

**ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА 31.1.006.01, СОЗДАННОГО
НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО АВТОНОМНОГО УЧРЕЖДЕНИЯ
«ЦЕНТРАЛЬНЫЙ АЭРОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ
ИМЕНИ ПРОФЕССОРА Н.Е. ЖУКОВСКОГО»
МИНИСТЕРСТВА ПРОМЫШЛЕННОСТИ И ТОРГОВЛИ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ (ДЕПАРТАМЕНТ АВИАЦИОННОЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ),
ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК**

аттестационное дело № _____
решение диссертационного совета от 25 марта 2025 г. №3

О присуждении Горбушину Антону Роальдовичу, гражданину Российской Федерации, учёной степени доктора технических наук.

Диссертация «Методы определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов в аэродинамических трубах» по специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов в виде рукописи **принята к защите** 10 декабря 2024 года (протокол № 25) диссертационным советом 31.1.006.01, созданным на базе Федерального автономного учреждения «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского» (ФАУ «ЦАГИ») Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Департамент авиационной промышленности). Адрес организации: 140180, Московская область, г. Жуковский, ул. Жуковского, д. 1. Приказом Минобрнауки России от 03.06.2021 № 561/нк диссертационному совету 31.1.006.01 предоставлено право приёма к защите диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук.

Соискатель Горбушин Антон Роальдович, 02 апреля 1960 года рождения. Диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук «Измерение аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов на тензометрических весах в аэродинамических трубах» защитил в 2009 г. в диссертационном совете ФГУП «ЦАГИ». В настоящее время работает в ФАУ «ЦАГИ» начальником испытательного центра - начальником лаборатории.

Диссертация выполнена в испытательном центре «Аэродинамика летательных аппаратов» ФАУ «ЦАГИ» Министерства промышленности и торговли Российской Федерации (Департамент авиационной промышленности).

Научный консультант: д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН, доцент Гайфуллин Александр Маркович, главный научный сотрудник ФАУ «ЦАГИ».

Официальные оппоненты:

Знаменская Ирина Александровна, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества, физический факультет, Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова;

Арефьев Константин Юрьевич, д.т.н., директор исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология», Центральный институт авиационного моторостроения имени П. И. Баранова;

Мионов Сергей Григорьевич, д.ф.-м.н., профессор, главный научный сотрудник, Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация — Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук (ИПМех РАН) — в своём **положительном** отзыве, подписанном Суржиковым Сергеем Тимофеевичем, главным научным сотрудником ИПМех РАН, заведующим лабораторией

радиационной газовой динамики, академиком РАН, д.ф.-м.н. и Колесниковым Анатолием Федоровичем, главным научным сотрудником ИПМех РАН, заведующим лабораторией взаимодействия плазмы и излучения с материалами, д.ф.-м.н. и утвержденном Якушем Сергеем Евгеньевичем, директором ИПМех РАН, членом-корреспондентом РАН, д.ф.-м.н., указала, что диссертация А.Р. Горбушина является законченной научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в повышение точности результатов экспериментальных исследований моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах. Работа удовлетворяет критериям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов, а ее автор Антон Роальдович Горбушин заслуживает присуждения ему ученой степени доктора технических наук. Диссертация Горбушина А.Р. обсуждена на семинаре Лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН 02 октября 2024 года, заключение о положительной оценке работы принято единогласно.

Соискатель имеет 216 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации 6 патентов и 17 работ, из них 9 работ, входящих в список ВАК, 5 работ в журналах первого квартиля (Q1), входящих в базу данных Web of Science Core Collection. Три статьи и один патент подготовлены без соавторов.

Наиболее значимые работы:

1. Gorbushin A. R., Anokhina E. N., Stolyarov E. P. Unsteady pressure measurement in the presence of a cavity between the sensor and the flow // Sensors and Actuators A: Physical. – 2023. – 349. doi.org/10.1016/j.sna.2022.114095.

Исследование посвящено измерению нестационарного давления миниатюрными пьезорезистивными датчиками в потоках газа с примесью различных частиц. Датчик давления, установленный в насадке типа Пито-Прандтля, смещается относительно оси приемного отверстия, что существенно повышает живучесть датчика. При этом между датчиком и приемным отверстием образуется полость, являющаяся резонатором Гельмгольца. Разработан новый метод измерения нестационарного давления для рассматриваемого насадка. Метод верифицирован результатами опыта с воздействием на насадок импульсного давления. Апробация метода выполнена в трансзвуковой аэродинамической трубе ЦАГИ Т-128. Личный вклад автора оценивается в 60% и заключается в разработке метода, постановке экспериментальных исследований и анализе полученных данных.

2. Gorbushin A.R., Kozik A.E. Novel method for measuring non-stationary pitch and roll angles with a pendulous accelerometer in the presence of vibrations // Measurement. – 2023. – 223, 113724. doi.org/10.1016/j.measurement.2023.113724.

Разработан новый универсальный метод для измерения нестационарных углов тангажа и крена моделей летательных аппаратов и тензометрических весов с помощью маятникового акселерометра в аэродинамических трубах. В качестве основы метода использована физическая модель, в которой маятник акселерометра заменяется массой, а его подвес – пружиной с демпфированием. Задача решена для общего случая, когда система координат акселерометра является неинерциальной – корпус акселерометра перемещается с ускорением вдоль своей оси чувствительности. Метод верифицирован результатами экспериментальных исследований, в которых к акселерометру прикладывалось ускорение, близкое по форме к функции Хэвисайда. Личный вклад автора оценивается в 60% и заключается в разработке метода, постановке экспериментальных

исследований и анализе полученных данных.

3. Gorbushin A.R., Kozik A.E., Anokhina E.N. Non-stationary load measurement using six-component strain-gauge balances // Measurement. – 2024. – 226. – 114176 (2024). doi.org/10.1016/j.measurement.2024.114176.

Разработан новый универсальный метод для измерения вектора нестационарной силы и вектора нестационарного момента с помощью шестикомпонентных тензометрических весов. В качестве основы метода использована физическая модель, в которой чувствительные элементы каждого компонента весов заменяются пружинами с демпфированием. Задача решена для общего случая, когда система координат весов является неинерциальной. Метод верифицирован приложением ступенчатой силы к продольной и поперечной компонентам весов. Личный вклад автора оценивается в 50% и заключается в разработке метода, постановке экспериментальных исследований и анализе полученных данных.

4. Горбушин А.Р., Колесников А.И. Трёхкомпонентная математическая модель одноосевого акселерометра для измерения углов тангажа и крена // Измерительная техника. – 2019. – № 2. – с. 23–28.

В статье разработана трехкомпонентная математическая модель одноосевого компенсационного маятникового акселерометра с замкнутой обратной связью для измерения углов тангажа и крена. Модель учитывает влияние ускорения, приложенного перпендикулярно к оси чувствительности акселерометра. Исследована погрешность математической модели. Предложены методы калибровки акселерометра и методика учета влияния температуры на его показания при использовании трехкомпонентной математической модели. Математическая модель верифицирована с помощью результатов калибровки акселерометра. Личный вклад автора оценивается в 70% и заключается в разработке метода, постановке экспериментальных исследований и анализе полученных данных.

5. Горбушин А.Р. Влияние влажности воздуха на параметры потока в до и трансзвуковых аэродинамических трубах // Ученые записки ЦАГИ. – 2018. – Т. XLIX. – № 1. – С. 3–13.

В статье получены поправки на влияние массовой доли водяного пара к числу Маха, скорости набегающего потока, числу Рейнольдса и скоростному напору в дозвуковых и трансзвуковых аэродинамических трубах при отсутствии конденсации пара. Выполнена оценка значимости поправок исходя из погрешности измерения полного и статического давления и требований к погрешности определения коэффициента сопротивления. Значимой оказалась лишь поправка к скорости потока, максимальное значение которой при естественном уровне влажности составляет 0,4%.

Основные результаты, описанные в публикациях, докладывались автором на видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ — ИТПМ СО РАН — СПбПУ — НИИМ МГУ, на семинаре Лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН и 32-х российских и международных конференциях.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы официальных оппонентов и ведущей организации.

Отзыв официального оппонента К.Ю. Арефьева – положительный, имеются следующие замечания:

1. В работе мало внимания уделено повышению точности определения аэродинамических характеристик моделей с протоком воздуха. В частности, автор указывает, что предлагаемый методический аппарат использовался при исследовании моделей мотогондол SaM-146 и ПД-8, однако, в работе нет информации о том, какие газодинамические и механические процессы при этом были учтены, а также какие особенности в методологии позволили обеспечить необходимые показатели достоверности измерений. Кроме того, отсутствуют требования к моделям с протоком и конструктивные

решения тензометрических устройств, учитывающие конфигурацию таких моделей и эффекты внешней и внутренней интерференции потока.

2. Желательным является выработка конкретных рекомендаций по характеристикам устройств демпфирования в измерительных системах в разрезе достижения адекватной оценки возникновения нестационарных явлений обтекания летательного аппарата, в том числе с реализацией отрывных течений. Чрезмерный уровень демпфирования негативно скажется на информативности испытаний, а недостаточный - на точности. Рекомендации к выбору параметров демпфирующих устройств могли бы быть полезными, в частности, для анализа условий реализации бафтинга конструкции.

3. Представлялось бы полезным в работе привести комплексный анализ измерений, получаемых посредством тензометрических весов в совокупности с другими системами диагностики (тензовыми, барометрическими, PIV, термоанемометрическими), что позволило бы определить когерентность между газодинамическими процессами и измерениями сил.

4. На взгляд оппонента, диссертация носит преимущественно экспериментально-методический характер. В качестве рекомендации можно предложить в дальнейшем усилить аспект математического моделирования в части прогнозирования жесткости конструкций, определения собственных частот колебаний, а также адаптировать измерительные системы для интеграции с цифровым двойником стендов.

5. По тексту диссертации и автореферата имеется некоторое количество опечаток и неточностей.

Отзыв официального оппонента С.Г. Миронова – положительный, имеются следующие замечания, уточнения и дискуссионные вопросы:

1. Рис.1.4 и 1.5 - не указаны размерности чисел на оси y ; формулы (1.3) и (1.4) - вставлены неправильные обозначения углов крена; стр. 68 -вращение не «вдоль осей...», а «вокруг осей...»; стр. 70 -непонятно, что такое «полумодель»; в знаменателе второго члена формулы (2.12) стоит лишний квадрат; стр.123 -должно стоять (2.38), а не (2.28); стр.166 - рисунок 4.76, а не 76.

2. На стр. 68 имеется противоречие между соотношением (1.11) при нулевых углах тангажа и крена и равенством $NF^0 = 0$. Видимо необходимо было указать, что весы калибруются без модели.

3. Не понятно, что в работе используется - коэффициент корреляции R или коэффициент детерминации R^2 .

4. Объяснение превышения измеренного значения ускорения на стр. 184 не очевидно, так как конструкция на рис. 4.16 не похожа на маятник, хотя на маятнике ускорение действительно всегда получается больше g .

5. Скорее всего текст на стр. 192 должен был сразу же текстом на стр. 189, а далее стр. 190 и 191, так как видно нарушение логики повествования.

6. Скорее всего некоторые спектры в главе 5 нормированы друг на друга в области низких частотах. Иначе непонятно откуда после обработки в спектрах вырастает сигнал на высоких частотах (см., например, рис. 5.16, 5.20). В тексте об этом не сказано.

7. На стр. 188 надо было бы привести графики для статического давления подобные рис. 4.21. Тогда были бы понятны расхождения в величине резонансных частот Таблицы 4.3.

8. Необходимо объяснить значительный разброс точек на рис. 4.11а, так как на всех остальных подобных графиках разброс точек минимальный.

9. Название главы 5 не полностью соответствует ее содержанию.

10. В тексте необходимо было бы указать какой процент сигнала составляют второй и третий члены уравнения (1) для тензовесов от общей величины, что показало бы степень взаимовлияния измеряемых компонент сил и моментов.

11. Необходимо указать причину сохранения остаточных колебаний после обработки, на пример, на рис. 4.3, рис. 4.12а,б, рис. 4.14, рис. 5.3.

12. Почему в обработке данных измерений использовались конечные разности второго порядка точности, а не третьего или четвертого? Как порядок точности влияет на конечный результат обработки?

13. Помимо указанных автором упрощений, связанных с введением в математическую модель весов для определения нестационарных нагрузок независимых линейных осцилляторов, упрощающие предположения уже были неявно сделаны при суммировании сил и моментов как независимых величин в соотношениях 1.19 -1.21 или, например, 1.29, которые могут быть обоснованы малым вкладом вторых и третьих членов в уравнении весов (1). Возможно, неполное подавление осцилляций в данных измерений связано с этими упрощениями. Второй возможной причиной этого является малая величина точности численного взятия первой и второй производных от регистрируемого сигнала.

14. К сожалению, в работе не был применен метод температурной коррекции к показаниям пневмозонда, что сделало бы исследование еще более общим.

Отзыв официального оппонента И.А. Знаменской – положительный, имеются следующие замечания:

1. Название диссертации не совсем точно отражает содержание работы. О тензометрических весах не говорится в 3 и 4 главах. Возможно, следовало использовать или даже предложить термин, объединяющий исследованные базовые методы количественных механических измерений на аэродинамических трубах - тензометрические весы, акселерометры и др.

2. При обилии количественной информации в тексте выводы носят преимущественно качественный характер. Хотелось бы понять каковы ограничения усовершенствованных и предложенных экспериментальных методов в количественном выражении - в частности диапазоны параметров, классы стендов, типы моделей.

3. Также хотелось бы понять есть ли возможность их применимости при отрывном обтекании профилей.

4. На рис 5.22 - результаты расчета полного давления за прямым скачком по полному давлению в форкамере и числу Маха $M = 6,066$, рассчитанному пакетом программ EWT-ЦАГИ (прямая ?), - 4 значащих цифры не соответствуют реальной погрешности расчета.

5. Надписи на рисунках читаются с трудом – при сильном увеличении на экране (4.7, 4.21, 5.20). Например, на рисунке 5.20 сложно и при увеличении увидеть расчетную кривую.

6. Рисунок 5.22 — Зависимость коэффициента подъемной силы... - при каком числе Маха проведены испытания?

Отзыв ведущей организации положительный, высказаны следующие замечания и рекомендации:

1. Значительное место уделено проверке математических моделей, разработанных автором, путем сравнения с данными измерений аэродинамических характеристик в аэродинамических трубах. Автор называет это верификацией моделей, хотя более правильно будет сказать, что это валидация.

2. Сравнение с данными других исследований приведено только для зависимости коэффициента трения от числа Рейнольдса, рассчитанного по толщине потери импульса (рис. 5.11). Несомненный интерес представляло бы сравнение нестационарных аэродинамических характеристик, определенных автором, с результатами других исследований.

3. Во Введении не дана расшифровка сокращенного названия конференции «STAI & SATA».

4. На рисунках 4.10, 4.12, 4.17, 4.19, 4.21-4.24, 5.3-5.5, 5.9, 5.10, 5.14-5.17, 5.19-5.21 обозначения осей или единицы измерения даны на английском языке, в то время как на остальных рисунках - на русском языке).

5. Было бы полезным и ценным дать оценку того, как и в какой мере повышение точности измерений аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах сказывается на количестве и стоимости экспериментов и продувок в соответствии с требованиями производителей пассажирских самолетов.

6. Целесообразно внедрить разработанные А.Р. Горбушиным методы в практику экспериментальных исследований в АО "ЦНИИмаш", ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», ИТПМ СО РАН, ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова».

На автореферат поступило 8 отзывов из организаций, перечисленных ниже.

1. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации» (г. Москва). Отзыв составили заведующий кафедрой «Аэродинамика, конструкция и прочность летательных аппаратов», д.т.н., профессор М.А. Киселев и доцент кафедры «Аэродинамика, конструкция и прочность летательных аппаратов» к.т.н. С.Ф. Бородин. Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании кафедры «Аэродинамика, конструкция и прочность летательных аппаратов», протокол №6 от 14 января 2025 года. Отзыв **положительный**, содержит два замечания:

1) отсутствие в автореферате материалов в части оценки изменения объемов и времени программ испытаний (определение АХ моделей ЛА) в АДТ при внедрении разработанных автором методов измерений;

2) наличие отступлений от рекомендаций стандартов при оформлении автореферата, в частности, при обозначении угла тангажа.

2. Федеральное автономное учреждение «Сибирский научно-исследовательский институт авиации имени С. А. Чаплыгина» (г. Новосибирск). Отзыв составили научный руководитель ФАУ «СибНИА им. С.А. Чаплыгина», к.т.н., доцент В.Л. Чемезов, главный научный сотрудник, к.т.н В.А. Силантьев и начальник экспериментального отдела отделения аэродинамики полета летательных аппаратов В.М. Писчасов. Отзыв **положительный**, содержит замечание:

В формуле (17) коэффициенты « f » называются элементами обращенной системы уравнений (1). А по структуре этой формулы — это элементы, так называемой, необращенной формулы весов. Она получается по результатам калибровки тензовесов. А формула (1) — это промежуточная форма («полуобращенная формула весов»), которая имеет место при некоторых выводах «обращенной формулы весов» из «необращенной формулы весов». Нужно отметить, что «обращенную формулу весов» (даже более сложной структуры, чем формула (1)) можно получить непосредственно по результатам калибровки тензовесов.

3. Акционерное общество «Ракетно-космический центр «Прогресс» (г. Самара). Отзыв составили Главный конструктор - начальник отделения, к.т.н. О.Г. Лагно, начальник отдела А.А. Костарев и ведущий специалист, к.т.н. Ю.А. Крюков. Отзыв **положительный**, содержит три замечания:

1) Отсутствие в автореферате сведений о применении разработанных автором методов к экспериментальным исследованиям в аэродинамических трубах моделей ракет-носителей.

2) На странице 30 не приведены единицы измерения для параметров ω_0 и β/M .

3) На рисунках 6, 7, 11, 14, 15 десятичные знаки отделяются точкой, а не запятой, как того требует ГОСТ.

4. Акционерное общество "Центральный научно-исследовательский институт машиностроения" (г. Королев). Отзыв составили заместитель начальника отдела 20014, к.т.н. В.А. Козловский и начальник лаборатории отдела 20014, к.т.н., с.н.с. В.И. Лагутин.

Отзыв **положительный**, содержит замечание:

В 1-ой главе предложен новый метод калибровки ТВ на стендах ЦАГИ типа 6ГС-20, согласно которому «весы закреплены в основании стенда с помощью элемента крепления модели, а нагрузки приложены к элементу крепления весов» при соответствующей ориентации ТВ. Однако, материалы автореферата не позволяют понять преимущество этого метода в сравнении с используемым на стенде европейской трансзвуковой трубы ETW, ФРГ (B. Ewald, K. Hufnagel et al. "Development and construction of fully automatic calibration machine for internal balances", Proceedings of the 1st International Symposium on strain-gage balances, Langley Research Center, NASA, CP-1999-209101/PY1, 1996, pp. 307-320), также основанном на приложении калибровочных нагрузок через хвостовик ТВ и их измерениях на элементе крепления модели. Такая же методика использована в стендах ЦАГИ 6ГС-60 и ЦНИИмаш ТСНВ 441110.

5. Военный учебно-научный центр Военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия имени профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина» (г. Воронеж). Отзыв составили начальник кафедры аэродинамики и безопасности полета, к.т.н, доцент А.В. Головнев, профессор кафедры аэродинамики и безопасности полета, д.т.н., профессор В.А. Загорский и старший преподаватель кафедры аэродинамики и безопасности полета, к.т.н. В.В. Вертебный. Отзыв **положительный**, содержит замечания:

1) Название работы, ее цель и задачи не согласованы между собой. В названии работы и ее задачах отсутствуют какие-либо указания на достижение цели работы, сформулированной, как «повышение точности определения...», а в указанных на странице 36 основных результатах работы и выводах в п.п. 5...9 представлены результаты, относящиеся только к погрешности определения или измерения параметров.

2) На странице 13 указано «При расхождении значений температуры весов более чем на 3...4°C от температуры их калибровки статическая составляющая погрешности превышает погрешность температуры тензометрических весов и ее следует исключить из результатов измерений». При этом не ясно, о каких значениях температуры идет речь и как предполагается исключать статическую составляющую температурной погрешности.

3) На странице 27 представлено соотношение (30) по которому определяется отношение числа Маха во влажном воздухе $M_{см}$ к числу Маха в сухом воздухе $M_{в}$. При этом не указано, при каких значениях температур справедливо это соотношение.

4) На странице 27 указано «Результаты расчета по формуле (30) представлены на рисунке 6 в виде зависимости разности чисел Маха влажного и сухого воздуха от массовой доли пара». Как следует из самого рисунка 6, на нем, на самом деле представлена не зависимость, а зависимости разностей чисел Маха влажного и сухого воздуха от числа Маха сухого воздуха при различных значениях массовой доли пара.

5) На странице 32 представлены средние значения коэффициентов лобового сопротивления конуса с грузом $C_D=0,065\pm0,017$ и конуса без груза $C_D=0,077\pm0,016$. Приведенные значения свидетельствуют о том, что для конуса с грузом относительная погрешность определения величины C_D составляет 26,15%, а для конуса без груза относительная погрешность составляет 20,78%. Такие результаты не могут считаться достаточно точными.

6) В автореферате из 20 рисунков только на рисунке 19 представлены характеристики «модели самолета», что не позволяет с уверенностью утверждать о достаточной полноте раскрытия темы диссертации.

6. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский национальный исследовательский технический университет им. А.Н. Туполева-КАИ» (г. Казань). Отзыв составили зав. кафедрой аэрогидродинамики к.т.н., доцент Е.И. Николаев и профессор кафедры аэрогидродинамики, д.ф.-м.н., профессор А.Н. Кусюмов. Отзыв **положительный**,

содержит два замечания:

1) Выражения (5) и (6) в автореферате имеют совершенно разную «математическую конструкцию». Из текста автореферата не ясно, каким образом «Формулы (5) и (6) дают одинаковые результаты...», что отмечается на стр. 15 автореферата.

2) На стр. 12 автореферата обсуждается метод определения коэффициента температурной чувствительности тензометрических весов. Формула (4) по тексту автореферата получается из формул (2) и (3). Не вполне понятно каким образом из результирующего выражения для коэффициента температурной чувствительности, определяемого формулой (4), исчезает синус угла тангажа модели, входящий в формулу (3).

7. Филиал ПАО «Яковлев» «Региональные самолеты» (г. Москва). Отзыв составили начальник НИО - заместитель Главного конструктора по аэродинамике А.А. Бабулин и начальник департамента аэродинамических характеристик, д.т.н. В.И. Шевяков. Отзыв **положительный**, содержит два замечания:

1) В автореферате нарушена нумерация рисунков.

2) Считается, что диссертация на соискание ученой степени доктора наук должна быть научно-квалификационной работой, где на основании выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, либо решена научная проблема, имеющая важное политическое, социально-экономическое, культурное или хозяйственное значение, либо изложены новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны. В автореферате в явном виде не сказано, на что претендует автор.

8. Публичное акционерное общество «Ракетно-космическая корпорация «Энергия» имени С.П. Королёва» (г. Королев). Отзыв составил заместитель начальника отдела аэрогазодинамики — начальник сектора, к.ф.-м.н. С.В. Журин. Отзыв **положительный**, содержит три замечания:

1) На стр. 6 указано, что в дозвуковых и трансзвуковых трубах меняется состав воздуха. Из описания в автореферате не ясно как это происходит, если эффекты конденсации воды не учитываются.

2) При описании методических экспериментов на стр.29-30 не достаёт схемы для лучшего понимания постановки задачи.

3) При описании результатов, представленных на рис. 10, не приведено объяснений почему замеренное ускорение свободного падения $\approx 11 \text{ м/с}^2$.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается их широкой известностью в научном мире, их достижениями, компетентностью, наличием публикаций в данной сфере исследования и способностью определить научную и практическую ценность диссертации.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

разработан метод, который позволяет измерять с высокой точностью вектор нестационарной аэродинамической силы и вектор нестационарного аэродинамического момента с помощью тензометрических весов, нестационарные углы тангажа и крена с помощью маятниковых акселерометров, нестационарное давление при наличии полости между датчиком и приемным отверстием приемника воздушного давления в аэродинамических трубах;

предложена трехкомпонентная математическая модель одноосевого маятникового акселерометра как средства для измерения углов тангажа и крена, которая учитывает влияние ускорения, приложенного перпендикулярно к его оси чувствительности;

получено влияние влажности потока на скорость потока, скоростной напор, числа

Маха и Рейнольдса в дозвуковых и трансзвуковых аэродинамических трубах при условии, что отсутствует конденсация влаги в потоке.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

получены решения трех смешанных задач теоретической механики применительно к измерению векторов нестационарной аэродинамической силы и нестационарного аэродинамического момента, нестационарных углов тангажа и крена модели летательного аппарата в аэродинамической трубе, нестационарного давления динамическими измерительными устройствами, система координат которых является неинерциальной;

доказана применимость полученных решений к проблеме измерения нестационарных нагрузок тензометрическими весами, нестационарных углов тангажа и крена маятниковыми акселерометрами и нестационарного давления приемниками воздушного давления при наличии резонатора Гельмгольца;

установлено, что полученные решения обеспечивают измерения нестационарных характеристик в широком диапазоне частот, включая собственную частоту динамических измерительных устройств.

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

разработанные методы определения аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов **внедрены** в программу обработки квазистатических результатов испытаний программного комплекса «Поток» в аэродинамических трубах Т-128 ЦАГИ, АУ-1 и АУ-2 АО «ГосМКБ «Радуга» имени А.Я. Березняка»;

показано, что разработанные методы уменьшают погрешность определения характеристик в 3-10 раз по сравнению с существующими методами;

представлены рекомендации по применению разработанных методов в различных аэродинамических трубах.

Оценка достоверности результатов исследования выявила:

экспериментальные результаты получены с использованием сертифицированного оборудования ЦАГИ;

использованы известные соотношения механики твердого тела, жидкости и газа;

проведена верификация разработанных методов широко распространенными опытами с приложением ступенчатого, импульсного или гармонического воздействия;

работа **апробирована** на семинарах, российских и международных конференциях;

результаты **опубликованы** в ведущих российских журналах и международных изданиях;

получено 6 патентов.

Личный вклад соискателя состоит:

в **критическом анализе** научной литературы по теме диссертационного исследования;

в **разработке** методов определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах;

в **создании** устройств для измерения нестационарных нагрузок, углов и давления;

в **постановке** экспериментальных исследований;

в **анализе** результатов экспериментальных исследований;

в **написании** статей по теме диссертации;

в **подготовке** докладов на конференциях.

Соответствие паспорту специальности. Диссертационное исследование по своему содержанию соответствует заявленной специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов, в частности, следующим пунктам паспорта специальности: п.1 (Теоретические, расчетные и экспериментальные исследования обтекания летательных аппаратов, объектов авиационной и ракетно-космической техники

и их частей установившимися и не установившимися потоками газовых сред), п.10 (Разработка средств и методов экспериментальных исследований, аэродинамических и тепловых исследований (методики, установки, летный эксперимент), п.11 (Экспериментальные и теоретические исследования силового, теплового и физико-химического взаимодействия газообразных сред с поверхностями элементов конструкции из различных конструкционных материалов).

На заседании 25 марта 2025 года диссертационный совет пришёл к выводу о том, что содержание диссертации А.Р. Горбушина «Методы определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов в аэродинамических трубах» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой на основании выполненных автором исследований изложены новые научно обоснованные технические и технологические решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие аэродинамических установок страны. Диссертация соответствует критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней», утверждённым Постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в редакции Постановления Правительства РФ от 11.09.2021 г. № 1539). Диссертационный совет принял решение присудить Горбушину Антону Роальдовичу учёную степень доктора технических наук по специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов.

При проведении тайного голосования диссертационный совет в количестве 20 человек,

из них:

- по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы
 - 4 доктора физико-математических наук,
 - 1 доктор технических наук,
- по специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов
 - 4 доктора физико-математических наук,
 - 6 докторов технических наук,
- по специальности 2.5.14. Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов
 - 1 доктор физико-математических наук,
 - 4 доктора технических наук,

участвовавших в заседании, из 25 человек, входящих в состав совета, проголосовали: за присуждение учёной степени — 18, против присуждения учёной степени — 0, недействительных бюллетеней — 2.

Заместитель председателя
диссертационного совета
31.1.006.01,
д.ф.-м.н., с.н.с.

Сергей Владимирович Ляпунов

Учёный секретарь
диссертационного совета
31.1.006.01,
д.ф.-м.н., доцент

Мурад Абрамович Брутян

25 марта 2025 года

