модели, а также проведении расчетов.
3. **Макеев П.В.**, Шомов А.И. Численное моделирование режимов «вихревое кольцо» несущего винта вертолета // Труды МАИ. – 2011, №45. – С. 1-20. (№ 2186, перечень ВАК, действ. до 30.06. 2015). Личный вклад соискателя заключается в разработке расчетной модели для выполнения исследований аэродинамических характеристик винта режимов «вихревого кольца», выполнении расчетов и анализе их результатов.
4. Игнаткин Ю.М., **Макеев П.В.**, Шомов А.И., Ивчин В.А. Сравнительные расчетные исследования трехлопастного и Х-образного рулевых винтов на режимах «вихревого кольца» // Научный вестник МГТУ ГА. – 2016. – № 223 (1). – С. 93-100. (№ 921, перечень ВАК от 19.04.2016). Личный вклад соискателя заключается в подготовке и валидации расчетных моделей исследуемых рулевых винтов, а также обработке и анализе результатов расчетов.
5. Игнаткин Ю.М., **Макеев П.В.**, Шомов А.И., Ивчин В.А. Расчетные исследования аэродинамических характеристик рулевого винта одновинтового вертолета с учетом индуктивного воздействия вихревого следа несущего винта на режимах висения при боковом ветре // Научный вестник МГТУ ГА. – 2016. – Т. 19. – № 6. – С. 58-67. (№ 921, перечень ВАК от 19.04.2016). Личный вклад соискателя заключается в разработке и валидации расчетной модели комбинации несущего и рулевого винтов с учетом интерференции и анализе результатов расчетов.
6. Игнаткин Ю.М., **Макеев П.В.**, Шомов А.И., Ивчин В.А. Расчетные исследования аэродинамических характеристик комбинации несущего и рулевого винтов с учетом аэродинамической интерференции для вертолета Ми-8/17 при полете с малыми скоростями со скольжением // Общероссийский научно-технический журнал «Полет». – 2017. – № 5. – С. 30-39. (№ 1990, перечень ВАК от 31.05. 2017). Личный вклад соискателя заключается в разработке и валидации расчетной модели комбинации несущего и рулевого винтов с учетом интерференции.
7. Игнаткин Ю.М., **Макеев П.В.**, Шомов А.И., Шайдаков В.И. Расчетные исследования режимов висения и вертикального снижения несущего винта на базе нелинейной лопастной вихревой модели // Известия



- высших учебных заведений. *Авиационная техника*. – 2018. – №3. – С. 73-80. (№ 612, перечень ВАК МБД). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, разработке расчетной модели комбинации несущего и рулевого винтов, анализе результатов.
8. Игнаткин Ю.М., **Макеев П.В.**, Шомов А.И., Шайдаков В.И. Расчетные исследования режимов крутого снижения несущего винта на базе нелинейной лопастной вихревой модели // *Известия высших учебных заведений. Авиационная техника*. – 2019. – №2. – С. 68-77. (№ 546, перечень ВАК МБД). Личный вклад соискателя заключается в разработке и валидации расчетных моделей винтов различной геометрической компоновки и анализе результатов расчетов.
  9. **Макеев П.В.**, Игнаткин Ю.М. Влияние геометрической компоновки на аэродинамические характеристики несущего винта на режимах «вихревого кольца» // *Вестник Московского авиационного института*. – 2023. – Т. 30. – № 2. – С. 82-95. (№ 494, перечень ВАК от 25.04.2023). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, разработке расчетной модели винта, анализе результатов расчетов.
  10. **Макеев П.В.**, Игнаткин Ю.М., Шомов А.И., Селеменев С.В. Расчетные исследования аэродинамических характеристик соосного несущего винта вертолета Ка-226Т на режимах «вихревого кольца» // *Научный Вестник МГТУ ГА*. – 2024. – Т. 27. – № 2. – С. 80-93. (№ 1856, перечень ВАК от 20.02.2024, категория К2). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, разработке расчетной модели несущего винта, анализе результатов расчетов.
  11. **Макеев П.В.**, Шомов А.И., Ивчин В.А., Игнаткин Ю.М. Численное исследование попадания рулевого винта в режимы «вихревого кольца» под воздействием вихревого следа несущего винта при полете с малыми скоростями со скольжением // *Вестник Московского авиационного института*. – 2024. – Т. 31. – № 1. – С. 1-12. (№ 529, перечень ВАК от 20.02.2024, категория К1). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, разработке и валидации расчетной модели комбинации несущего и рулевого винтов, выполнении и анализе результатов расчетов.
  12. **Макеев П.В.**, Игнаткин Ю.М., Шомов А.И., Селеменев С.В. Численное моделирование и анализ границ режимов «вихревого кольца» несущего винта вертолета Ка-62 // *Инженерный журнал: наука и инновации*. – 2024. – № 1. – 21 с. (№ 1337, перечень ВАК от 20.02.2024, категория К2). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, разработке и



валидации расчетной модели несущего винта, анализе результатов расчетов.

13. **Макеев П.В.** Влияние крутки лопастей и нагрузки на ометаемую поверхность на аэродинамические характеристики несущего винта на режимах «вихревого кольца» // Инженерный журнал: наука и инновации. – 2024. – № 7. – 22 с. (№ 1337, перечень ВАК от 20.02.2024, категория К2).

**Статьи в зарубежных журналах, входящих в международные базы данных Scopus и WoS:**

14. Ignatkin, Y.M., Konstantinov, S. G., **Makeev P.V.**, Nikitin S.O. Comparative Study of Coaxial Main Rotor Aerodynamics in the Hover with the Usage of Two Methods of Computational Fluid Dynamics // Journal of Aerospace Technology and Management. – 2021. – Vol.13. <https://doi.org/10.1590/jatm.v13.1210>. (Scopus, Web of Science). Личный вклад соискателя заключается в разработке расчетной модели винта, выполнении численного моделирования аэродинамических характеристик винта на базе нелинейной лопастной вихревой модели и анализе полученных результатов.
15. **Makeev P.V.**, Ignatkin Y.M, Shomov, A.I., Ivchin, V.A. Numerical Study of the Main Rotor Wake Structures and Induced Velocity Fields at the Tail Rotor Location When Flying Near the Ground // International Review of Aerospace Engineering (IREASE). – 2021. – Vol. 14. – No 4. – PP. 181-191. (Scopus). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, разработке и валидации расчетной модели, анализе результатов расчетов.
16. **Makeev P.V.**, Ignatkin, Y.M, Shomov, A.I. Numerical investigation of full scale coaxial main rotor aerodynamics in hover and vertical descent // Chinese Journal of Aeronautics. – 2021. – Vol. 34. – No 5. – PP. 666-683. (Scopus, Web of Science). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, разработке и валидации расчетной модели несущего винта, анализе результатов расчетов.
17. **Makeev P.V.**, Ignatkin Y.M, Shomov A.I. Numerical Study of Coaxial Main Rotor Aerodynamics in Steep Descent // Aerospace. – 2022. – Vol. 9. – No 61. – 23 p. (Scopus, Web of Science). Личный вклад соискателя заключается в постановке задачи, разработке и валидации расчетной модели соосного несущего винта, анализе результатов расчетов.
18. **Makeev P.V.**, Ignatkin Y.M, Shomov, A.I., Ivchin, V.A. Comparative Study of 3-Bladed and Scissors Tail Rotors Aerodynamics in Axial Flow // International Review of Aerospace Engineering (IREASE). – 2022. –Vol. 15. – No 2. – PP. 71-84. (Scopus). Личный вклад соискателя заключается в постановке



задачи, разработке и валидации расчетных моделей трехлопастного и Х-образного рулевых винтов, сравнительном анализе результатов расчетов.

**В диссертационной работе отсутствуют недостоверные сведения** об опубликованных соискателем ученой степени работах, в которых изложены основные научные результаты, представленные в диссертации.

**На диссертацию и автореферат поступили следующие отзывы:**

**1. Акционерное общество «Казанский вертолётный завод»**, ведущая организация. **Отзыв положительный.** Подписан начальником отдела расчетов, д.т.н., доцентом Неделько Д.В., ученым секретарем научно-технического совета, к.т.н. Сафиуллиным А.Ф., утверждён заместителем генерального директора – главным конструктором ОКБ – председателем научно-технического совета АО «Казанский вертолётный завод» Гариповым А.О.

К работе имеются следующие замечания:

- Из текста диссертации не ясно, учитывается ли в расчетной модели процесс взаимодействия лопасти и вихря от предыдущей лопасти в случае их прохождения близко друг от друга с точки зрения изменения толщины последнего («размытия» вихря).

- В работе не рассмотрена динамика полета вертолета при попадании рулевого винта в «вихревое кольцо» на малых скоростях полета при воздействии ветра, что не позволяет исследовать в полной мере роль этого явления в комплексном явлении «неуправляемого левого вращения» вертолетов одновинтовой схемы.

- Рассмотрены интегральные характеристики Х-образного рулевого винта, но не раскрыты особенности работы и нагружения отдельных пар лопастей Х-образного рулевого винта на режиме «вихревого кольца».

- В диссертации имеется некоторое количество опечаток, орфографических и пунктуационных ошибок.

**2. Крицкий Борис Сергеевич**, официальный оппонент, доктор технических наук, профессор. **Отзыв положительный**, заверен ученым секретарем диссертационного совета на базе ФАУ «ЦАГИ» 31.1.006.01, доктором физико-математических наук, доцентом Брутяном М.А.

К работе имеются следующие замечания:

- В предлагаемом методе используются стационарные АДХ профилей. Обтекание сечений винта существенно нестационарное. Необходимо учитывать гистерезис в зависимостях АДХ винта от угла атаки.

- В предлагаемом методе используется не модель вихря Ранкина, а модифицированный подход, основанный на методе расчета таблиц индуктивных скоростей. Но не показано отличие в полученных характеристиках при исходном вихре Ранкина и модифицированном вихре.



- В формуле для определения поля завихренности имеется время  $t$ , однако на разных режимах работы винта диффузия вихря будет существенно отличаться.

- Способ отбрасывания части вихревого следа выполнен не вполне корректно. То, что допустимо для режима косого обтекания, не очевидно для режима «вихревого кольца».

- В диссертации показано влияние нагрузки на ометаемую площадь винта и геометрической крутки на границы вихревого кольца, однако не дана оценка влияния этих параметров на КПД и на шум несущего винта.

**3. Кусюмов Александр Николаевич**, официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор. **Отзыв положительный**, заверен начальником управления делопроизводства и контроля федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» Бодряшкиной Д.С.

К работе имеются следующие замечания:

- На стр. 63 сказано: «В рамках применяемой теории несущей линии лопасти винта моделируются при помощи присоединенного вихря, состоящего из дискретных вихревых отрезков. Сходящий с лопастей винта свободный вихревой след также представляет собой систему вихревых отрезков». В диссертационной работе отсутствуют выражения, определяющие пространственное положение координат вихревых отрезков свободного вихревого следа.

- На режиме висения принято сравнивать положение сечений вихревого следа с расчетами по аналитическим формулам модели Kocurek – Tangler. Соответствующие сравнения в рукописи диссертации отсутствуют.

- В работе вводятся две величины, определяющие геометрические размеры ядра вихря: коэффициент диффузии и радиус ядра вихря. При этом в тексте рукописи отсутствуют выражения, определяющие связь между этими величинами. Кроме того, в обозначениях к рукописи имеются два символа, определяющих угловую частоту вращения винта:  $\Omega$  (большая) и  $\omega$  (малая). Символ  $\Omega$  в формулах рукописи отсутствует. Символ  $\omega$  встречается в формуле (2.17) для окружной скорости концевой части винта. Символ  $\omega$  определяет также выражения для пространственного поля завихренности (2.26) – (2.28).

- На стр. 80 сказано, «... начальный радиус концевого вихря, сходящего с лопасти НВ на режиме висения, составляет величину около 7% от хорды лопасти». При этом на стр. 84 дается иная оценка: «Начальный коэффициент диффузии менялся в пределах  $C_d = 0,005..0,03$ , что для данного винта



составляет величину радиуса вихря от  $\approx 0,015R$  до  $\approx 0,04R$  или  $0,15...0,4$  метра». Не ясно как согласуются различные оценки радиуса вихря.

- На стр. 93 сказано: «На основе практического опыта установлено, что количество оборотов винта, после которого возможно отбрасывание вихревого следа составляет порядка 12...15 оборотов. В большинстве расчетов в данной работе вихревой след отбрасывается после 14 оборотов». В диссертации отсутствует количественная оценка эффектов диффузии вихря с ростом числа оборотов, на основании которой можно производить отбрасывание следа.

- На рис. 2.1.20 представлено сравнение формы вихревого следа и толщины концевых вихрей на режиме висения на базе нелинейной вихревой модели и метода URANS. Можно предположить, что на рисунке, где вихревой след получен с применением метода URANS, для визуализации концевого вихря использовался Q-критерий. При этом за задней кромкой винта видна вихревая пелена, что является типичным для результатов, полученных при использовании CFD. На рисунке, где представлен результат визуализации, полученный с использованием нелинейной вихревой модели вихревая пелена отсутствует. Следовало бы сопоставить радиусы ядра концевого вихря, полученные двумя методами в различных сечениях.

- Коэффициент диффузии, согласно его определению, данному в работе, имеет размерность  $m^2$ . При этом в работе цифровые значения коэффициента диффузии даются без указания размерности.

- На рис. 3.3.6 показаны поля индуктивных скоростей в плоскости вращения винта. Отсутствует цветовая шкала скоростей. Вызывает вопрос практически одинаковое поле скоростей вне диска двухлопастного винта при различных значениях угла азимута лопастей винта. Тоже можно сказать и по отношению к четырехлопастному винту.

**4. Ефимов Вадим Викторович**, официальный оппонент, доктор технических наук, доцент. **Отзыв положительный**, заверен начальником управления персоналом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) Буниным А.В.

К работе имеются следующие замечания:

- При описании нелинейной лопастной вихревой модели винта в п. 2.1.3 не сформулированы допущения.

- Не понятно, на основании чего выбирались пороговые значения признаков вихревого кольца, представленные в таблице 2.1 – Числовые признаки для формирования границ режимов «вихревого кольца».

- При рассмотрении работы рулевого винта используются те же направления и обозначения осей системы координат, что и при рассмотрении



несущего винта, например, говорится, что режим вихревого кольца на рулевом винта возникает при снижении (стр. 276), что сбивает с толку.

- На стр. 308 говорится, что «...расчеты выполнялись с учетом продольной балансировки комбинации НВ и РВ, то есть из условия компенсации реактивного крутящего момента НВ тягой РВ», но здесь должна идти речь не о продольной, а о путевой балансировке.

- При исследовании влияния вихревого следа НВ на РВ потребные балансировочные углы установки лопастей РВ при различных углах скольжения определялись только из условия компенсации крутящего момента НВ рулевым винтом, однако, в данном случае нужно также учитывать аэродинамический момент рыскания корпуса вертолета, а также флюгерную устойчивость, что ставит под сомнение однозначность выводов, сделанных в Главе 6 диссертации относительно данного режима.

- В тексте диссертации встречаются опечатки, например на стр. 48 диссертации говорится о моделировании некоего винта  $d$ ; на стр. 138 даны ссылки на неверные номера рисунков: вместо 3.3.13, 3.3.14, 3.3.15 надо использовать 3.4.13, 3.4.14, 3.4.15; встречаются грамматические ошибки (несогласованность слов в предложении); на стр. 138 и стр. 139 текст полностью идентичен; на стр. 276 вместо аббревиатуры РВ используется НВ.

**5. Федеральное государственное казённое военное образовательное учреждение высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж)» (ВУНЦ ВВС «ВВА»), отзыв на автореферат. Отзыв положительный, Подписан начальником кафедры аэродинамики и безопасности полета кандидатом технических наук, доцентом Головневым А.В., заместителем начальника кафедры аэродинамики и безопасности полета кандидатом технических наук, доцентом Кондаловым М.В., профессором кафедры аэродинамики и безопасности полета вертолетов доктором технических наук, профессором Загорским В.А. Подписи Головнева А.В., Кондалова М.В. и Загорского В.А. заверены старшим помощником начальника строевого отдела Антоновым И.В.**

К работе имеются следующие замечания:

- На странице 3 автореферата написано, что «на режимах «вихревого кольца» наблюдается.... Рост индуктивной скорости, отбрасываемой винтом». Данное утверждение является не корректным, т.к. винты вертолета не отбрасывают индуктивные скорости.

- На стр. 5 автореферата указано, что «Целью исследования является разработка методов численного моделирования..., а также их приложение для повышения безопасности полета вертолетов». Однако из текста автореферата



не ясно, какие конкретно показатели безопасности полета вертолетов автор предполагает улучшить.

- На стр. 9 в разделе «Степень достоверности результатов исследования» нет каких-либо конкретных данных о количественной оценке точности и достоверности результатов, полученных автором. Ссылка на многочисленные сопоставления с данными экспериментальных летных исследований и результатами расчетов по другим методам не кажется убедительной, поскольку нет конкретных отсылок к результатам и вторам этих результатов. Также не указаны допущения о принятых автором уровнях приемлемой точности и достоверности полученных им результатов.

- На стр. 9 и 10 в разделе «личный вклад автора диссертационных исследований» указано, что личный вклад автора состоит, в том числе в докладах на конференциях и публикациях различного уровня. Вместе с тем из списка публикаций по теме диссертации следует, что автор имеет только одну публикацию без соавторов в журналах из перечня ВАК.

- На стр. 34 рис. 30.а приведены зависимости  $c_T=f(n)$  при  $V_y = 10$  м/с. Данные характеристики имеют явно выраженный нестационарный неустановившийся вид. Не ясно как из размытых областей получены точки и линии. Автор не указал, как им выполнена обработка полученных результатов и как он предполагает эти результаты в дальнейшем использовать. Будут ли это отдельные статистики или будет предложен какой-либо закон распределения полученных автором текущих случайных значений.

- Из автореферата не ясно учитывается ли полученные автором результаты особенности путевого, продольного и поперечного управления вертолетами, а также скорость и направление ветра. Для практического использования полученных автором результатов необходима их корректировка с учетом принятых в эксплуатации условий окружающей среды и рекомендуемых регламентами летной эксплуатации диапазонов и темпов перемещения органов управления вертолетами.

- Из автореферата не совсем понятен способ отбрасывания «старого» вихревого следа и дальнейшее продолжение расчёты, если это действие происходит после того как аэродинамические характеристики выходят на полку. Не являются ли пульсации коэффициентов  $c_T$  и  $m_K$  следствием некорректного отбрасывания «старого» вихревого следа или выбором величины расчетного шага?

- На странице 43-44 автореферата приведены результаты «исследования» возможности попадания РВ в режимы «вихревого кольца» под индуктивным влиянием вихревого следа НВ. При этом не ясно, почему не учитывается влияние боковой составляющей скорости  $V_z$  индуктивного потока от



несущего винта, образующегося из-за закручивания потока и оказывающего непосредственное воздействие на работу рулевого винта.

- Из автореферата не ясно, каким образом в предлагаемой нелинейной лопастной вихревой модели, которая решает прямую задачу аэродинамики, исследовалось сближение лопастей соосного винта вертолета.

**6. Акционерное общество «Национальный центр вертолетостроения им. М.Л. Миля и Н.И. Камова» (АО «НЦВ Миль и Камов»)**, отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан главным конструктором, начальником отделения аэродинамики, кандидатом технических наук Павлиди Ф.Н., утвержден первым заместителем генерального директора АО "НЦВ Миль и Камов" по разработке и научно-техническому развитию Тарасовым А.С.

К работе имеются следующие замечания:

- В автореферате не представлено обоснование использования для расчета аэродинамических характеристик элементов лопасти гипотезы плоских сечений при моделировании режимов «вихревого кольца», имеющих сложную пространственную и нестационарную по времени структуру вихревого следа вблизи лопастей.

- Представляется целесообразным исключать из расчета «старый» вихревой след исходя не из количества оборотов винта, а исходя из определенного расстояния от вихревого следа до винта, которое зависит от параметров моделируемого режима.

**7. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Восточно-Сибирский государственный университет технологий и управления» (ФГБОУ «ВСГУТУ»)** отзыв на автореферат. **Отзыв положительный**, подписан деканом Машиностроительного факультета, кандидатом технических наук, доцентом Шурыгиным Ю.Л., заведующим кафедрой «Самолето- и вертолетостроение», кандидатом технических наук, доцентом Цыдыповым Ц.Ц. Подписи Шурыгина Ю.Л. и Цыдыпова Ц.Ц. заверены начальником УД ВСГУТУ Хантаевой И.Н.

К работе имеются следующие замечания:

- В автореферате не расшифрованы некоторые условные обозначения, например, относительные безразмерные скорости, обозначаемые сверху символом «волна».

- На рисунке 9 и в тексте не указаны условия, при которых получены представленные эпюры скоростей.



- На графиках на рисунках 14.6 автореферата отсутствует обозначение по оси ОУ, а на диаграммах на рисунках 15 и 16 не отмечена цена делений обеих осей.

- При описании результатов исследования влияния НВ на РВ (стр. 43-45 автореферата) указано как меняется угол скольжения вертолета и скорость набегающего потока, но не обозначена величина угла атаки НВ.

**8. Филиал федерального государственного казённого военного образовательного учреждения высшего образования «Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж) в г. Сызрани (филиал ВУНЦ ВВС «ВВА» в г. Сызрани), отзыв на автореферат. Отзыв положительный, подписан профессором кафедры «Аэродинамики и динамики полета», кандидатом технических наук, доцентом Онушкиным Ю.П. Подпись Онушкина Ю.П. заверена врио начальника отдела кадров ВУНЦ ВВС «ВВА» в г. Сызрани М. Ельниковым.**

К работе имеются следующие замечания:

- При рассмотрении различных моделей несущих винтов, отличающихся геометрической компоновкой, расчетной нагрузкой, величиной концевой радиуса, геометрической круткой и пр. отсутствует, на наш взгляд, оценка влияния аэродинамической крутки и динамической крутки, которая характерна для лопастей, выполненных из композиционных материалов

- Вводится такой термин как кинематическая скорость. Из автореферата не ясно, предполагается ли там учет махового движения лопасти и учет, возможно, упругой составляющей скорости.

- Отдельно хотелось бы остановиться на том, что негативное влияние режима «вихревого кольца» возможно лишь при строго определенном сочетании целого ряда факторов. Но как только ситуация меняется, то и само явление исчезает. Важно понимать, что режим «вихревого кольца» на рулевом винте – это лишь одна из причин возникновения более сложного явления, такого как лавинообразное самопроизвольное левое вращение вертолета.

**9. Федеральное автономное учреждение «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ»), отзыв на автореферат. Отзыв положительный, подписан научным руководителем НИЦ КИиРВКЛА, доктором технических наук, старшим научным сотрудником Головкиным М.А. Подпись Головкина М.А. заверена ученым секретарем диссертационного совета 31.1.006.01, д.ф.-м.н. Брутяном М.А.**

Отзыв замечаний не содержит.



**10. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ»,** отзыв на автореферат. **Отзыв положительный,** подписан заведующим доцентом кафедры Аэрогидромеханики, кандидатом технических наук Батраковым А.С. кафедрой Аэрогидромеханики, кандидатом технических наук Николаевым Е.И. Подписи Николаева Е.И. и Батракова А.С. заверены начальником управления делопроизводства и контроля федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева - КАИ» Бодряшкиной Д.С.

К работе имеются следующие замечания:

- При описании математической модели отсутствует информация о способе моделирования махового движения лопастей.
- На рисунке 6 не совсем понятен символ « $\varphi_{7ij}$ ». Предположительно указанный угол стоило обозначить « $\varphi_{7ij} + \Delta\varphi_{ij}$ ».
- В автореферате в явном виде не представлена связь между введенным параметром коэффициента диффузии  $C_d$  и радиусом ядра вихря  $r_{\text{я}}$ .
- На рисунке 13.б и 13.г по оси ординат отложено значение средней величины индуктивной скорости без указания размерности (предположительно м/с).

**11. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Институт имени Н.Е. Жуковского»,** отзыв на автореферат. **Отзыв положительный,** подписан директором проектного комплекса «Авиационные комплексы вертикального и короткого взлета и посадки», доктором технических наук, Топоровым Н.Б. Утвержден первым заместителем генерального директора ФГБУ «НИЦ «Институт имени Н.Е. Жуковского», доктором технических наук, профессором Шапкиным В.С.

К работе имеются следующие замечания:

- Отсутствие результатов исследования возможности применения предлагаемых методов к винтам и компоновкам несущих систем беспилотных летательных аппаратов массой до 300 кг.
- Отсутствие результатов исследований в области режимов «вихревого кольца» несущих систем перспективных скоростных винтокрылых летательных аппаратов вертикального взлета и посадки с поворотными винтами типа «конвертоплан».

**12. Федеральное государственное учреждение "Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В.**



**Келдыша Российской академии наук", отзыв на автореферат. Отзыв положительный**, подписан главным научным сотрудником, доктором физико-математических наук, Козубской Т.К., старшим научным сотрудником, кандидатом физико-математических наук Бобковым В.Г. Подписи Козубской Т.К. и Бобкова В.Г. заверены ученым секретарём ИМП им. М.В. Келдыша РАН, кандидатом физико-математических наук Давыдовым А.А.

К работе имеются следующие замечания:

- Автор часто использует иллюстрации «вихревого следа», не поясняя что собой представляет данная визуализация.
- При сравнении результатов численного моделирования с другими, экспериментальными или расчётными данными автор оперирует нестрогими терминами «хорошее совпадение», «удовлетворительно согласуется», не приводя никаких количественных оценок. Не говоря уже о том, что совпадение по смыслу этого слова, не может быть хорошим или плохим.
- Из автореферата неясно, насколько автоматизирован процесс выбора ключевого параметра метода – коэффициента диффузии  $C_d$ .
- В качестве одного из способов ускорения расчета использовалось отбрасывание «старого» вихревого следа, на основании того, что полное разрушение вихрей происходит достаточно быстро». Не следовало ли на этом основании «удалять» вихри, оценивая степень их диссипации, а не жестко ограничивать время их жизни?
- Из автореферата неясно, насколько велико влияние фюзеляжа вертолета в исследуемых режимах «вихревого кольца»
- В автореферате есть ошибки в нумерации таблиц, из-за которых не всегда очевидно, на какую именно таблицу ссылается автор в тексте.
- При всей аккуратности написания автореферата в целом можно отметить и ряд оформительских недочетов. Самый существенный из них связан с низким качеством иллюстраций. Схемы и графики, в большом количестве приложенные в автореферате, следовало бы представить в векторном формате, чтобы в электронном варианте их можно было свободно увеличивать для удобства читателя.

**13. Государственный научный центр Российской Федерации акционерное общество «Летно-исследовательский институт имени М.М. Громова» (АО «ЛИИ им. М.М. Громова»), отзыв на автореферат. Отзыв положительный**, подписан главным научным сотрудником НИО-3, доктором физико-математических наук, доцентом Москалевым П.В. Отзыв утвержден Генеральным директором АО «ЛИИ им. М.М. Громова», кандидатом технических наук Пушкарским Е.Ю.



К работе имеются следующие замечания:

- Использование нелинейных вихревых моделей часто требует значительных вычислительных мощностей, что сдерживает их применение в условиях ограниченных ресурсов. Было бы полезно указать, насколько реализация этих моделей более или менее трудоемка по сравнению, например, с классическими панельными или сеточными методами для вихревой модели Рэнкина.

- В автореферате указано, что результаты диссертации внедрены в АО «НЦВ Миль и Камов» и ФАУ «ЦАГИ», но не вполне ясно сформулированы конкретные практические рекомендации по оптимизации систем управления и методики летных испытаний винтокрылых летательных аппаратов для повышения безопасности полетов.

**14. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА), отзыв на автореферат. Отзыв положительный,** подписан заведующим кафедрой аэродинамики, конструкций и прочности летательных аппаратов, доктором технических наук, профессором Киселевым М.А., доцентом кафедры аэродинамики, конструкций и прочности летательных аппаратов, кандидатом технических наук, доцентом Ефимовой М.Г. Подписи Киселева М.А. и Ефимовой М.Г. заверены начальником управления персоналом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (МГТУ ГА) Буниным А.В.

К работе имеются следующие замечания:

- В тексте автореферата используются относительные скорости, но не дается их расшифровка.

- Из рассмотрения автореферата осталось не ясным, учитывалась ли нестационарность аэродинамических характеристик профилей лопастей при расчете аэродинамических сил и моментов на винте.

- Подъемная сила и сила лобового сопротивления, их коэффициенты относятся в скоростной системе координат, поэтому в составе индексов их коэффициентов необходимо указывать букву «а».

**15. Акционерное общество «Улан-Удэнский авиационный завод», отзыв на автореферат, отзыв на автореферат. Отзыв положительный,** подписан начальником лётно-испытательной станции, летчиком-испытателем, кандидатом социологических наук Колесниковым В.В. Подпись Колесникова В.В. заверена начальником отдела по работе с персоналом Баракиным А.В.

К работе имеются следующие замечания:



- Желательно было бы подробнее рассмотреть опыт проводимых практических исследований режимов «вихревого кольца» летчиками-испытателями АО «НЦВ Миль и Камов», АО «ЛИИ им. М.М. Громова», ЛИО ЛИЦ АСЦ ФГУП ГосНИИ ГА и других организаций экспериментальной авиации, что явилось бы важным с точки зрения практической составляющей в проводимом исследовании с выработкой рекомендаций с целью повышения безопасности полета вертолетов.

**16. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)», отзыв на автореферат. Отзыв положительный, подписан доктором технических наук, профессором, профессором кафедры «Аэрокосмические системы» Щегловым Г.А., заверен ведущим специалистом по персоналу управления кадрового сопровождения и администрирования Назаровой О.В.**

К работе имеются следующие замечания:

- В автореферате при описании метода численного моделирования АДХ винтов в области режимов «вихревого кольца» математическая постановка задачи исследования течения несжимаемой среды описана не полностью: для уравнения сохранения импульса (1) не указаны граничные условия. Не указано, какое условие рассматривается автором на подвижной обтекаемой поверхности.

- В автореферате не приводятся дискретные аналоги уравнения (1) и интеграла (2) которые фактически используются автором в численном методе. В уравнении (1) автором сохранен член, отвечающий за вязкость среды, формулы (8) и (9) записаны относительно непрерывного поля завихренности. Однако не приведены выражения или алгоритмы, описывающие изменение параметров дискретных вихревых отрезков под действием вязкости (т.е. с учетом коэффициента диффузии  $C_d$ )?

- В тексте приведено уравнение (10) для расчета циркуляции  $\Gamma$  присоединенных вихрей и указано, что он решается методом последовательных приближений. Сам алгоритм метода решения (10) не приведен и не понятно, сколько итераций требуется для нахождения неизвестных циркуляций. Из автореферата не ясно, почему для расчета циркуляции в данном методе нельзя построить и решить систему линейных алгебраических уравнений, как это обычно делается в большинстве вихревых методов?

- В автореферате нет данных методических расчетов, показывающих, как меняются результаты расчетов аэродинамических характеристик при



изменении параметров расчётной схемы: при увеличении числа вихревых элементов по радиусу, при уменьшении шага численного интегрирования и т.п.

- Текст автореферата не свободен от опечаток, в частности в тексте имеется две таблицы 3 и пр.

**17. Публичное акционерное общество «Яковлев» - Филиал ПАО «Яковлев» - «Региональные самолеты», отзыв на автореферат. Отзыв положительный,** подписан начальником НИО Аэродинамики - заместителем главного конструктора Бабулиным А.А, главным специалистом департамента аэродинамических характеристик НИО Аэродинамики, кандидатом физико-математических наук Березко М.Э. Утвержден заместителем директора по разработке Филиала ПАО «Яковлев» Кубасовым А.В.

К работе имеются следующие замечания:

- С чем связано то, что в работе рассмотрена работа винтов в режимах «вихревого кольца» только для вертолетов одновинтовой и соосной схемы? Одни из перспективных направлений является применение поперечной схемы, которая используется, например, для летательных аппаратов типа конвертоплан. Было бы интересно осветить вопросы, связанные с возможными особенностями режимов «вихревого кольца» для подобных конфигураций несущих систем.

- В работе не рассмотрены вопросы моделирования и поиска стратегии оптимального выхода вертолета из режимов «вихревого кольца», в случае их возникновения. Планируется ли дальнейшее развитие данного направления?

**18. Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева», отзыв на автореферат. Отзыв положительный,** подписан доктором технических наук, профессором Григорьевым В.А. Подпись Григорьева В.А. заверена Ученым секретарем Самарского университета Васильевой И.П.

К работе имеются следующие замечания:

- По нашему мнению было бы целесообразно переформулировать цель работы, которая заключается в повышении безопасности полетов с помощью разработанных методов. В работе рассмотрены вопросы аэродинамики винтов вертолетов одновинтовой и соосной схем на режимах «вихревого кольца».

- Было бы целесообразно, хотя бы ограниченно рассмотреть особенности аэродинамик двухвинтовых несущих систем вертолетов продольной и поперечной схем на режимах «вихревого кольца».

- По нашему мнению в автореферате желательно видеть больше иллюстраций особенностей обтекания на режиме «вихревого кольца», а также



примеров так называемой тороидальной формы «вихревого следа» на этих режимах. Хотя такие иллюстрации встречаются далее, первоначально это может быть препятствием к пониманию материала.

**Выбор официальных оппонентов и ведущей организации** обосновывается наличием публикаций, компетентностью, опытом научных исследований в области вычислительной и экспериментальной аэродинамики и смежных областях, в том числе аэродинамики винтов вертолетов, соответствующим паспорту специальности 2.5.12. «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов», и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Акционерное общество «Казанский вертолетный завод» – одно из ведущих предприятий российской вертолетной отрасли, включающее в себя опытно-конструкторское бюро, осуществляющее полный цикл разработки вертолетной техники (АО «Казанский вертолетный завод» - разработчик перспективного серийного многоцелевого вертолета «Ансат» и других проектов), реализующее передовые научные исследования и разработки, в том числе в области аэродинамики вертолета и в смежных направлениях, вносящее значительный вклад в развитие отечественной вертолетной отрасли. Отзыв на диссертационную работу обсужден на заседании научно-технического совета АО «Казанский вертолетный завод» и подписан учеными, ведущими сотрудниками отдела расчетов опытно-конструкторского бюро, непосредственно занимающимися вопросами аэродинамики, динамики и прочности вертолетов.

Неделько Дмитрий Валерьевич – доктор технических наук, доцент, автор значительного количества работ в области, аэродинамики, динамики и прочности вертолетов.

Сафиуллин Айрат Фанилевич – кандидат технических наук, специалист в области аэродинамики и прочности вертолета, что также подтверждается многочисленными публикациями.

**Диссертационный совет отмечает**, что диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, на основании выполненных соискателем исследований разработаны и развиты новые эффективные методы численного моделирования нестационарных аэродинамических характеристик и формирования границ области режимов «вихревого кольца» винтов, с применением которых в работе решен ряд актуальных прикладных задач аэродинамики винтов в области режимов «вихревого кольца», и получены новые научные результаты, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие аэродинамики винта и повышение безопасности полета вертолетов.



### **Новизна полученных результатов заключается в том, что:**

1. Разработан новый метод численного моделирования совокупности аэродинамических характеристик винтов в области режимов «вихревого кольца» на базе нелинейной лопастной вихревой модели, отражающий основные особенности данных режимов с учетом геометрической компоновки и других индивидуальных параметров винтов.

2. Разработан новый метод формирования границ области режимов «вихревого кольца» на основе анализа совокупности аэродинамических характеристик винтов по характерным признакам, позволяющий, в сравнении с существующими подходами, уточнить границы данных режимов и проанализировать их внутреннюю область.

3. Разработанные методы позволили установить новые закономерности, касающиеся:

3.1. Особенности физических процессов, протекающих при работе винта на режимах «вихревого кольца», причинах возникновения наблюдаемых при этом явлений и их связях между собой.

3.2. Влияния геометрической компоновки и нагрузки на аэродинамические характеристики винтов в области режимов «вихревого кольца» и ее границы.

4. С применением разработанных методов впервые в отечественной и зарубежной практике выполнены:

4.1. Комплексные расчетные исследования аэродинамических характеристик одиночных и соосных несущих винтов на примере ряда серийных и перспективных отечественных вертолетов (Ми-8/17, Ка-32, Ка-226Т, Ка-62) на режимах «вихревого кольца».

4.2. Расчетные исследования сближения лопастей верхнего и нижнего винтов вертолетов соосной схемы при крутом снижении в области режимов «вихревого кольца».

4.3. Сравнительные расчетные исследования аэродинамических характеристик на режимах «вихревого кольца» для классического 3-лопастного и перспективного Х-образного рулевых винтов вертолетов семейства Ми-8/17.

4.4. Расчетные исследования индуктивного влияния вихревого следа несущего винта на рулевой винт вертолета одновинтовой схемы семейства Ми-8/17 при полете с малыми скоростями со скольжением, в том числе на режимах «вихревого кольца» РВ.

### **Теоретическая значимость**

1. Разработан новый метод расчета аэродинамических характеристики винта на режимах «вихревого кольца» на базе нелинейной



лопастной вихревой модели, включающий: поправку для начального радиуса ядра вихрей за лопастями винта на режимах «вихревого кольца», учитывающую особенности данных режимов, наблюдаемые в экспериментах; способ «отбрасывания» части вихревого следа винта с течением времени, позволяющий отразить физические особенности работы винта, значительно ускорить расчет нестационарных аэродинамических характеристик винта на режимах «вихревого кольца» и впервые реализовать на практике ряд актуальных, связанных с этими режимами задач.

2. Разработан новый метод формирования частных (по отдельным признакам) и обобщенных границ данных режимов, базирующийся на анализе аэродинамических характеристик винта, отражающих реальные физические процессы, наблюдаемые в экспериментальных исследованиях.

3. С применением разработанных методов:

3.1. Установлено значительное влияние индивидуальных параметров моделей винтов и условий проведения эксперимента на аэродинамические характеристики винтов, получаемые на режимах «вихревого кольца».

3.2. Показано отсутствие универсальности зависимостей аэродинамических характеристик винта и границ области режимов «вихревого кольца», выраженных в относительных скоростных координатах « $\tilde{V}_x - \tilde{V}_y$ ».

3.3. Проанализированы связи между структурами вихревого следа, картинami обтекания винтов и их эволюцией во времени на режимах «вихревого кольца» с особенностями поведения их интегральных и распределенных нестационарных аэродинамических характеристик.

3.4. Установлена необходимость определения границ области режимов «вихревого кольца» для каждого конкретного винта с учетом его геометрической компоновки и других параметров.

**Практическая значимость диссертации** заключается в следующем:

1. Реализована на практике возможность численного моделирования полной совокупности аэродинамических характеристик винтов различных схем на режимах «вихревого кольца», позволяющей определить уточненные границы этих режимов в координатах « $V_x - V_y$ » для винтов существующих, модернизируемых и разрабатываемых вертолетов с учетом индивидуальных геометрических характеристик и параметров винтов, с использованием доступных вычислительных средств – персональных ЭВМ повышенной производительности.

2. Получены закономерности, позволяющие:

2.1. Учитывать влияние геометрической компоновки винтов и нагрузки на ометаемую поверхность на аэродинамические характеристики и границы области режимов «вихревого кольца», на этапе выбора параметров несущей



системы вертолетов различных схем.

2.2. Учитывать особенности режимов «вихревого кольца» при планировании и проведении экспериментальных исследований для исключения возникновения возможных погрешностей.

3. Решен ряд актуальных задач аэродинамики НВ и РВ вертолетов в области режимов «вихревого кольца», и получены результаты, способствующие повышению безопасности полета:

- получены аэродинамические характеристики, построены и проанализированы границы режимов «вихревого кольца» для изолированных НВ и РВ ряда наиболее распространенных и перспективных отечественных вертолетов: одиночные и соосные НВ вертолетов Ми-8/17, Ка-226Т, Ка-62, Ка-32, классический 3-лопастной и перспективный Х-образный РВ вертолетов семейства Ми-8/17.

- исследовано сближение лопастей верхнего и нижнего винтов соосного НВ вертолета Ка-32 на режимах «вихревого кольца».

- исследовано индуктивное влияние вихревого следа НВ на аэродинамические характеристики РВ на примере одновинтового вертолета семейства Ми-8/17 на режимах полета с малыми скоростями со скольжением.

4. Полученные в результате выполнения работы новые научные данные внедрены в учебный процесс при подготовке инженеров по специальности «Самолето- и вертолетостроение» направления «Вертолетостроение» в рамках курса «Аэродинамический расчет вертолета».

**Значение полученных соискателем результатов исследования для практики** подтверждается следующими Актами о внедрении:

1. Акт о внедрении в ФАУ «ЦАГИ» от 16.07.2024 г.
2. Акт о внедрении в ФГБОУ ВО «МАИ (НИУ)» от 09.08.2024 г.
3. Акт о внедрении в АО «НЦВ Миль и Камов» от 07.11.2024 г.

**Результаты диссертационной работы рекомендуются к использованию** в научно-исследовательских и опытно-конструкторских работах, касающихся различных аспектов проектирования винтокрылых летательных аппаратов вертикального взлета и посадки, в том числе: задач численного моделирования и расчета аэродинамических характеристик винтов на режимах крутого снижения в области режимов «вихревого кольца»; задач расчета летно-технических характеристик и определения границ области режимов «вихревого кольца»; задач подготовки и проведения экспериментальных исследований аэродинамики винтов в области режимов «вихревого кольца»; в качестве материалов специальных курсов лекций для студентов и аспирантов высших учебных заведений, ориентированных на вертолетную тематику, а также при подготовке пилотов вертолетов.



**Достоверность результатов исследования** обеспечивается корректным использованием методов математического моделирования, а также выполненным сопоставлением результатов численного моделирования аэродинамических характеристик винтов на режимах «вихревого кольца», полученных в работе с применением разработанных методов, с имеющимися данными экспериментальных модельных и летных исследований, и результатами расчетов по другим методикам.

**Личный вклад автора состоит** в непосредственной реализации всех этапов диссертационного исследования:

- сборе и анализе информации в части текущего состояния и опыта экспериментальных и численных исследований режимов «вихревого кольца» винтов;

- формировании концепции теоретических и прикладных исследований режимов «вихревого кольца» на базе методов численного моделирования и формировании требований к таким методам;

- разработке и валидации нового метода расчета нестационарных аэродинамических характеристик винтов на режимах «вихревого кольца» на базе нелинейной лопастной вихревой модели;

- разработке и валидации нового метода формирования границ области режимов «вихревого кольца» на базе анализа предложенной совокупности признаков, отражающих реальные физические процессы, протекающие на данных режимах;

- постановке и решении ряда актуальных прикладных задач аэродинамики винтов вертолета в области режимов «вихревого кольца» с получением новых закономерностей и данных, вносящих значительный вклад в аэродинамику винтов на режимах «вихревого кольца» и в повышение безопасности полета вертолетов;

- апробации и внедрении результатов работы в ведущих организациях отечественной вертолетной отрасли и в учебный процесс высшей школы при подготовке будущих инженерных и научных работников.

**В ходе защиты критических замечаний высказано не было.**

**В диссертационной работе все заимствованные материалы представлены со ссылкой на автора или источник.** Тем самым работа удовлетворяет п.14 Положения о присуждении ученых степеней.

На заседании 10 июня 2025 г. диссертационный совет пришел к заключению, что диссертация представляет собой завершенную научно-исследовательскую работу, которая соответствует критериям, установленным Положением ВАК РФ о присуждении ученых степеней, утверждённым Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к



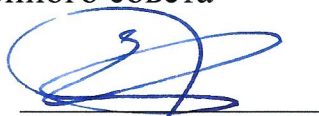
диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, и постановил, за **решение научной проблемы, имеющей важное хозяйственное значение**, разработку новых научно обоснованных методов и получение новых научных результатов, внедрение которых вносит значительный вклад в аэродинамику винта и повышение безопасности полета вертолетов, присудить Макееву Павлу Вячеславовичу ученую степень доктора технических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 17 человек, из них 7 докторов наук по специальности 2.5.12. – «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов», участвовавших в заседании, из 22 человек, входящих в состав совета, проголосовали: «за» – 17, «против» – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Заместитель председателя диссертационного совета

24.2.327.09, д.т.н., профессор

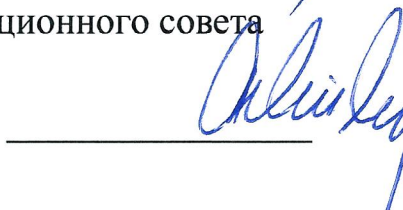
Евдокименков Вениамин Николаевич



Ученый секретарь диссертационного совета

24.2.327.09, к.т.н., доцент

Стрелец Дмитрий Юрьевич



«10» июня 2025 г.

Проректор по научной работе, д.т.н., доцент

Иванов Андрей Владимирович