

## **ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА**

доктора технических наук Митрофанова Олега Владимировича на диссертационную работу Черноволова Руслана Андреевича «Методика разработки дренированных динамически подобных моделей для исследования в аэродинамических трубах нестационарных аэродинамических нагрузок и характеристик аэроупругости летательных аппаратов», представленную на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

**Актуальность темы диссертации** связана с необходимостью уточнения нестационарных параметров бафтинга и других явлений аэроупругости, что сложно и не безопасно выполнять в летных испытаниях натуральных конструкций. Традиционные «аэродинамические» и «флаттерные» модели не позволяют в полной мере решить эту задачу при испытаниях в АДТ, а численные методы не всегда обеспечивают требуемую точность и надежность решения рассматриваемых сложных задач.

Разработанные модели обеспечивают высокую информативность дорогостоящих экспериментов в АДТ и позволяют исследовать нестационарные явления с учетом отклика упругой конструкции, что дает более полную картину взаимодействия нестационарных аэродинамических и упругих сил.

**Обоснованность научных результатов** исследования, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации обеспечена результатами экспериментальных исследований крупномасштабных моделей в трансзвуковой АДТ, проведенных при натуральных числах Маха и углах атаки с высокими числами Рейнольдса (3-10млн), что близко к условиям полета натурального магистрального самолета.

**Достоверность результатов** подтверждается применением сертифицированных программ и средств САПР, включая расчеты МКЭ,

ОБЩИЙ ОТДЕЛ МАИ  
Вх. № \_\_\_\_\_  
07 11 20 19

использованием при проведении экспериментальных исследований сертифицированного оборудования, методик и стандартов, сопоставлением расчетных данных с результатами эксперимента.

**Научная новизна** полученных результатов, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, заключается в следующих разработках:

1) Автором предложены конструкции дренированных динамически подобных моделей (ДДПМ) типовых элементов конструкции самолета (крыло, закрылок, ГО). Разработан способ установки датчиков динамического давления, заключающийся в создании специальных дренированных блоков, устанавливаемых на силовом элементе конструкции (кессон, балка).

2) Сформулирован алгоритм разработки ДДПМ. Выделены основные критерии подобия, критерии выбора материалов, даны анализ характеристик конструкционных материалов, оценка нагруженности ДДПМ при исследовании в аэродинамических трубах, приведен алгоритм расчета, проектирования, изготовления, испытаний и настройки ДДПМ по частотным характеристикам.

3) На основе предложенной методики спроектированы и изготовлены, контрольная ДПМ лонжерона, ДДПМ: консоли крыла большого удлинения, горизонтального оперения, внутренней секции закрылка.

**Практическая значимость** диссертационной работы подтверждена следующими полученными конкретными результатами:

1) Определены характеристики конструкционных материалов, необходимые для создания ДПМ, отвечающей требованиям жесткости, прочности и массы.

2) Создана методика проектирования ДДПМ предназначенных для исследования характеристик аэроупругости и нестационарных аэродинамических нагрузок.

3) Проведены расчет и проектирование конструкции дренированных блоков, в которых устанавливаются датчики динамического давления.



- 4) Выполнена разработка конструкции ДДПМ.
- 5) Проведено сопровождение экспериментальных исследований в трансзвуковой АДТ характеристик аэроупругости при трансзвуковых числах Маха, больших углах атаки и скоростных напорах с использованием созданных ДДПМ.

### **Оценка содержания работы**

Содержание работы полно характеризует проведенные исследования, а также получаемые при их выполнении научные и практические результаты. Изложение отличается ясностью, хорошим техническим и литературным языком. Работа состоит из 162 страниц, включающих введение, три главы, заключение и список литературы из 146 наименований. В диссертации содержатся 137 рисунков и 31 таблица.

Во введении дан обзор публикаций, сформулированы актуальность, цель, степень разработанности темы, научная новизна, теоретическая и практическая значимость, методы исследования, личный вклад автора.

В первой главе изложена методика разработки ДДПМ для исследования в аэродинамических трубах нестационарных аэродинамических нагрузок и характеристик аэроупругости ЛА. Автором рассмотрены особенности моделирования явлений динамической аэроупругости на ДДПМ в аэродинамических трубах в трансзвуковом диапазоне чисел  $M$ . Даны рекомендации для выбора критериев подобия, выполнение которых необходимо при проектировании, изготовлении и испытаниях ДДПМ в трансзвуковых АДТ для получения достоверных результатов эксперимента и переноса их на натурную конструкцию. В работе показано, что наибольшую проблему вызывает выполнение условия массового подобия – критерия Ньютона, обусловленную перетяжелением конструкции ДПМ.

Рассмотрены конструктивные особенности основных типовых силовых схем трансзвуковых ДПМ и влияние на их весовую эффективность формы поперечных сечений основных несущих силовых элементов динамически

подобных моделей. Дана оценка нагруженности ДДПМ при исследовании бафтинга. Предложена процедура уточнения аэродинамических нагрузок на ДДПМ по результатам исследования «жестких» моделей в АДТ. С использованием предложенного метода выбраны параметры проектируемой ДДПМ для проведения исследований явлений бафтинга в АДТ.

Представлен алгоритм выбора проектных параметров ДДПМ. Реализация этого алгоритма продемонстрирована на простом примере (балка постоянного сечения, усиленная слоями ПКМ).

Вторую главу автор посвятил разработке и изготовлению конструкций типовых элементов (крыло, ГО, закрылок) ДДПМ с применением изложенных методов проектирования с использованием ПКМ и современных аддитивных технологий. Аддитивные технологии позволяют повысить точность и сократить трудоемкость изготовления элементов ДДПМ сложной геометрии благодаря совместимости САД моделей с рабочими файлами 3D принтеров. Разработаны конструкции и технология изготовления съёмных дренированных блоков и вставок для размещения датчиков динамического давления, устанавливаемых в основную силовую конструкцию моделей.

На ДДПМ проведены экспериментальные исследования явлений аэроупругости и нестационарных аэродинамических нагрузок в трансзвуковой аэродинамической трубе. Показано что созданные модели обеспечили выполнение заданных требований при испытаниях в АДТ и стали надежным инструментом исследований нестационарных аэродинамических нагрузок с учетом упругости крыла.

Автором разработана и апробирована конструкция внутримодельного вибровозбудителя колебаний.

В Третьей главе приведены оценочные расчетные исследования частотных и прочностных характеристик, изготовленных ДДПМ, а также результаты частотных испытаний.



### **Замечания по диссертационной работе:**

- 1) в диссертации не отражены вопросы, связанные с выбором мест размещения доводочных грузов, используемых при настройке ДДПМ.
- 2) не представлена процедура оценки вклада дренированных блоков в общую жесткость модели
- 3) не затронуты вопросы моделирования демпфирования натурной конструкции, которые могут представлять интерес при рассмотрении некоторых режимов нагружения.

Сделанные замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы.

Представленная к защите диссертационная работа Черноволова Р.А. является законченной научно-квалификационной работой, в которой на основе проведенных автором исследований изложено научно обоснованное решение актуальной задачи создания методики разработки ДДПМ для исследований в аэродинамических трубах нестационарных аэродинамических нагрузок и явлений аэроупругости.

Сформулированные в работе задачи решены, поставленная цель достигнута. Работа написана хорошим техническим языком и четко структурирована.

**Апробация работы.** Результаты работы докладывались на международных, всероссийских и отраслевых научно – технических конференциях и семинарах.

Результаты диссертационной работы опубликованы в 7 статьях в рецензируемых изданиях из рекомендованного ВАК РФ перечня. Опубликованные работы достаточно полно отражают результаты исследований. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Исследования проводились в рамках специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов» и соответствует паспорту указанной специальности (п.п 2 «Разработка расчетно-

экспериментальных методов обеспечения статической прочности», и 3 «Решение задач аэро-и аэроавтоупругости».)

Диссертация отвечает всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Черноволов Руслан Андреевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов»

Официальный оппонент:

заместитель начальника НИО прочности -  
заместитель Главного конструктора по прочности  
АО «Гражданские самолеты Сухого»  
доктор технических наук

Митрофанов О.В.

Подпись Митрофанова О.В. заверяю

05.11.2019г



Акционерное общество «Гражданские самолеты Сухого»

Адрес: г. Москва, ул. Ленинская Слобода, д. 26, эт. 1, пом. IV, ком. 54

Телефон: +7 (495) 727-19-88

Факс: +7 (495) 727 19 83

E-mail: info@scac.ru