

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертацию Брагина Николая Николаевича «Особенности развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных крыльях. Определение границы начала бафтинга $Su_{\text{баф}}$ », представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Бафтинг, как один из видов автоколебаний, известен в авиации с начала 30-х гг. XX века. В последние годы эта тема снова стала **актуальной** в связи с необходимостью разработки новых аэродинамических компоновок магистральных пассажирских самолетов, к которым предъявляются повышенные требования по эффективности и безопасности.

В связи с этим в диссертации исследуются особенности развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных крыльях и определение начала бафтинга $Su_{\text{баф}}$ стреловидных крыльев при крейсерских режимах полета магистральных самолетов на этапе аэродинамического (предварительного) проектирования. Поскольку на этом этапе отсутствует точная информация об упруго-массовых характеристиках проектируемого самолета, в работе рассматривается только аэродинамический аспект бафтинга (т.е. начало бафтинга).

Диссертация содержит введение, 5 глав, заключение и список использованной литературы из 94 источников. Общий объем работы составляет 154 страницы, содержит 94 рисунка и 1 таблицу.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы и направления исследований, сформулированы основные цель и задачи работы, показана научная новизна и практическая значимость результатов, выносимых на защиту, проведен обзор основных работ, посвященных исследованиям в данной области, изложено краткое содержание работы. Полагается, что течение может быть разбито на две зоны: внешнюю область невязкого потока и вязкую пристеночную или следовую внутреннюю область, где течение описывается уравнениями пограничного слоя. Указанные решения должны быть сращены на границе зон (внешняя кромка пограничного слоя).

В **первой главе** изложен численный метод и методология определения аэродинамических характеристик на основе решения уравнений вязко-невязкого

взаимодействия. В работе реализован итерационный алгоритм трансзвукового вязко-невязкого взаимодействия на основе теории пограничного слоя второго приближения. Влияние пограничного слоя на внешнее течение моделируется источниками, расположенными на поверхности крыла. Расчет потенциального обтекания осуществляется на основе конечно-разностного решения полного уравнения для потенциала.

С помощью разработанной методики, были выполнены подробные исследования обтекания модели пассажирского самолета при трансзвуковых значениях числа Маха, соответствующих режимам крейсерского полета самолета и числах Рейнольдса соответствующих экспериментальным значениям в аэродинамических трубах и условиям натурного полета самолета при значениях угла атаки вплоть до значений, соответствующих режиму начала бафтинга. Приведены результаты численных исследований по определению погрешности вычислений на последовательности сгущающихся сеток.

Во **второй главе** приведены численные исследования по определению особенностей обтекания стреловидных крыльев и определению начала бафтинга для аэродинамической компоновки летательного аппарата.

Начало бафтинга определялось тремя различными способами, основанными на анализе основных аэродинамических характеристик: по анализу зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки, по анализу топологии картины предельных линий тока на верхней поверхности крыла и по анализу изменения коэффициента трения. Показано, что различие между результатами, полученными тремя методами, находится в диапазоне от 4 до 9 %, что является достаточно хорошим результатом для предварительного этапа проектирования.

Третья глава диссертации посвящена верификации результатов численных и экспериментальных результатов определения начала бафтинга оптическими методами.

Для подтверждения корректности разработанного метода были проведены исследования модели в аэродинамической трубе ЦАГИ. Для определения начала бафтинга визуальными методами по результатам экспериментальных исследований были использованы 3 метода: метод люминесцентных минишелковинок, метод баропокрытий и тепловизионный метод.

Различие между результатами экспериментальных исследований полученными тремя методами находится в диапазоне от 4 до 9%, что является удовлетворительным результатом на этапе аэродинамических испытаний.

Четвертая глава посвящена анализу экспериментальных результатов определения начала бафтинга полученных с помощью датчиков Kulait и сравнению численных величин с результатами эксперимента.

Аэродинамические критерии бафтинга могут быть использованы на ранних этапах проектирования самолета, когда еще не определены упругомассовые характеристики конструкции и соответственно, не могут быть получены оценки частот собственных колебаний и отклика конструкции на нестационарную аэродинамическую нагрузку. Для того, чтобы выяснить правомерность использования аэродинамических критериев, в ЦАГИ была проведена работа по их сравнению с динамическими применительно к явлению бафтинга крыла.

Для исследованной модели было применено 7 критериев определения начала бафтинга крыла на основе результатов измерений сил и пульсаций аэродинамических нагрузок, которые получены при испытаниях крупномасштабной полумодели в широком диапазоне углов атаки при различных значениях числа Маха и числа Рейнольдса.

Пятая глава посвящена верификации численного метода определения начала бафтинга для 3-х вариантов крыльев трансзвуковых самолетов и сравнение с летным экспериментом. Выполнена оценка влияния ограничений по бафтингу на характеристики ближне-средне магистрального самолета.

В заключении перечислены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

В качестве основных достоинств работы необходимо отметить определение влияния основных геометрических параметров крыла самолета на величину начала бафтинга для стреловидных крыльев большого удлинения магистральных самолетов и рекомендации по применению известных и разработанных автором методов определения границы начала бафтинга к реальным задачам аэродинамического проектирования. Также несомненный интерес представляют полученные расчётно-экспериментальные зависимости, позволяющие определять начало бафтинга на этапе аэродинамического проектирования для 3х вариантов стреловидных сверхкритических крыльев.

Степень обоснованности научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, обеспечивается использованием в работе признанных апробированных научных положений и методов исследования.

Достоверность полученных результатов, содержащихся в работе, проверяется путём корректного сравнения расчетных, теоретических и экспериментальных данных.

Несмотря на отмеченные достоинства в работе имеют место следующие недостатки:

1. Во введении было бы желательно привести обзор существующих методов решения, как уравнений пространственного пограничного слоя, так и внешней (невязкой) задачи. К сожалению, автор ссылается, в основном, на работы, непосредственно касающиеся метода решения используемого в его работе.

2. Достоверность полученных в работе численных результатов было бы желательно сравнить с расчетами в рамках решения полных уравнений Навье-Стокса.

3. Диссертанту желательно было бы обосновать выбор модели турбулентности. Кроме того, в работе не указано, при каких условиях используется модель турбулентности Себеси-Смита, при каких модель Spallart-Almares.

4. Не понятно, почему автор отказался от прямого интегрирования уравнения энергии, ограничившись использованием интеграла Крокко.

5. К сожалению ни на графиках, ни в тексте при описании экспериментальных данных не приведены доверительные интервалы.

6. Есть замечания к оформлению работы. Например, на рисунках 1.6-1.7 не понятно какая кривая к какой разностной сетке относится, на некоторых графиках не подписаны шкалы и т.д. В тексте работы имеются опечатки. Некоторые фразы требуют пояснения, например: «пока программа позволяет выполнить расчет».

7. Чтение работы значительно упростило бы наличие списка обозначений.

Указанные недостатки, однако, не носят принципиального характера и не снижают высокую научную и практическую значимость работы. Автореферат соответствует содержанию диссертации.

По результатам исследований опубликовано 34 работы, из них 2 статьи в изданиях из Перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России. 8 работ опубликованы в сборниках материалов конференций в изданиях входящих в Scopus и WoS, получено 8 патентов Российской Федерации. Результаты работы неоднократно обсуждались на научных семинарах и международных конференциях.

Заключение. Содержание диссертации, научные положения и сформулированные выводы дают основание считать, что цель исследования

достигнута, а поставленные в диссертации задачи успешно решены. Тема диссертации Брагина Николая Николаевича «Особенности развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных крыльях. Определение границы начала бафтинга $Su_{баф}$ » и ее содержание соответствуют паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы и выбранной физико-математической отрасли наук.

Таким образом, данная диссертация полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 №842 (в ред. от 01.10.2018), а ее автор Брагин Николай Николаевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент:

Профессор кафедры физики, химии и теоретической механики Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет», доктор физико-математических наук (01.02.05-Механика жидкости, газа и плазмы), старший научный сотрудник

Матвиенко Олег Викторович

26.11.2019

Подпись О.В. Матвиенко удостоверяю

Проректор по научной работе ТГАСУ



П.А.Елугачев

Сведения об организации: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Томский государственный архитектурно-строительный университет»

Адрес: 634003, г. Томск, Соляная пл., 2,

Электронная почта: rector@tsuab.ru

Телефон: 8 (3822) 65-36-93,

Сайт: <http://www.tsuab.ru>