

Отзыв

официального оппонента, доктора технических наук, директора исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология» федерального автономного учреждения «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» Арефьева Константина Юрьевича на диссертационную работу Горбушина Антона Роальдовича «Методы определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов в аэродинамических трубах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.12 «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов».

Диссертационная работа А.Р. Горбушина посвящена **актуальному** направлению, а именно: разработке научных основ обеспечения практической реализации тензометрических весов, отвечающих повышенным требованиям производителей летательной техники к точности и достоверности экспериментальных данных, получаемых в аэродинамических трубах. Требования, в свою очередь, диктуются потребностью выявления на стадии аэродинамических продувок масштабных моделей летательных аппаратов аэродинамических эффектов, влияющих на безопасность полета и экономическую эффективность транспортных самолетов. Наиболее высокие требования предъявляются производителями гражданских самолетов к коэффициенту сопротивления (требуемая относительная погрешность может составлять не более $\pm 0,01 \%$) и углу атаки (требуемая погрешность не более $\pm 0,01^\circ$)

Цель диссертационного исследования сформулирована автором как изучение повышения точности определения квазистатических и нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах.

Содержание диссертационной работы. Диссертационная работа состоит

из введения, пяти глав, заключения и списка литературы. В каждой главе диссертации даны частные выводы. Работа представлена на 250 страницах. Изложение материала в диссертации соответствует требованиям к научным работам, содержит 77 поясняющих рисунков и 17 таблиц. Библиография из 190 наименований отражает ключевой перечень известных современных исследований в рассматриваемой автором области науки. Работа написана понятным научно-техническим языком, содержит общепринятые термины и определения. Автореферат отражает содержание работы, основные результаты, а также необходимую для анализа информацию.

Во введении автором выполнен обзор известных исследований по теме диссертации, представлены общие сведения о тензометрических весах и маятниковых компенсационных акселерометрах, выявлены направления исследования, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности работы, представлены апробация работы и список статей по теме диссертации, реализация её результатов, объём и структура диссертации.

В первой главе представлены разработанные методы измерения с помощью тензометрических весов: метод калибровки тензометрических весов на калибровочных стендах ЦАГИ; метод учета влияния веса модели и веса компонент тензометрических весов на их показания; метод определения коэффициента температурной чувствительности тензометрических весов; метод учета влияния температуры на нулевые показания тензометрических весов, метод измерения векторов нестационарных аэродинамических силы и момента в аэродинамических трубах с помощью шестикомпонентных тензометрических весов; два метода измерения массы движущегося объекта с помощью однокомпонентного динамометра.

Вторая глава посвящена разработке трёхкомпонентной математической модели одноосевого маятникового акселерометра для измерения углов тангажа и крена и методу измерения нестационарных углов тангажа и крена моделей

летательных аппаратов в аэродинамических трубах с помощью компенсационных маятниковых акселерометров при наличии вибраций.

В третьей главе разработаны метод учета влияния влажности воздуха на скорость потока, скоростной напор, числа Маха и Рейнольдса в дозвуковых и трансзвуковых аэродинамических трубах при условии отсутствия конденсации влаги в потоке и метод измерения нестационарного давления приемником воздушного давления при наличии полости между датчиком и приемным отверстием.

Четвертая глава посвящена верификации разработанных в главах 1-3 методов измерений. Метод измерения нестационарных нагрузок верифицирован опытами с приложением ступенчатой силы к однокомпонентному динамометру для измерения силы трения пограничного слоя, к продольной и поперечной компоненте шестикомпонентных тензометрических весов и к динамометру для измерения массы движущихся грузов.

В пятой главе представлены результаты применения разработанной методики в трансзвуковой аэродинамической трубе Т-128 и трубе Людвига УТ-1М.

Ключевая составляющая **научной новизны** работы, по мнению оппонента, заключается в том, что:

- 1) 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.

Метод обеспечивает измерения в широком диапазоне частот, включая собственную частоту измерительных устройств. Задача решена для общего

случая, когда система координат тензометрических весов и акселерометра является неинерциальной.

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

3) Впервые 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.

Практическая значимость работы заключается в том, что разработанная методика обработки результатов испытаний на тензометрических весах позволила существенно повысить точность результатов испытаний за счет выявления систематических погрешностей и исключения их из результатов испытаний. Разработанная методика свела случайные погрешности определения квазистатических коэффициента сопротивления и угла атаки до уровня требований производителей транспортных самолетов: $\Delta C_x \approx \pm 0,00005-0,0001$ и углу атаки $\Delta \alpha \approx \pm 0,005-0,01^\circ$. Такой уровень случайных погрешностей позволяет сокращать программы экспериментальных исследований моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах за счёт уменьшения количества повторных испытаний.

Разработанная методика измерения нестационарных аэродинамических характеристик может быть использована для обработки результатов испытаний моделей летательных аппаратов и их элементов в аэродинамических трубах кратковременного, периодического и непрерывного действия с применением тензометрических весов и маятниковых компенсационных акселерометров.

В рамках **реализации** результатов работы произведено внедрение методики в программу обработки квазистатических результатов испытаний программного комплекса «Поток» в аэродинамических трубах Т-128, АУ-1 и АУ-2. Результаты

работы используются на протяжении 15 лет при измерении в аэродинамической трубе Т-128 квазистатических аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов отечественной и зарубежной летательной техники.

Апробация подтверждена участием автора с докладами по тематике работы на Международных и Всероссийских конференциях и симпозиумах. По материалам диссертации опубликовано 14 печатных работ, входящие в перечень ВАК, 6 патентов и 2 работы в сборниках трудов Международных и отраслевых конференций.

Полученные автором результаты можно считать достаточно **достоверными**, так как методы, рассмотренные в работе, верифицированы широко распространенными опытами с приложением ступенчатого или импульсного воздействия и апробированы в трансзвуковой аэродинамической трубе и трубе Людвига.

По диссертационной работе можно сделать следующие **замечания** и рекомендации:

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 требуемые 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 интерференций 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 (теневыми, 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.

Заключение:

Отмеченные замечания не снижают общей положительной оценки работы и не влияют на основные результаты. Диссертация А.Р. Горбушина является законченной научно-квалификационной работой, включающей новые научные результаты, их обоснование и приложение к практическому применению. Работа носит важное значение для развития науки и техники. Цель работы достигнута.

Диссертация соответствует требованиям Положения о присуждении ученых степеней. Представленная диссертация является законченной научно-квалификационной работой, в которой предложена методика для повышения точности определения квазистатических и нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах. Автор диссертации Горбушин Антон Роальдович

заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.12 «Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов».

Официальный оппонент:

директор исследовательского центра «Аэрокосмические двигатели и химмотология», доктор технических наук

МП.



Арефьев Константин Юрьевич

«28» января 2025 г.

Федеральное автономное учреждение «Центральный институт авиационного моторостроения имени П.И. Баранова» (ФАУ «ЦИАМ им. П.И. Баранова»)
Адрес: 111116, Россия, Москва, ул. Авиамоторная, 2
Телефон: +7 (495) 362-49-50, +7 (499) 763-61-67
E-mail: kyarefev@ciam.ru
<http://www.ciam.ru/>

Ученому секретарю
диссертационного совета 31.1.006.01 при
ФАУ “ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского”,
доктору физико-математических наук
Брутяну М.А.

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Знаменской Ирины Александровны на диссертационную работу Горбушина Антона Роальдовича “Методы определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов в аэродинамических трубах”, представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов.

Диссертационная работа Горбушина А.Р. посвящена разработке и апробации экспериментальных методов измерения аэродинамических характеристик при исследованиях моделей летательных аппаратов на крупномасштабных аэродинамических стендах. Разработанные методы апробированы и применены для исследования течений на ряде аэродинамических установок, в широком диапазоне параметров аэродинамического эксперимента.

Цель работы — повышение точности определения квазистатических и нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах – выполнена полностью.

Актуальность работы не вызывает сомнения, она определяется прикладными задачами, связанными с проектированием, разработкой и

созданием новой авиационной техники и ее отработки на наземных установках.

Решенная в диссертации задача — повышение точности определения квазистатических и нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах — имеет как **фундаментальное, так и прикладное значение.**

В диссертации разработаны 3 класса методов определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов в аэродинамических трубах с высокой точностью:

1. Методы измерения векторов нестационарной аэродинамической силы и нестационарного аэродинамического момента, нестационарных углов тангажа и крена, нестационарного давления при наличии полости между датчиком и приемным отверстием приемника воздушного давления в аэродинамических трубах.

2. Методы учета влияния температуры на показания тензометрических весов и маятниковых акселерометров.

3. Метод учета влияния влажности воздуха на скорость потока, скоростной напор, числа Маха и Рейнольдса в дозвуковых и трансзвуковых аэродинамических трубах при условии, что отсутствует конденсация влаги в потоке.

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы, (190 наименований).

Во введении выполнен обзор известных исследований по теме диссертации, представлены общие сведения о тензометрических весах и маятниковых компенсационных акселерометрах. Представлены апробация работы и список статей по теме диссертации.

Приведенный во введении обзор литературы показал, что на сегодняшний день нет универсального подхода к решению основной задачи

экспериментальной аэродинамики - измерения нестационарных аэродинамических нагрузок. Существующие методы аэродинамики применимы в основном для частных задач; часть методов ограничено диапазоном частот, которые значительно меньше собственной частоты весов; не используются физические модели, адекватно отражающие измерительные системы.

Убедительно обоснована актуальность темы диссертации. Сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности работы, объём и структура диссертации. Также во введении представлены апробация работы и список статей по теме диссертации.

В первой главе разработаны методы измерения с помощью тензометрических весов: метод калибровки тензометрических весов на калибровочных стендах ЦАГИ;

метод учета влияния веса модели и веса компонент тензометрических весов на их показания;

метод определения коэффициента температурной чувствительности тензометрических весов;

метод учета влияния температуры на нулевые показания тензометрических весов;

метод измерения векторов нестационарных аэродинамических силы и момента в аэродинамических трубах с помощью шестикомпонентных тензометрических весов;

два метода измерения массы движущегося объекта с помощью однокомпонентного динамометра.

Во второй главе решена задача разработки нового универсального метода измерения нестационарных углов тангажа и крена моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах с помощью маятникового акселерометра. Задача решена для общего случая, когда акселерометр находится в неинерциальной система координат, т. е. к нему приложено переменное ускорение.

Разработана трёхкомпонентная математическая модель одноосевого маятникового акселерометра для измерения углов тангажа и крена.

В третьей главе описан разработанный автором метод учета влияния влажности воздуха на скорость потока, скоростной напор, числа Маха и Рейнольдса в дозвуковых и трансзвуковых аэродинамических трубах при условии отсутствия конденсации влаги в потоке, а также - метод измерения нестационарного давления приемником давления при наличии полости между датчиком и приемным отверстием.

Получено соотношение, связывающее числа Маха во влажном воздухе и число Маха в сухом воздухе.

Четвертая глава посвящена верификации разработанных в главах 1–3 методов измерений. Метод измерения нестационарных нагрузок верифицирован опытами с приложением ступенчатой силы к однокомпонентному динамометру для измерения силы трения пограничного слоя, к продольной и поперечной компоненте шестикомпонентных тензометрических весов и к динамометру для измерения массы движущихся грузов.

В пятой главе приведены результаты экспериментальной проверки методов определения аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов. В частности, испытания

модели транспортного самолета в аэродинамической трубе Т-128 показали, что случайные погрешности коэффициента сопротивления и угла атаки при квазистатических измерениях находятся на уровне, который соответствует современным требованиям производителей транспортных самолетов. Получены и представлены десятки количественных диаграмм, спектров, графиков; проведено сравнение с численными расчетами и с результатами других исследователей и данными, полученными в Т-128 другими методами.

Диссертационная работа Горбушина А.Р. представляет собой законченное научное исследование в области экспериментальной аэродинамики.

Полученные автором и изложенные в диссертации результаты являются **новыми**, а выводы – **обоснованными**. Достоверность полученных автором результатов подтверждена квалифицированным применением различных экспериментальных методов; сравнением с результатами, полученными другими авторами. Подробное описание методов допускает их воспроизводимость на различных аэродинамических стендах.

К несомненным **достоинствам работы** относится владение автором набором прецизионных высокотехнологичных методов экспериментальных исследований на аэродинамических стендах широкого класса. Автор сочетает высокую квалификацию в области экспериментальной аэродинамики с глубоким пониманием возможностей модификации экспериментальных методов и умением их усовершенствовать.

Автором дано убедительные объяснения полученным сложным количественным зависимостям, связанным с тонкими физическими эффектами в пограничных слоях, в резонаторах, с динамикой возмущений при запуске сопла и др.

Наиболее существенными научными результатами, полученными автором, представляются следующие:

- Основной результат - снижение за счет предложенных методов случайных погрешностей коэффициента сопротивления и угла атаки, которые соответствуют современным требованиям производителей транспортных самолетов.
- Предложение, реализация, внедрение стенда для определения массы движущихся тел.
- Определение диапазонов влажности, оказывающих влияние на параметры потока,
- Предложенные методы применимы в широком диапазоне параметров измеряемых в аэродинамических трубах величин.

По диссертации 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.

Имеются замечания по оформлению диссертации.

- 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 подъёмной силы... - при каком числе Маха проведены испытания?

Приведенные недостатки не являются принципиальными при общей оценке работы. В целом диссертация выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты имеют большое значение для научных исследований и практических применений.

Основные результаты диссертации опубликованы в ряде работ, включая девять печатных работ, входящих в список ВАК, пять печатных работ в журналах первого квартиля (Q1), входящих в базу данных Web of Science Core Collection. Результаты работы докладывались и обсуждались на ряде авторитетных научных конференций и семинаров.

Автореферат в полной степени отражает наиболее существенные положения и выводы диссертации.

Результаты диссертационной работы Горбушина А.Р. могут быть использованы и уже используются в организациях, в которых ведутся и экспериментальные исследования на аэродинамических трубах широкого класса.

Таким образом, диссертация Горбушина А.Р. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена крупная научная проблема, а также изложены новые научно обоснованные технические, технологические решения и разработки, имеющие существенное значение для развития аэрокосмической отрасли страны.

Диссертационная работа Горбушина А.Р. удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени

доктора технических наук и соответствует требованиям “Положения о порядке присуждения ученых степеней” (Постановление правительства РФ № 842 от 24.09.2013 в ред. от 25.01.2024), а Горбушин А.Р. заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.12. Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов.

Официальный оппонент, доктор физико-математических наук, профессор физического факультета Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова, профессор Знаменская И.А.

И. о. декана физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
профессор Белокуров В.В.

Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 2, стр. 2
тел. (495) 939-16-82
e-mail: dean@phys.msu.ru



Профессор физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н.

И.А. Знаменская

06.03.2025

Подпись проф. Знаменской И.А. заверяю
Ученый секретарь физического ф-та МГУ
Профессор Стремоухов С.Ю.

Ученому секретарю
диссертационного совета 31.1.006.01 при
ФАУ «ЦАГИ им. проф. Н.Е. Жуковского»,
доктору физико-математических наук
Брутяну М.А.

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Миронова Сергея Григорьевича на диссертационную работу Горбушина Антона Роальдовича «Методы определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов в аэродинамических трубах», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.12 Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов.

Актуальность темы диссертации. Актуальность представленной диссертации определяется повышением требований к точности и достоверности экспериментальных данных, получаемых в аэродинамических трубах. Повышение уровня точности и достоверности аэродинамических измерений должно обеспечить адекватность и надежность технических решений при разработке перспективных летательных аппаратов и эффективных мер по повышению экономичности современных гражданских самолетов. В первую очередь это касается весовых измерений, измерений параметров потока в аэродинамических трубах и учета влияния на измерения условий эксплуатации труб. Важной составляющей совершенствования систем аэродинамических измерений является учет динамических характеристик весов, в частности тензометрических весов, и определение нестационарных аэродинамических нагрузок на модели, а также учет пульсаций потока на показания измерительных зондов. Это особенно важно при проведении измерений в трансзвуковых аэродинамических трубах и импульсных аэродинамических установках.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения и списка литературы, включающего также публикации автора по теме диссертации. Полный объем диссертации составляет 250 страниц текста, включающих 76 рисунков, 16 таблиц и 190 наименований источников литературы. Материал диссертации хорошо структурирован в соответствии с решаемыми задачами, что облегчает понимание логики ведения исследований и связности полученных результатов. Каждая глава сопровождается подробным заключением, в котором формулируются основные и частные результаты главы.

Во **введении** дан обзор известных исследований по теме диссертации, представлены общие сведения о характеристиках и конструкции тензометрических весов, компенсационных маятниковых акселерометров и пневмозондов для измерения потока. На основе обзора выявлено направление исследования, обоснована актуальность и степень проработанности темы, сформулированы цели и задачи работы, определены методы исследований. Во введении отмечена научная новизна результатов, обоснована, достоверность, теоретическая и практическая значимость результатов диссертации. Кроме того, автором выделены положения, выносимые на защиту, указан личный вклад, отмечены основные публикации по теме диссертации, выступления на конференциях и патенты, реализующие практическую составляющую работы.

В **первой главе** диссертации описан разработанный автором новый и универсальный метод, который позволяет измерять три компоненты нестационарной силы и три компоненты нестационарного момента действующих на модель с помощью шестикомпонентных тензометрических весов. Метод основан на моделировании весов линейными динамическими системами с трением и одной степенью свободы при независимости колебаний и угловых движений компонент весов друг от друга, что является ограничением метода. Задача решена для общего случая, когда система координат не является инерционной. В математической модели, лежащей в основе метода, учитываются возникающие центробежные и тангенциальные силы, массы метрических частей компонент силы и момента весов, координаты их центра масс и их моменты инерции. При этом возникает необходимость измерения

угловых скоростей и ускорений метрических частей весов по всем трем координатам. Нагрузка на весы может быть определена в любой времени по результатам серии измерений в окрестности заданного момента времени для вычисления первой и второй производной по времени от нагрузки. Тонким моментом метода является наличие в уравнениях первой и второй производной от сигнала весов, что предполагает подавление измерительного шума и оптимальную процедуру взятия производных. Эта часть главы на наш взгляд является центральной и важнейшей. Из материала главы видно, что автор отчетливо понимает возможности и ограничения разработанного метода, вытекающие из изначально принятой модели. В ходе изложения метода автором предлагаются варианты экспериментального нахождения необходимых, но неизвестных параметров модели.

В рамках квазистационарной математической модели весов в неинерциальной системе координат получено точное решение задачи определения веса компонент шестикомпонентных тензометрических весов, а также веса модели и координат его приложения относительно начала координат измерительной системы весов. Метод позволяет значительно упростить процедуру калибровки весов на стенде и проведение измерений в аэродинамических трубах, повышает точность весовых измерений.

Дополнительно в главе приведен новый способ калибровки весов на стенде, исключаящий операцию пересчета нагрузок из системы калибровочного стенда в систему метрической части весов.

Второй по важности решенной задачей главы является разработка метода определения систематической погрешности и внесения поправок к нулевым показаниям весов, связанной с влиянием переменной оставляющей температуры потока, особенно актуального для труб замкнутого цикла, типа трансзвуковой аэродинамической трубы Т-128, где в процессе ее эксплуатации происходит медленный нагрев потока. Метод позволяет проводить сразу серию пусков трубы без остановки на охлаждение, что повышает производительность и уменьшает стоимость испытаний.

Во **второй главе** Разработана трехкомпонентная математическая модель одноосевого компенсационного акселерометра для измерения углов тангажа и крена. В рамках модели получены оценки погрешностей измерений. Выявлены систематические погрешности данного акселерометра, обусловленные ускорением, приложенным перпендикулярно оси чувствительности акселерометра, а также его температуры.

Разработан новый универсальный метод для измерения нестационарных углов тангажа и крена в аэродинамических трубах с помощью одноосевого маятникового компенсационного акселерометра. Математическая модель метода включает линейную динамическую систему с трением и одной степенью свободы. Задача решена для общего случая неинерциальной системы координат, когда к его корпусу приложено переменное ускорение вдоль его оси чувствительности. Углы тангажа или крена могут быть определены в любой произвольный момент времени по результатам серии измерений в окрестности заданного момента времени для вычисления первой и второй производных по времени от показаний акселерометра с целью исключения собственной динамики системы акселерометра из его показаний. В главе предложены возможные эксперименты, позволяющие находить необходимые неизвестные параметры модельной системы акселерометра.

В рамках подхода, использованного в первой главе для учета влияния переменной температуры потока на показания тензовесов, в главе получены зависимости для учета влияния температуры на показания акселерометра, что при их использовании в системе тензовесов должна повысить производительность и уменьшить стоимость испытаний.

Третья глава диссертации посвящена измерению параметров потока в аэродинамической трубе. Первая часть третьей главы посвящена учету влияния влажности воздуха на основные параметры течения в аэродинамической трубе, такие как удельная газовая постоянная, скорость звука, число Маха, скорость потока, число Рейнольдса, скоростной напор. С использованием простых соотношений, при уровне влажности вдали от точки конденсации водяного пара,

были получены поправки и оценено влияние влажности на отдельные измеряемые параметры.

Вторая часть главы посвящена измерению нестационарного давления в потоке зондами типа Пито-Прандтля с учетом наличия в их конструкции значительных внутренних объемов. Задача была решена в рамках динамической системы резонатора Гельмгольца. Было показано, что нестационарное газодинамическое течение описывается уравнениями линейной динамической механической системы, подобными приведенным в главах 1 и 2. Была предложена процедура исключения сигнала, связанного с колебаниями воздуха в полостях зонда Пито-Прандтля, предложены и обоснованы возможные эксперименты для получения необходимых параметров динамической системы.

В Четвертой главе в рамках единого подхода приведены процедуры и результаты верификации разработанного метода исключения влияния собственной динамики измерительных устройств на их выходные сигналы в специальных модельных экспериментах путем периодического, ступенчатого и импульсного силового воздействия. В частности, продемонстрирована работа метода при определении величины и характера сигнала устройства измерения сил поверхностного трения в пограничном слое методом плавающего элемента. Найдена собственная частота и коэффициент трения системы «динамометр плюс плавающий элемент», приведен пример выделения стационарного сигнала динамометра. В экспериментах с этим устройством также верифицирован метод учета изменения температуры элементов динамометра, разработанный для весов в первой главе.

Аналогичные эксперименты были проведены для шестикомпонентных тензовесов при приложении ступенчатой силы к компонентам продольной, поперечной силы и момента рыскания. Для одноосевого маятникового акселерометра были проведены эксперименты со свободным падением и периодическим воздействием силы на вибростенде.

Специальная установка была создана для проверки метода исключения колебаний при измерении массы движущегося груза, упомянутого в первой главе. Необходимость подобного эксперимента, скорее всего, объясняется

простотой данной динамической системы с одной степенью свободы и с минимумом дополнительно влияющих факторов.

В модельных экспериментах с пневмозондом Пито-Прандтля применено интенсивное периодическое звуковое воздействие и воздействие импульсным давлением.

Пятая глава диссертации посвящена результатам экспериментальной проверки разработанных методик в реальных испытаниях в трансзвуковой аэродинамической трубе и импульсной трубе Людвиг. В трубе Людвиг были испытаны шестикомпонентные тензосенсоры с моделью конуса, в трансзвуковой аэродинамической трубе испытано устройство измерения поверхностного трения с плавающим элементом, измерены стационарные величины давлений и спектры пульсаций давления в потоке зондом Пито-Прандтля.

В **заключении** сформулированы основные результаты работы.

Список источников оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ Р 7.0.11-2011 и включает необходимый перечень источников.

Новизна исследования. Разработан метод измерения с высокой точностью и в широком диапазоне частот:

- нестационарной аэродинамической силы и нестационарного аэродинамического момента с помощью шестикомпонентных тензосенсоров;
- нестационарных углов тангажа и крена с помощью маятниковых компенсационных акселерометров;
- нестационарного давления в потоке аэродинамических труб зондом Пито-Прандтля с учетом конечного объема внутренних полостей.

Разработана трехкомпонентная математическая модель одноосевого маятникового акселерометра как средства измерения углов тангажа и крена с учетом ускорений приложенных перпендикулярно оси чувствительности;

Впервые получены оценки влияния влажности в дозвуковых и трансзвуковых аэродинамических трубах на основные параметры потока.

Значимость полученных результатов для науки и практики. Теоретическая значимость работы заключается в постановке с единых позиций

и в аналитическом решении трёх смешанных задач механики жидкости и механики твердого тела:

- определение нестационарных аэродинамических сил и нестационарного аэродинамического момента, действующих на модель в аэродинамических трубах, с помощью показаний шестикомпонентных тензометрических весов;
- определение нестационарных углов тангажа и крена модели в аэродинамических трубах с помощью показаний маятниковых компенсационных акселерометров;
- определение нестационарного давления в потоке аэродинамической трубы зондом Пито-Прандтля с учетом конечного объема внутренних полостей.

Практическая значимость работы заключается в повышении на основе разработанных методов точности результатов трубных испытаний моделей летательных аппаратов за счет исключения систематических и случайных погрешностей из результатов испытаний, что приводит к сокращению количества испытаний и удешевлению программ НИР и ОКР. Разработанная методика измерения нестационарных аэродинамических характеристик является универсальной и может быть применена для открытых и замкнутых аэродинамических труб непрерывного, периодического, кратковременного/импульсного действия, а также при испытаниях моделей с быстро изменяющимися аэродинамическими характеристиками.

Обоснованность и достоверность результатов и выводов диссертации.

Разработанные методы основаны на известных соотношениях механики твердого тела, жидкости и газа. Решаемые в диссертации задачи сведены к обыкновенным дифференциальным уравнениям второго порядка, свойства и решения которых хорошо известны. Методы верифицированы широко распространенными в механике модельными экспериментами с приложением к измерительным системам периодического, ступенчатого и импульсного силового воздействия. Верификация результатов работы для акселерометров выполнена с применением высокоточных приборов измерения углов. Методы, разработанные в диссертации, апробированы на шестикомпонентных тензометрических весах 6ЭВ-128-1 с моделью и трехкомпонентными

акселерометрами Dytran-3333A2, на устройстве измерения силы трения в пограничном слое и на пневмозонде Пито-Прандтля в реальных условиях работы трансзвуковой аэродинамической трубы Т-128 и трубы Людвига УТ-1М.

Оценка содержания диссертации в целом. Содержание диссертации полностью соответствует целям работы и сформулированным задачам. Диссертация является цельным законченным исследованием с четкой внутренней структурой. Объектами исследований являются измерительные системы трубного аэродинамического эксперимента. Основные результаты диссертации получены в рамках единого методического подхода к решению задач динамических измерительных систем. Материал диссертации хорошо сбалансирован по критерию соотношения теории и эксперимента. Результаты исследований диссертации являются универсальными для применения в аэродинамических трубах кратковременного, периодического и непрерывного действия, затрагивают основные категории измерений в области аэродинамики, а также получили реализацию в виде интеллектуальных технических продуктов.

Можно отметить, что важнейшие результаты диссертационной работы заключаются в следующем:

1. Разработаны методы определения с высокой точностью нестационарных аэродинамических сил и моментов моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов и компенсационных маятниковых акселерометров.
2. Созданы устройства для измерения нестационарной силы, нестационарного давления, нестационарных углов тангажа и крена и динамометр для измерения нестационарной силы трения в пограничном слое, разработаны математические модели этих устройств.
3. Задачи измерения нестационарных нагрузок и углов решены для общего случая неинерциальной системы координат измерительных устройств, разработанные методы позволяют определять нестационарные параметры в широком диапазоне частот, включая собственную частоту колебаний измерительных устройств.

4. При измерении нестационарных параметров достигнуто уменьшение среднеквадратичной погрешности в 10 раз по сравнению с существующими методами, до уровня 1% для однокомпонентных динамометров, до уровня 0,5% – 3% для шестикомпонентных тензовесов и до уровня 1% для приемника давления.
5. Достигнуто уменьшение случайных погрешностей измерения коэффициента сопротивления и угла атаки до уровня $\Delta C_{x_a} \approx \pm 0,00005 - 0,0001$; $\Delta \alpha \approx \pm 0,005 - 0,01^\circ$, что соответствует современным требованиям.
6. Учетом влияния динамической составляющей температуры на нулевые показания тензовесов уменьшена погрешность измерений до уровня собственной среднеквадратичной погрешности весов 0,05% – 0,1%.
7. Показано, что для условий потока в до- и трансзвуковых аэродинамических трубах влияние естественной влажности потока несущественно для чисел M и Re , но может достигать 0,4% для скорости потока.

Замечания по диссертации и дискуссионные вопросы. При общей положительной оценке диссертационной работы Горбушина А.Р. следует отметить ряд замечаний, уточнений и дискуссионных вопросов.

Опечатки и текстовые неточности: 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.

Замечания и уточнения: 1. 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;

2. Не понятно, что в работе используется – коэффициент корреляции R или коэффициент детерминации R^2 ;

3. 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 .

4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. Необходимо объяснить значительный разброс точек на рис. 4.11а, так как на всех остальных подобных графиках разброс точек минимальный.
8. Название главы 5 не полностью соответствует ее содержанию.

Некоторые дискуссионные вопросы:

1. 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;
2. Необходимо указать причину сохранения остаточных колебаний после обработки, на пример, на рис. 4.3, рис. 4.12а,б, рис. 4.14, рис. 5.3.
3. Почему в обработке данных измерений использовались конечные разности второго порядка точности, а не третьего или четвертого? Как порядок точности влияет на конечный результат обработки?
4. 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 подавления 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.

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

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней. Несмотря на сделанные замечания диссертация Горбушина Антона Роальдовича «Методы определения нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов с помощью тензометрических весов в аэродинамических трубах» является самостоятельной и законченной научно-исследовательской работой, имеющей важное практическое значение в критической области технологического развития. Обоснованность и достоверность выводов, основных научных положений и практические рекомендации диссертации не вызывают сомнений. Работа содержит теоретические и практические решения, касающиеся повышения точности измерений стационарных и нестационарных аэродинамических сил и моментов с помощью тензометрических весов, нестационарных углов тангажа и крена с помощью маятниковых акселерометров, нестационарного давления пневматическими зондами. Результаты исследований, описанные в диссертации, верифицированы модельными экспериментами и экспериментами в реальных условиях трансзвуковой аэродинамической трубы ЦАГИ Т-128 и импульсной аэродинамической трубы Людвига УТ-1М. Можно отметить, что все цели и задачи, поставленные в диссертационной работе, выполнены в полном объеме.

Область диссертационного исследования соответствует паспорту научных специальностей ВАК Минобрнауки РФ, а именно специальности 2.5.12 Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов в пунктах 1, 10 и 11.

Результаты диссертационного исследования Горбушина Антона Роальдовича, выносимые на защиту, полностью отражены в 14-ти статьях, опубликованных лично и в соавторстве в высокорейтинговых рецензируемых научных изданиях, 9 из которых входят в список ВАК при Минобрнауки РФ и 5 работ входят в первый квартиль, индексируется в отечественных и международных базах данных. Результаты исследований и практические

методики автора прошли апробацию на 32-х российских и международных конференциях, изложены и обсуждены на межинститутском видеосеминаре по аэромеханике ЦАГИ - ИТПМ СО РАН – С-ПБПУ – НИИМ МГУ и семинаре Лаборатории радиационной газовой динамики ИПМех РАН им. А.Ю. Ишлинского, где получили одобрение. Результаты диссертационной работы имеют практическую реализацию, зафиксированную в 6-ти патентах РФ. Автореферат диссертации в полной мере отражает содержание, основные положения и результаты диссертационного исследования. По объему полученных данных, новизне поставленных и решенных задач, научному и практическому значению полученных результатов, диссертационная работа Горбушина Антона Роальдовича соответствует требованиям «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ № 842 от 24.09.23 в ред. 25.01.24), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора наук, а ее автор Горбушин Антон Роальдович заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.5.12 Аэродинамика и процессы теплообмена летательных аппаратов.

630090, Новосибирск, ул. Институтская, д. 4/1, м.т. 89139545792, E-mail: mironov@itam.nsc.ru

Я согласен на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Официальный оппонент,
главный научный сотрудник
ИТПМ СО РАН, д.ф.-м.н., профессор

17.02.2025

