

## ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу  
Брагина Николая Николаевича

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

Как известно, бафтинг представляет собой один из видов автоколебаний, представляющий собой вынужденные колебания летательного аппарата, вызванные периодическим срывом турбулентных вихрей с расположенных впереди конструктивных элементов при их обтекании. В зонах срыва потока возникают пульсации давления, в большинстве случаев носящие случайный характер и имеющие широкий спектр частот. «Скоростной» бафтинг характерен для трансзвуковых скоростей полёта, в этом случае отрыв потока и пульсации давления являются следствием взаимодействия скачков уплотнения с пограничным слоем. Бафтинг необходимо учитывать при проектировании летательных аппаратов новых аэродинамических компоновок. Исследования бафтинга ведутся многие годы, однако надёжные методы его прогнозирования до сих пор не созданы. В связи с вышесказанным эта тема несомненно является **актуальной**.

Хотя проблема бафтинга относится к классическим задачам аэроупругости, в рассматриваемой диссертации исследуются особенности развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных крыльях и определение начала бафтинга  $Su_{баф}$  стреловидных крыльев при крейсерских режимах полета магистральных самолетов на этапе аэродинамического (предварительного) проектирования. На этом этапе отсутствует точная информация об упруго-массовых характеристиках проектируемого самолета, поэтому в работе рассматривается только аэродинамический аспект бафтинга (т.е. начало бафтинга).

**Содержание диссертационной работы.** 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, представлена 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..

В первой главе изложен численный метод и методология определения аэродинамических характеристик на основе решения задачи вязко-невязкого взаимодействия. В работе реализован итерационный алгоритм трансзвукового вязко-невязкого взаимодействия на основе теории пограничного слоя второго приближения.

С помощью разработанной методики, были выполнены подробные исследования обтекания модели пассажирского самолета при трансзвуковых значениях числа Маха, соответствующих режимам крейсерского полета самолета и при значениях угла атаки вплоть до значений, соответствующих режиму начала бафтинга. Приведены результаты исследования сеточной сходимости.

Во второй главе приведены численные исследования особенностей обтекания стреловидных крыльев. Для определения начала бафтинга для аэродинамической компоновки летательного аппарата применялись три различных способа, основанных на анализе зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки, анализе топологии картины предельных линий тока на верхней поверхности крыла и на анализе изменения коэффициента трения. 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 сравнению численных расчетов с экспериментальными результатами по определению начала бафтинга оптическими методами. При исследовании модели в аэродинамической трубе ЦАГИ. были использованы 3 метода: метод люминесцентных минишелковинок, метод баропокрытий и тепловизионный метод. Различие в результатах полученных этими тремя методами находится в диапазоне от 4 до 9%, что является вполне

удовлетворительным результатом для этапа аэродинамических испытаний.

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

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

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

**В заключении** перечислены основные результаты и выводы по диссертационной работе.

**Научная новизна** представленной диссертации заключается в следующем:

1. Апробирована методика расчета аэродинамических характеристик на режимах обтекания крыла близких к началу трехмерного отрыва пограничного слоя;

2. На основании комплексных расчетно-экспериментальных исследований показаны особенности обтекания стреловидных крыльев большого удлинения, спроектированных по сверхкритическим профилям.

3. Определено начала бафтинга (угла атаки,  $Su_{доп}$ ) стреловидных крыльев большого удлинения магистральных самолетов.

4. Даны рекомендации по применению известных и разработанных автором методов определения границы начала бафтинга к реальным задачам аэродинамического проектирования;

5. Получены 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 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 пограничного слоя так и внешней (невязкой) задачи. К сожалению автор ссылается, в основном, на работы непосредственно касающиеся метода решения используемого в его работе.

2. Автор использует хорошо известную модель турбулентности Себеси-Смита. Однако возможность ее использования в данной работе также должна быть обоснована.

3. При режимах, когда в течении возникают обширные отрывные области точность используемой модели, как справедливо отмечает автор, существенно ухудшается. В каком диапазоне изменения параметров задачи (число Маха, угол атаки и др.) используемая модель будет давать достаточную точность?

4. Есть ряд замечаний к оформлению работы. В тексте встречаются опечатки, некоторые рисунки оформлены небрежно. Например, только на рисунках встречается  $C_L$ , нигде в тексте этот параметр не расшифрован, а списка обозначений в работе нет.

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

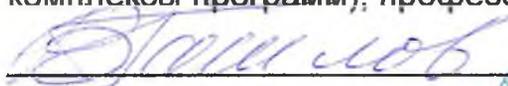
По результатам исследований опубликовано 34 работы, из них 2 статьи в изданиях из Перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России. 8 работ опубликованы в сборниках материалов конференций в изданиях входящих в Scopus и WoS, получено 8 патентов Российской Федерации. Результаты работы неоднократно 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  $Su_{\text{баф}}$ »** и ее содержание соответствуют паспорту специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы

Считаю, что 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:

Главный научный сотрудник, и.о. зав.отделом «Математические модели высокотемпературной гидродинамики» ФГУ «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук», доктор физико-математических наук (05.13.18-Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ), профессор



Гасилов Владимир Анатольевич

Подпись В.А. Гасилова удостоверяю

Ученый секретарь



Маслов А.И.

14 ноября 2019 г.

Сведения об организации: Федеральное государственное учреждение «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша Российской академии наук»

Адрес: 125047, г. Москва, Миусская пл., 4,

Электронная почта: [dipm132014@gmail.com](mailto:dipm132014@gmail.com)

Телефон: 8 (499) 972-35-88,

Сайт: <http://www.keldysh.ru>