

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 13 декабря 2019 года публичной защиты диссертации Брагина Николая Николаевича «Особенности развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных крыльях. Определение границы начала бафтинга $Su_{баф}$ » по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук

На заседании присутствовали 18 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,
председатель диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 2. Христенко Ю. Ф., доктор технических наук, старший научный сотрудник,
заместитель председателя диссертационного совета, | 01.02.04 |
| 3. Пикущак Е. В., кандидат физико-математических наук,
ученый секретарь диссертационного совета, | 01.02.05 |
| 4. Архипов В. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 5. Биматов В. И., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.02.05 |
| 6. Глазунов А. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.05 |
| 7. Зелепугин С. А., доктор физико-математических наук,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 8. Крайнов А. Ю., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.04.14 |
| 9. Лапшин О. В., доктор физико-математических наук, | 01.04.14 |
| 10. Люкшин Б. А., доктор физико-математических наук, профессор, | 01.02.04 |
| 11. Макаров П. В., 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,
старший научный сотрудник, | 01.02.04 |
| 14. Прокофьев В. Г., доктор физико-математических наук, | 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,
старший научный сотрудник, | 01.02.05 |
| 18. Шрагер Э. Р., доктор физико-математических наук, доцент, | 01.04.14 |

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 – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет) диссертационный совет принял решение присудить Н. Н. Брагину 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 учёной степени кандидата наук
аттестационное дело № _____**

решение диссертационного совета от 13.12.2019 № 404

О присуждении **Брагину Николаю Николаевичу**, гражданину Российской Федерации, учёной степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация **«Особенности развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных крыльях. Определение границы начала бафтинга Су_{баф}»** по специальности **01.02.05** – Механика жидкости, газа и плазмы принята к защите 27.09.2019 (протокол заседания № 383) 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 **Брагин Николай Николаевич**, 1976 года рождения.

В 1999 году соискатель окончил Московский государственный авиационный институт (технический университет).

В 2003 году соискатель заочно окончил аспирантуру Федерального государственного унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского».

Работает в должности начальника научно-исследовательского сектора № 4 в Федеральном государственном унитарном предприятии «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.

Диссертация выполнена в научно-исследовательском отделении «Аэродинамика самолётов и ракет» (НИО-2) Федерального государственного

унитарного предприятия «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации.

Научный руководитель – член-корреспондент РАН, доктор физико-математических наук, **Липатов Игорь Иванович**, Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», научно-экспериментальный отдел № 15 научно-исследовательского отделения «Аэротермодинамика гиперзвуковых летательных аппаратов и объектов ракетно-космической техники» (НИО-8), начальник отдела.

Официальные оппоненты:

Гасилов Владимир Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.Ф. Келдыша Российской академии наук», отдел «Математические модели высокотемпературной гидродинамики», главный научный сотрудник, и.о. заведующего отделом.

Матвиенко Олег Викторович, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», кафедра физики, химии и теоретической механики, профессор

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация – Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «**Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого**», (г. Санкт-Петербург), в своем положительном отзыве, подписанном **Ивановым Николаем Георгиевичем** (кандидат физико-математических наук, научно-исследовательская лаборатория гидроаэродинамики, заведующий лабораторией) и **Смирновым Евгением Михайловичем** (доктор физико-математических наук, профессор, научно-исследовательская лаборатория гидродинамики, главный научный сотрудник; Высшая школа прикладной математики и вычислительной физики, профессор), указала, что бафтинг, как одно из проявлений динамической аэроупругости, известен

в авиации с начала 30-х годов прошлого века и его исследованию было посвящено множество фундаментальных и прикладных работ, в результате которых были выработаны практические рекомендации по предотвращению бафтинга при создании самолетов нескольких поколений. В последнее время эта тема снова стала актуальной, что обусловлено необходимостью разработки новых аэродинамических компоновок магистральных пассажирских самолетов, к которым предъявляются повышенные требования по эффективности и безопасности. Н. Н. Брагиным выполнены расчетно-экспериментальные исследования обтекания модели пассажирского самолета со стреловидным крылом с выходом на разработку верифицированной методики, которая на этапе аэродинамического проектирования самолета может использоваться для получения количественных оценок угла атаки и коэффициента подъемной силы, отвечающих началу проявления «скоростного» бафтинга при крейсерских режимах полета магистральных самолетов; обоснована целесообразность использования результатов расчетов, которые исходно проводятся в предположении стационарности трансзвукового обтекания стреловидных крыльев, для получения количественных оценок угла атаки и коэффициента подъемной силы, отвечающих началу проявления «скоростного» бафтинга; установлено удачное сочетание граничных и начальных условий для подлежащей решению системы уравнений вязко-невязкого взаимодействия, которое позволяет проводить в данном приближении самосогласованное численное моделирование обтекания аэродинамических поверхностей летательного аппарата. Результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании различных компоновок пассажирских самолетов со стреловидным крылом.

Соискатель имеет 54 опубликованные работы, в том числе по теме диссертации опубликовано 34 работы, из них в рецензируемых научных изданиях опубликовано 2 работы, в сборниках материалов конференций, представленных в изданиях, входящих в Web of Science и / или Scopus, опубликовано 8 работ, в прочем научном журнале опубликована 1 работа, в сборниках материалов международных научных и научно-технических конференций и школ опубликовано 15 работ; патентов Российской Федерации получено 8. Общий объём публикаций – 6.07 а.л., авторский вклад – 3.21 а.л.

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

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

1. **Брагин Н. Н.** Исследования по совершенствованию аэродинамики взлетно-посадочной механизации крыла пассажирского самолета / Н. Н. Брагин, А. Л. Болсуновский, Н. П. Бузовера, М. А. Губанова, С. И. Скоморохов, Г. В. Хозяинова // Ученые записки ЦАГИ. – 2013. – Т. XLIV, № 4. – С. 3–14. – 0.44 / 0.2 а.л.

2. **Брагин Н. Н.** О методах определения начала бафтинга крыла пассажирского самолета / Н. Н. Брагин // Ученые записки ЦАГИ. – 2018. – Т. XLIX, № 8. – С. 16–26. – 0.56 а.л.

На автореферат поступило 7 положительных отзывов. Отзывы представили:

1. **В. А. Титарев**, д-р физ.-мат. наук, ведущий научный сотрудник сектора 24 'Механика' Федерального исследовательского центра «Информатика и управление» РАН, г. Москва, *с замечаниями:* из автореферата неясно, учитывается ли число Рейнольдса при расчетах аэродинамических характеристик; непонятно, что будет происходить с точностью расчета при увеличении количества узлов сетки; в автореферате подробно не описана модель сеточного генератора.
2. **О. В. Гуськов**, канд. физ.-мат. наук, начальник сектора отдела «Аэрокосмические двигатели» Центрального института авиационного моторостроения им. И.П. Баранова, г. Москва, **К. Ю. Арефьев**, канд. техн. наук, и.о. заместителя генерального директора – директора исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология» Центрального института авиационного моторостроения им. И.П. Баранова, г. Москва, *с замечанием:* из текста автореферата неясно, как влияет интерференция двигателя с крылом на получаемые аэродинамические характеристики; и *вопросом:* возможен ли при расчетах аэродинамических характеристик учет работы двигателя?

3. **О. В. Круглякова**, канд. техн. наук, главный конструктор по аэродинамике, динамике полёта и системе управления ПАО «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина», г. Москва, *с замечаниями*: не до конца раскрыт многоэлементный метод построения сеток; в автореферате не приведено сравнений экспериментальных и расчетных величин границы начала бафтинга во всем исследованном диапазоне чисел Маха. 4. **В. И. Шевяков**, д-р техн. наук, начальник департамента аэродинамических характеристик АО «Гражданские самолеты Сухого», г. Москва *с замечаниями*: не совсем точно формулируется вопрос о влиянии границы бафтинга на безопасность полёта; понятие верификации используется не совсем чётко и включает в себя и валидационные вопросы.

5. **П. В. Ерохин**, канд. техн. наук, начальник отдела аэродинамических исследований ПАО «Туполев», г. Москва, *с замечаниями*: из автореферата неясно, возможно ли применение предложенной методики при определении начала бафтинга крыльев малой стреловидности; неясно, как задается значение перехода пограничного слоя при моделировании обтекания крыла самолета.

6. **А. А. Матросов**, начальник отдела Аэродинамического проектирования ПАО «Корпорация «ИРКУТ», г. Москва, **С. В. Левицкий**, д-р техн. наук, проф., ведущий инженер-конструктор отдела Аэродинамического проектирования ПАО «Корпорация «ИРКУТ», г. Москва, **Е. Д. Икрянников**, канд. техн. наук, доц., ведущий инженер-конструктор отдела Аэродинамического проектирования Инженерного центра ПАО «Корпорация «ИРКУТ», г. Москва, *с замечаниями*: отсутствует оценка влияния упругости на особенности развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных крыльях; отсутствует оценка влияния положения двигателя на величину начала бафтинга; в автореферате не выделены основные отличия разработанной автором методики от используемых методик определения бафтинга; большинство выводов, изложенных в автореферате, носят общий характер и не всегда раскрывают конкретные результаты, полученные автором. 7. **С. А. Исаев**, д-р физ.-мат. наук, проф., заведующий лабораторией фундаментальных исследований Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, *с замечаниями*: хотелось бы выделить

важнейшие результаты работы, имеющие приоритетную значимость для анализа фундаментальных механизмов явления бафтинга; в автореферате не отражены результаты измерения пульсаций давления; странно, что не выполнено численное моделирование бафтинга на стреловидных крыльях с использованием «тяжёлых» пакетов типа ЛОГОС для подтверждения методики, разработанной на основе теории пограничного слоя.

В отзывах отмечается, что актуальность темы исследования обусловлена необходимостью определения предельно допустимых режимов крейсерского полёта магистральных и транспортных самолётов с целью обеспечения их транспортной эффективности при высоком уровне безопасности. Н. Н. Брагиным выработана методика расчета аэродинамических характеристик на режимах обтекания крыла близких к началу трехмерного отрыва пограничного слоя при трансзвуковых скоростях полёта; исследованы особенности обтекания стреловидных крыльев большого удлинения, спроектированных с современными сверхкритическими профилями; исследовано влияние основных геометрических параметров крыла самолета на величины коэффициента подъемной силы и соответственно угла атаки начала бафтинга; предложена методика определения начала бафтинга стреловидных крыльев большого удлинения с суперкритическими профилями на основе расчета развития трехмерного пограничного слоя; разработана методика определения границы начала бафтинга для стреловидных дозвуковых крыльев пассажирских самолетов; получены расчётно-экспериментальные зависимости, позволяющие определять начало бафтинга на этапе аэродинамического проектирования для стреловидных сверхкритических крыльев. Предложенный метод определения начала бафтинга на предварительном этапе проектирования может быть использован при создании современных пассажирских самолётов.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что **В. А. Гасилов** является известным специалистом в области численных исследования обтекания стреловидных крыльев, компьютерного моделирования особенностей развития трехмерного отрыва; **О. В. Матвиенко** является известным специалистом в области численного моделирования фундаментальных задач

механики жидкости и газа, в том числе исследования течений обтекания аэродинамических поверхностей потоком газа; **Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого** известен своими достижениями в области механики жидкости и газа, в том числе численными исследованиями обтекания аэродинамических профилей.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан подход к исследованию обтекания стреловидных крыльев на режимах начала и развития трехмерного отрыва пограничного слоя, что соответствует режиму начала бафтинга, основанный на численном решении уравнений математической физики методом конечных разностей;

предложены эффективные методы определения начала бафтинга при проектировании современных пассажирских и транспортных самолётов с трансзвуковыми скоростями крейсерского полета;

получены экспериментальные картины обтекания крыла, в том числе на режимах обтекания, близких к отрыву, методом минишелковинок, масляных покрытий с использованием результатов измерений давлений и пульсаций давлений на дренированной модели;

установлено, что при анализе экспериментальных данных, спектры пульсации давления в области положения скачков уплотнения характеризуются усилением низкочастотной составляющей, обусловленной колебаниями скачков. Спектры пульсации давления вблизи задней кромки носят широкополосный характер.

получены границы начала бафтинга для трех вариантов крыльев и показаны сопоставления с экспериментальными данными и результатами летных испытаний;

продемонстрировано влияние границы начала бафтинга на летно-технические и взлетно-посадочные характеристики ближне-среднего магистрального самолета, *показано* влияние бафтинга на дальность полёта самолета.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

изложены результаты, дополняющие теоретические представления об особенностях развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных

крыльях и обтекания аэродинамических компоновок пассажирских летательных аппаратов со стреловидным крылом на трансзвуковых скоростях.

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

разработаны методы определения границы начала бафтинга для стреловидных дозвуковых крыльев пассажирских самолетов;

результаты исследований *использованы* при создании аэродинамической компоновки самолета SSJ-100 и MC-21.

Рекомендации об использовании результатов диссертационного исследования. Разработанная автором методика численных расчетов и предложенные методы определения границы начала бафтинга могут найти применение в научных работах, направленных на развитие теории механики жидкости и газа, в частности – при описании начальной стадии развития пространственного отрыва турбулентного пограничного слоя, вызывающего в рассматриваемых условиях трансзвукового обтекания крыла возникновение бафтинга на стреловидных крыльях, проводимых как в различных научных и учебных заведениях, так и в конструкторских бюро авиационной отрасли: Институте теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН (г. Новосибирск), Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана (национальном исследовательском университете), Удмуртском федеральном исследовательском центре УрО РАН (г. Ижевск), Национальном исследовательском Томском государственном университете, Национальном исследовательском Томском политехническом университете, Балтийском государственном техническом университете «Военмех» им. Д. Ф. Устинова (г. Санкт-Петербург), Государственном научно-исследовательском институте авиационных систем (г. Москва), ПАО «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина» (г. Москва) и другим организациях, занимающихся созданием авиационной техники и, в частности, вопросами безопасности полетов гражданской авиации. Представленные в работе результаты расчетно-экспериментальных исследований трансзвукового обтекания стреловидных крыльев и моделей самолета могут представлять интерес для

теоретических и экспериментальных групп Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского (г. Жуковский Московской области), Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова (в том числе Научно-исследовательского института механики), Московского физико-технического института (национального исследовательского университета), конструкторских бюро авиационной промышленности и др. и могут использоваться при подготовке высококвалифицированных специалистов в таких областях, как механика жидкости, газа и плазмы и др.

Оценка достоверности результатов исследования выявила

использованы хорошо апробированные численные методы механики жидкости и газа с применением тестированных численных технологий;

установлено согласование результатов решения задач с экспериментальными и расчетными данными других авторов, также *получено* качественное и количественное согласование расчетных результатов с результатами экспериментальных исследований, проведенных на установках Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н.Е. Жуковского (г. Москва), и результатами натурных полетов реальных самолетов.

.Научная новизна результатов диссертационного исследования заключается в том, что апробирована методика расчета аэродинамических характеристик на режимах обтекания крыла, близких к началу трехмерного отрыва пограничного слоя; на основании комплексных расчётно-экспериментальных исследований показаны особенности обтекания стреловидных крыльев большого удлинения, спроектированных по сверхкритическим профилям; разработаны и апробированы 2 новых критерия начала бафтинга (угла атаки, $C_{u_{доп}}$) стреловидных крыльев большого удлинения магистральных самолетов; получены расчётно-экспериментальные зависимости, позволяющие определять начало бафтинга на этапе аэродинамического проектирования для различных вариантов стреловидных сверхкритических крыльев.

Личный вклад соискателя состоит в: осуществлении совместно с научным руководителем постановки цели и задач диссертации, обсуждении результатов исследования; самостоятельном получении основных результатов, выносимых

на защиту; формулировке выводов и заключений по материалам исследования; подготовке публикаций по теме диссертации.

Диссертация отвечает критериям, установленным Положением о присуждении учёных степеней для диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, и, в соответствии с пунктом 9 Положения, является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи по исследованию начальной стадии развития пространственного отрыва турбулентного пограничного слоя, вызывающего в рассматриваемых условиях трансзвукового обтекания крыла возникновение бафтинга, имеющей значение для развития механики жидкости и газа.

На заседании 13.12.2019 диссертационный совет принял решение присудить **Брагину Н. Н.** учёную степень кандидата физико-математических наук.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 18 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 – 18, против – нет, недействительных бюллетеней – нет.

Председатель

диссертационного совета

Шрагер Геннадий Рафаилович

Ученый секретарь

диссертационного совета

Пикушак Елизавета Владимировна

13.12.2019

