

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИПМех РАН

Чл. корр. РАН

« 1 »



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

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.

Целью диссертационной работы является повышение точности определения квазистатических и нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах с помощью разработанных автором методов измерения нестационарных нагрузок, углов и давления, методов выявления систематических погрешностей, вызванных влиянием температуры на показания первичных преобразователей, и метода учета влияния влажности на параметры потока в аэродинамических трубах. **Актуальность** темы исследования обоснована возросшими требованиями производителей летательной техники к точности результатов экспериментальных исследований моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах.

Содержание диссертационной работы. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка литературы из 190 наименований, отражающего современное состояние российских и зарубежных исследований по теме диссертации. Каждая глава заканчивается выводами по результатам выполненных в ней исследований. Диссертационная работа представлена на 250 страницах; содержит 77 рисунков и 17 таблиц. Автореферат полностью отражает содержание всех разделов диссертации и основные результаты.

Во **введении** приведен обзор российских и зарубежных исследований по теме диссертации, даны современные требования производителей

гражданской авиационной техники к точности определения аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах, указаны нерешенные задачи в области исследований автора, обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цель и задачи работы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость полученных результатов, приведены положения, выносимые на защиту, обоснована степень достоверности работы, представлены данные по апробации работы, список статей автора по теме диссертации, практическая реализация результатов, объём и структура диссертации.

Первая глава посвящена разработке новых уточненных методов измерения с применением тензометрических весов:

- метод калибровки тензометрических весов на калибровочных стендах ЦАГИ;
- учет влияния веса модели и веса метрических частей тензометрических весов на их показания;
- определение коэффициента температурной чувствительности тензометрических весов;
- учет пространственно-временного градиента температуры на нулевые показания тензометрических весов,
- метод определения векторов нестационарной аэродинамической силы и нестационарного аэродинамического момента в аэродинамических трубах с помощью шестикомпонентных тензометрических весов;
- два метода измерения массы движущегося объекта с помощью однокомпонентного динамометра.

Во второй главе предложена математическая модель компенсационного маятникового акселерометра для измерения углов тангажа и крена. Разработан метод определения нестационарных углов тангажа и крена моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах с помощью компенсационных маятниковых акселерометров, в том числе при наличии вибраций.

В третьей главе предложен метод учета влияния влажности воздуха на параметры потока в дозвуковых и трансзвуковых аэродинамических трубах. Важным условием является отсутствие конденсации влаги в потоке. Разработан метод измерения нестационарного давления приемником воздушного давления, в котором имеется полость между датчиком и потоком.

Четвертая глава посвящена верификации разработанных в главах 1-3 методов измерений. Методы проверены классическими экспериментами для трех вариантов воздействия внешнего возмущения на измерительные устройства: гармонического, ступенчатого или импульсного.

В пятой главе представлены результаты применения разработанных автором методов в трансзвуковой аэродинамической трубе Т-128 и трубе Людвига УТ-1М.

В заключении диссертации приводятся основные выводы выполненного автором исследования, которые соответствуют положениям, выносимым на защиту.

Научная новизна выполненного исследования заключается в высокоточном оригинальном методе измерения вектора нестационарной аэродинамической силы и вектора нестационарного аэродинамического момента с помощью тензометрических весов, нестационарных углов тангажа и крена с помощью компенсационных маятниковых акселерометров, нестационарного давления при наличии полости между датчиком и приемным отверстием приемника воздушного давления в аэродинамических трубах в широком диапазоне частот, включая собственную частоту измерительных устройств. Задача решена в общем случае неинерциальной системы координат.

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

Изучено влияние влажности воздуха в потоке на его скорость, скоростной напор, числа Маха и Рейнольдса в дозвуковых и трансзвуковых аэродинамических трубах при условии, что отсутствует конденсация влаги в потоке.

Теоретическая значимость работы заключается в постановке и аналитическом решении трех смешанных задач теоретической механики:

1. Определение переменных по времени векторов аэродинамической силы и аэродинамического момента, действующих на модель летательного аппарата в аэродинамической трубе, с использованием показаний шестикомпонентных тензометрических весов.
2. Определение переменных по времени углов тангажа и крена модели летательного аппарата в аэродинамической трубе с использованием показаний маятниковых компенсационных акселерометров.

3. Определение нестационарного давления в аэродинамической трубе приемниками воздушного давления, у которых имеется полость между приемным отверстием и датчиком, расположенным в полости.

Практическая значимость работы заключается в существенном повышении точности результатов испытаний моделей летательных аппаратов в аэродинамических трубах. Разработанные в диссертации методы позволили найти ряд систематических погрешностей в измерениях квазистатических и нестационарных сил, моментов, давлений и углов тангажа и крена и исключить их из результатов измерений. Иными словами, разработанные методы переводят часть случайных погрешностей измерений в разряд исключенных систематических и, таким образом, уменьшают случайные погрешности эксперимента. Автор демонстрирует в пятой главе на примере результатов, полученных в аэродинамической трубе Т-128, что использование разработанных им методов позволяет достичь очень низкого уровня случайных погрешностей измерения квазистатических аэродинамических характеристик модели пассажирского самолета: $\Delta c_{x_a} \approx \pm 0,00005 - 0,0001$ и $\Delta \alpha \approx \pm 0,005 - 0,01^\circ$. Этот уровень погрешностей соответствует наиболее жестким требованиям, предъявляемым производителями гражданских самолетов к результатам экспериментальных исследований в аэродинамических трубах. Достигнутое уменьшение уровня случайных погрешностей позволяет сокращать объемы программ экспериментальных исследований в аэродинамических трубах за счёт уменьшения количества повторных испытаний, а также повысить достоверность получаемых результатов.

Степень достоверности полученных результатов подтверждается использованием в диссертации известных соотношений механики твердого тела, жидкости и газа, верификации разработанных методов широко применяемыми опытами с заданием установившихся гармонических колебаний, приложением ступенчатого или импульсного воздействия и сравнением с результатами других авторов. Достоверность полученных автором результатов доказана обсуждением работы на двух семинарах, докладами автора на тридцати двух международных и российских конференциях, полученными автором шестью патентами и семнадцатью печатными работами, шесть из которых опубликованы в журналах первого квартиля (Q1), входящих в базу данных Web of Science Core Collection.

Разработанные А.Р. Горбушиным методы определения квазистатических аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов внедрены в программу обработки результатов испытаний

программного комплекса «Поток», которая используется в аэродинамических трубах АУ-1 и АУ-2 АО «ГосМКБ «Радуга имени А.Я. Березняка» и Т-128 ЦАГИ.

Разработанную в диссертации совокупность методов следует рассматривать как единую методику проведения экспериментальных исследований в аэродинамических трубах, которая существенно повышает точность определения квазистатических и нестационарных аэродинамических характеристик моделей летательных аппаратов.

По диссертации можно сделать 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».

Заключение.

Отмеченные технические замечания не снижают общей положительной оценки работы и не влияют на ее результаты. 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 им. А.Ю. Ишлинского 02 октября 2024 года, заключение о положительной оценке работы принято единогласно.

Главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией
радиационной газовой динамики,
академик РАН, д.ф.-м.н.



Суржиков Сергей Тимофеевич

Главный научный сотрудник,
заведующий лабораторией
взаимодействия плазмы
и излучения с материалами, д.ф.-м.н.



Колесников Анатолий Федорович