

## СВЕДЕНИЯ О РЕЗУЛЬТАТАХ ПУБЛИЧНОЙ ЗАЩИТЫ ДИССЕРТАЦИИ

Диссертационный совет Д 212.267.13, созданный на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», извещает о результатах состоявшейся 22 марта 2019 года публичной защиты диссертации Степанова Кирилла Александровича «Оптимизация формы крыльев беспилотных летательных аппаратов на основе решения уравнений Навье–Стокса» по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

На заседании присутствовали 20 из 26 членов диссертационного совета, из них 5 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы:

- |  |          |
|--|----------|
| 1. Шрагер Г. Р., доктор физико-математических наук, профессор,<br>председатель диссертационного совета,                      | 01.02.05 |
| 2. Христенко Ю. Ф., доктор технических наук, старший научный сотрудник,<br>заместитель председателя диссертационного совета, | 01.02.04 |
| 3. Пикущак Е. В., кандидат физико-математических наук,<br>ученый секретарь диссертационного совета,                          | 01.02.05 |
| 4. Архипов В. А., доктор физико-математических наук, профессор,  | 01.02.05 |
| 5. Бубенчиков А. М., доктор физико-математических наук, профессор,   | 01.04.14 |
| 6. Бутов В. Г., доктор физико-математических наук, профессор,  | 01.04.14 |
| 7. Глазунов А. А., доктор физико-математических наук, профессор,   | 01.02.05 |
| 8. Глазырин В. П., доктор физико-математических наук,  | 01.02.04 |
| 9. Крайнов А. Ю., доктор физико-математических наук, профессор,  | 01.04.14 |
| 10. Лапшин О. В., доктор физико-математических наук,   | 01.04.14 |
| 11. Люкшин Б. А., доктор физико-математических наук, профессор,  | 01.02.04 |
| 12. Миньков Л. Л., доктор физико-математических наук, профессор,   | 01.04.14 |
| 13. Пономарев С. В., доктор физико-математических наук,<br>старший научный сотрудник,  | 01.02.04 |
| 14. Прокофьев В. Г., доктор физико-математических наук, доцент,  | 01.04.14 |
| 15. Скрипняк В. А., доктор физико-математических наук, профессор,  | 01.02.04 |
| 16. Старченко А. В., доктор физико-математических наук, профессор,   | 01.04.14 |
| 17. Тимченко С. В., доктор физико-математических наук,<br>старший научный сотрудник,   | 01.02.05 |
| 18. Черепанов О. И., доктор физико-математических наук, профессор,   | 01.02.04 |
| 19. Шрагер Э. Р., доктор физико-математических наук, доцент,   | 01.04.14 |
| 20. Якутенок В. А., доктор физико-математических наук,<br>старший научный сотрудник,   | 01.02.05 |

**Заседание провёл председатель диссертационного совета доктор физико-математических наук, профессор Шрагер Геннадий Рафаилович.**

По результатам защиты диссертации тайным голосованием (результаты голосования: за присуждение ученой степени – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить К.А. Степанову учёную степень кандидата физико-математических наук.

**Заключение диссертационного совета Д 212.267.13,  
созданного на базе федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национальный исследовательский Томский государственный университет»  
Министерства науки и высшего образования Российской Федерации,  
по диссертации на соискание ученой степени кандидата наук  
аттестационное дело № \_\_\_\_\_**

решение диссертационного совета от 22.03.2019 № 366

О присуждении **Степанову Кириллу Александровичу**, гражданину Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Оптимизация формы крыльев беспилотных летательных аппаратов на основе решения уравнений Навье–Стокса»** по специальности **01.02.05** – Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 27.12.2018 (протокол заседания № 364) диссертационным советом Д 212.267.13, созданным на базе федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (634050, г. Томск, пр. Ленина, 36, приказ о создании диссертационного совета № 105/нк от 11.04.2012).

Соискатель **Степанов Кирилл Александрович**, 1991 года рождения.

В 2018 году соискатель очно окончил федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» с выдачей диплома об окончании аспирантуры.

Работает в должности специалиста в Обществе с ограниченной ответственностью «ОПТИМЕНГА – 777» (г. Москва).

Диссертация выполнена на кафедре математической физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет» Министерства образования и науки Российской Федерации.

Научный руководитель – доктор физико-математических наук, **Тимченко Сергей Викторович**, федеральное государственное автономное образовательное

учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра математической физики, профессор.

Официальные оппоненты:

**Голубкин Валерий Николаевич**, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», НИО-2, отдел 11, сектор 21, ведущий научный сотрудник

**Лежнин Сергей Иванович**, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория проблем тепломассопереноса, главный научный сотрудник

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное бюджетное учреждение науки **Физико-технический институт имени А.Ф. Иоффе Российской академии наук**, г. Санкт-Петербург, в своем положительном отзыве, подписанном **Бобашевым Сергеем Васильевичем** (доктор физико-математических наук, профессор, лаборатория физической газовой динамики, главный научный сотрудник) и **Шмидтом Александром Александровичем** (кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, сектор численного моделирования, заведующий сектором) указала, что актуальность темы диссертационного исследования определяется необходимостью разработки новых беспилотных летательных аппаратов, обладающих высоким уровнем аэродинамических характеристик, которые в настоящее время находят все более широкое гражданское и военное применение. К. А. Степановым разработан новый вариант генетического алгоритма с вещественным кодированием пространства поиска, обеспечивающего большую надежность получения глобального экстремума для мультимодальных функций; разработан метод оптимизации формы крыльев беспилотных летательных аппаратов, позволяющий учитывать большое количество аэродинамических и геометрических ограничений на решение; проведена верификация разработанного метода на примере оптимизации крыльев летательных аппаратов для трансзвуковых режимов течения; проведено оптимальное аэродинамическое проектирование формы уединенных

крыльев беспилотных летательных аппаратов и крыльев, учитывающих наличие фюзеляжа, на основе численного решения полных уравнений Навье–Стокса; предложен новый эвристический алгоритм оптимизации (вариант генетического алгоритма), обеспечивающий большую надежность получения глобального экстремума для мультимодальных функций; разработан метод оптимизации формы беспилотных летательных аппаратов, позволяющий учитывать большое количество ограничений; впервые получены и проанализированы оптимальные формы крыльев беспилотных летательных аппаратов на основе численного решения полных уравнений Навье–Стокса при низких числах Маха и больших значениях коэффициента подъемной силы и обнаружено, что начальное приближение практически не влияет на форму оптимальных крыльев. Результаты исследования дополняют теоретические представления об аэродинамике беспилотных летательных аппаратов и форме их оптимальных крыльев при низких числах Маха и могут послужить основой для проектирования перспективных беспилотных летательных аппаратов различных классов.

Соискатель имеет 6 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 6 работ, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 3 работы (из них 2 в российском научном журнале, входящем в Web of Science), в сборниках материалов международных и всероссийских научных и научно-практических конференций (из них 1 зарубежная конференция) опубликовано 3 работы. Общий объем публикаций – 2,79 а.л., авторский вклад – 1,56 а.л.

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

Наиболее значительные работы по теме диссертации, опубликованные в журналах, включенных в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук:

1. **Степанов К. А.** Аэродинамическое проектирование изолированного трехмерного крыла беспилотного летательного аппарата / К. А. Степанов,

С. В. Тимченко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2018. – № 54. – С. 118–130. – DOI: 10.17223/19988621/54/10. – 0,81 / 0,48 а.л.

*Web of Science:*

**Stepanov K. A.** Aerodynamic design for an isolated three-dimensional wing of an unmanned aerial vehicle / K. A. Stepanov, S. V. Timchenko // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2018. – № 54. – P. 118–130.

2. Пейгин С. В. Технология оптимального проектирования аэродинамических конфигураций на основе решений полных уравнений Навье-Стокса / С. В. Пейгин, **К. А. Степанов**, С. В. Тимченко / Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2017. – № 50. – С. 90–98. – DOI: 10.17223/19988621/50/8. – 0,56 / 0,21 а.л.

*Web of Science:*

Peygin S. V. An optimal design technology for aerodynamic configurations based on the numerical solutions of the full Navier-Stokes equations / S. V. Peygin, **K. A. Stepanov**, S. V. Timchenko // Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Matematika i mekhanika – Tomsk State University Journal of Mathematics and Mechanics. – 2017. – № 50. – P. 90–98.

3. Орлов С. А. Эффективная реализация нелинейных ограничений при оптимизации трехмерных трансзвуковых крыльев / С. А. Орлов, С. В. Пейгин, **К. А. Степанов**, С. В. Тимченко // Вестник Томского государственного университета. Математика и механика. – 2015. – № 1 (33). – С. 72–81. – DOI: 10.17223/19988621/33/7. – 0,62 / 0,15 а.л.

На автореферат поступило 4 положительных отзыва. Отзывы представили:  
1. **В. А. Гасилов**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий отделом «Математические модели высокотемпературной гидродинамики» Федерального исследовательского центра Института прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, г. Москва, с замечанием: При исследовании полученных в работе оптимальных крыльев почему-то не используется такая традиционная характеристика, как

аэродинамическое качество. 2. **В. В. Кручинин**, д-р техн. наук, доц., заведующий кафедрой технологий электронного обучения Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники, *с замечанием*: При исследовании предложенного алгоритма оптимизации на примере функции Растригина помимо сравнения нового метода с ранее разработанным, но также своим методом следовало показать, как будут выглядеть сравнения с результатами других авторов. 3. **С. С. Бондарчук**, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., профессор Кафедры общей биологии и методики обучения биологии Томского государственного педагогического университета, *с замечанием*: Применение прямых методов оптимизации в случае, когда для расчета целевой функции требуется решение достаточно сложной трехмерной задачи, требует чрезвычайно больших машинных ресурсов. Из текста автореферата непонятно, использовались ли для реализации алгоритма параллельные вычисления, и если да, то какими конкретно средствами. 4. **И. И. Вигдорович**, д-р физ.-мат. наук, ст. науч. сотр., ведущий научный сотрудник 110-й Лаборатории механики многофазных сред Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, *с замечанием*: При исследовании предложенного алгоритма оптимизации на примере функции Растригина не указаны диапазоны изменения независимых переменных, и *с вопросом*: Решение этой задачи с точностью до 0.001 имеет какой-то практический смысл?

В отзывах отмечается, что актуальность темы исследования обусловлена растущим во всем мире вниманием к беспилотным летательным аппаратам, имеющим широкое гражданское и военное применение. К. А. Степановым разработан метод глобальной оптимизации, обеспечивающий получение оптимальной формы крыльев беспилотных летательных аппаратов при многочисленных геометрических и аэродинамических ограничениях; предложенный метод верифицирован на примере крыльев конкретных трансзвуковых самолетов; исследован вопрос о влиянии геометрических параметров задачи на оптимальные профили; получены и исследованы оптимальные формы крыльев беспилотных летательных аппаратов, при наличии большого количества аэродинамических и геометрических ограничений на

решение; исследован вопрос об устойчивости оптимального решения к исходным данным; показано, что начальное приближение практически не влияет на форму оптимальных крыльев. Полученные результаты вносят вклад в развитие аэродинамики летательных аппаратов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **В. Н. Голубкин** – известный специалист в области механики жидкости и газа, аэродинамики летательных аппаратов; **С. И. Лежнин** – известный специалист в области компьютерного моделирования задач гидродинамики и теплообмена, моделирования ударноволновых и вихревых структур; **Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе РАН** известен достижениями в области численного моделирования задач механики жидкости, газа и плазмы; математического моделирования и анализа природных, социальных и технологических процессов с применением высокопроизводительных вычислительных комплексов новых поколений.

**Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:**

*предложена* модификация генетического алгоритма, обеспечивающая большую надежность получения глобального экстремума для мультимодальных функций по сравнению с известными методами;

*предложена* методология оптимизации формы крыльев беспилотных летательных аппаратов в присутствии фюзеляжа;

*разработан* алгоритм учета большого количества ограничений на форму оптимизируемого крыла;

*получены* оптимальные формы крыльев беспилотных летательных аппаратов на основе численного решения полных уравнений Навье–Стокса при низких числах Маха и больших значениях коэффициента подъемной силы;

*показано*, что начальная форма крыла практически не влияет на форму оптимальных крыльев.

**Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:**

*полученные* результаты дополняют теоретические представления об аэродинамике беспилотных летательных аппаратов и форме их оптимальных крыльев при низких числах Маха.

**Значение полученных соискателем результатов исследований для практики подтверждается тем, что:**

*разработанные* программные модули включены в пакет OPTIMENGA\_AERO ООО «ОПТИМЕНГА – 777» (г. Москва), который позволяет определять оптимальные аэродинамические характеристики дозвуковых и трансзвуковых летательных аппаратов, а также проводить их аэродинамический анализ.

**Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования.**

Полученные результаты могут применяться в исследованиях, проводимых в Центральном аэрогидродинамическом институте имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Жуковск), Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Национальном исследовательском Томском государственном университете и др., а также могут быть использованы в организациях, занимающихся разработкой беспилотных летательных аппаратов: в корпорации «Оборонпром» (г. Москва), компании «Транзас» (г. Санкт-Петербург), АО НПО «Опытно-конструкторское бюро имени М.П. Симонова» (г. Казань) и др.

**Оценка достоверности результатов исследования выявила:**

Достоверность полученных результатов подтверждается физической и математической корректностью постановок задач и использованием соответствующего математического аппарата; исследованиями на сеточную сходимость; сравнением с точными решениями, численными и экспериментальными результатами других авторов.

**Научная новизна** результатов диссертационного исследования заключается в том, что предложен новый эвристический алгоритм оптимизации, обеспечивающий большую надежность получения глобального экстремума для мультимодальных функций; разработан метод оптимизации формы беспилотных летательных аппаратов, позволяющий учитывать большое количество ограничений; впервые получены и проанализированы оптимальные формы

крыльев беспилотных летательных аппаратов на основе численного решения полных уравнений Навье–Стокса при низких числах Маха и больших значениях коэффициента подъемной силы, показано; что начальное приближение практически не влияет на форму оптимальных крыльев.

**Личный вклад соискателя состоит в:** осуществлении совместно с научным руководителем постановки всех задач диссертации; самостоятельном получении основных результатов, выносимых на защиту; обсуждении результатов исследования, формулировке выводов и заключений по материалам исследований; подготовке публикаций по теме диссертации.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней для диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по определению оптимальной аэродинамической формы, доставляющей минимум полного сопротивления беспилотного летательного аппарата с учётом многочисленных ограничений на форму его поверхности и на его аэродинамические характеристики, имеющей значение для развития механики жидкости, газа и плазмы.

На заседании 22.03.2019 диссертационный совет принял решение присудить **Степанову К. А.** ученую степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек, из них 5 докторов наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, участвовавших в заседании, из 26 человек, входящих в состав совета, проголосовал: за – 20, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета

Ученый секретарь

диссертационного совета



Шрагер Геннадий Рафаилович

Пикушак Елизавета Владимировна

22.03.2019