

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор по научной работе  
Санкт-Петербургского политехнического  
университета Петра Великого,  
доктор технических наук,  
член-корреспондент РАН



В. В. Сергеев

«      » ноября 2019 г.

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого» на диссертацию Брагина Николая Николаевича «Особенности развития трехмерного отрыва пограничного слоя на стреловидных крыльях. Определение границы начала бафтинга Су<sub>баф</sub>», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы.

**Актуальность темы диссертационной работы.** Бафтинг, как одно из проявлений динамической аэроупругости, известен в авиации с начала 30-х годов прошлого века. Его исследованию было посвящено множество фундаментальных и прикладных работ, в результате которых были выработаны практические рекомендации по предотвращению бафтинга при создании самолетов нескольких поколений. В последнее время эта тема снова стала **актуальной**, что обусловлено необходимостью разработки новых аэродинамических компоновок магистральных пассажирских самолетов, к которым предъявляются повышенные требования по эффективности и безопасности.

**Цель работы** Н.Н.Брагина заключалась в расчетно-экспериментальном исследовании обтекания модели пассажирского самолета со стреловидным крылом с выходом на разработку верифицированной методики, которая на этапе аэродинамического проектирования самолета может использоваться для получения количественных оценок угла атаки и коэффициента подъемной силы, отвечающих началу проявления «скоростного» бафтинга при крейсерских режимах полета магистральных самолетов.

**Научная новизна** состоит в том, что (1) с применением компьютерной программы, реализующей итерационный метод вязко-невязкого взаимодействия, проведен анализ особенностей обтекания стреловидных крыльев большого удлинения, спроектированных по сверхкритическим профилям, и рассчитаны аэродинамические характеристики крыльев, включая режимы, соответствующих началу отрыва; (2) сопоставлены различные методы, в

том числе предложенные автором, для получения на этапе аэродинамического проектирования количественных оценок тех «критических» значений угла атаки и коэффициента подъемной силы, которые отвечают началу проявления бафтинга; (3) получены расчетно-экспериментальные зависимости, позволяющие определять критические значения указанных параметров для трех вариантов стреловидных сверхкритических крыльев.

**Структура и общая характеристика работы.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованной литературы из 94 источников. Работа изложена на 154 страницах; содержит 94 рисунка и 1 таблицу.

Во **введении** автором обоснована актуальность темы диссертации, освещена ее теоретическая и практическая значимость, указаны цели и конкретные задачи исследования, дана общая характеристика используемых для их решения методов, сформулированы основные научные результаты работы и положения, выносимые автором на защиту, приведен список научных конференций, на которых были представлены результаты работы. Также во Введении включен краткий обзор литературы, в рамках которого дано общее описание рассмотренных в диссертации задач и имеющихся по ним опубликованных результатов.

В **первой главе** изложен численный метод и методология определения аэродинамических характеристик на основе решения системы стационарных уравнений вязко-невязкого взаимодействия. Исходно полагается, что течение может быть разбито на две зоны: внешнюю область невязкого потока, рассчитываемого посредством решения трехмерного уравнения для потенциала, и вязкую область (пристеночную или следовую), течение в которой описывается системой уравнений трехмерного пограничного слоя. Решения, разыскиваемые для выделенных областей, должны быть сращены на границе зон (на внешней «кромке» пограничного слоя). В примененной автором расчетной конечно-разностной программе реализован итерационный алгоритм трансзвукового вязко-невязкого взаимодействия второго приближения. Влияние пограничного слоя на внешнее течение моделируется источниками, расположенными на поверхности крыла.

Далее приводятся результаты расчетов по стационарному обтеканию модели пассажирского самолета при трансзвуковых значениях числа Маха, соответствующих режимам крейсерского полета самолета и числах Рейнольдса, реализуемых при экспериментах в аэродинамических трубах, а также при условиях натурального полета самолета. Расчеты по описанной ранее вычислительной модели проведены при различных значениях угла атаки, вплоть до значений, соответствующих режимам, при которых возможно начальное проявление бафтинга. Приведены также результаты методических исследований по определению сеточной чувствительности численного решения (посредством вычислений на последовательности сгущающихся сеток).

Во **второй главе** приведены результаты численных исследований, направленных на анализ особенностей обтекания стреловидных крыльев при трансзвуковых значениях числа

Маха, и выделение из них тех, которые можно использовать в качестве аэродинамических признаков возникновения условий для развития бафтинга, определяемых автором как «начало бафтинга».

Рассматриваются три различных способа определения начала бафтинга по полученным расчетным данным для стационарного обтекания стреловидных крыльев большого удлинения, а именно: (1) на основе анализа зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки, (2) посредством анализа изменяющейся с углом атаки топологии картины предельных линий тока на верхней поверхности крыла, (3) на основе анализа изменений в расчетных распределениях коэффициента трения. Показано, что различие между допустимыми значениями коэффициента подъемной силы ( $C_{y_{баф}}$ ) или же допустимыми значениями угла атаки ( $\alpha_{баф}$ ), оцененными по трем методам, составляет от 4 до 9%, что можно трактовать как вполне приемлемый результат для предварительного, аэродинамического этапа проектирования.

**Третья глава** диссертации посвящена описанию экспериментальных исследований полумодели самолета ПМ128 в аэродинамической трубе ЦАГИ имени профессора Н. Е. Жуковского (АДТ Т-128), проведенных в условиях стационарного течения с применением трех оптических методов (метода люминесцентных мини-шелковинок, метода баропокрытий, тепловизионного метода), а также сопоставлению экспериментальных, полученных на основе визуальных наблюдений оценок  $\alpha_{баф}$  с результатами определения начала бафтинга по представленной ранее расчетной методике.

**В четвертой главе**, применительно к той же задаче определения аэродинамических критериев, указывающих на возможное начало бафтинга стреловидного крыла магистрального пассажирского самолета, излагаются результаты измерений сил и пульсаций аэродинамических нагрузок, полученные при испытаниях крупномасштабной дренированной полумодели самолета в широком диапазоне углов атаки и при различных значениях числа Маха и числа Рейнольдса (также в АДТ-128).

При обработке результатов измерений рассматривались семь критериев начала бафтинга, четыре из которых основаны на анализе осредненных по времени данных для интегральных силовых характеристик или же для распределений давления по поверхности крыла, а три других устанавливаются посредством анализа данных об интенсивности и спектральному составу пульсаций давления на верхней поверхности крыла. В диссертации убедительно показано, что критерии, основанные на анализе пульсаций давления, приводят к оценкам допустимых значений  $\alpha_{баф}$ , примерно на  $1^\circ$  превосходящих оценки, полученные при анализе осредненных по времени величин/распределений (экспериментальных и расчетных). На общем уровне значений  $\alpha_{баф}$  в  $4-5^\circ$  этот результат свидетельствует о существенной «консервативности» оценок начала бафтинга, исходящих из решения задачи о стационарном трансзвуковом обтекании стреловидного крыла.

**Пятая глава** посвящена общей валидации численной методики, предлагаемой автором для количественной оценки аэродинамических критериев начала бафтинга. Приводятся результаты приложения методики для трех вариантов крыльев трансзвуковых самолетов, включая сопоставление с летным экспериментом. Дается также оценка влияния возникающих «ограничений по бафтингу» на достижимые летно-технические характеристики ближне- и средне-магистральных самолетов.

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

**Теоретическая значимость** работы Н.Н. Брагина заключается в обосновании целесообразности использования результатов расчетов, которые исходно проводятся в предположении стационарности трансзвукового обтекания стреловидных крыльев, для получения количественных оценок угла атаки и коэффициента подъемной силы, отвечающих началу проявления «скоростного» бафтинга. Автором установлено также удачное сочетание граничных и начальных условий для подлежащей решению системы уравнений вязко-невязкого взаимодействия, которое позволяет проводить в данном приближении самосогласованное численное моделирование обтекания аэродинамических поверхностей летательного аппарата.

**Практическая значимость** работы определяется тем, что результаты проведенных исследований могут быть использованы при проектировании различных компоновок пассажирских самолета со стреловидным крылом.

Материалы диссертации рекомендуется использовать специалистам Государственного научно-исследовательского института авиационных систем, Санкт-Петербургского государственного университета гражданской авиации, АО «Гражданские самолёты Сухого», ПАО «Авиационный комплекс им. С.В. Ильюшина» и другим организациям, занимающимся созданием авиационной техники и, в частности, вопросами безопасности полетов гражданской авиации. Представленные в работе результаты расчетно-экспериментального исследования трансзвукового обтекания стреловидных крыльев и моделей самолета могут представлять интерес для теоретических и экспериментальных групп Центрального аэрогидродинамического института имени профессора Н. Е. Жуковского, Научно-исследовательского института механики Московского государственного университета, Московского физико-технического института, Конструкторских Бюро авиационной промышленности и др.

**Степень обоснованности** научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации, находится на достаточном уровне, что обеспечивается использованием в работе признанных апробированных научных положений и методов исследования.

**Достоверность полученных результатов**, содержащихся в работе, обеспечена посредством последовательного сравнения расчетных и экспериментальных данных.

В качестве **замечаний** по диссертации можно отметить следующее.

1. Во Введении фактически отсутствует обзор представленных в литературе численных методов решения системы уравнений сжимаемого трехмерного пограничного слоя, а также методов решения уравнения, описывающего внешнее невязкое течение. Автор ссылается, в основном, на работы, непосредственно касающиеся тех составляющих вычислительного подхода, который реализован в использованной для проведения расчетов программе.

2. Из текста диссертации не удается уяснить, какую роль играл автор собственно в разработке созданной в ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского вычислительной «двухзонной» технологии расчета тразвуковых течений, помимо предлагаемого им сочетания специфических граничных и начальных условий для подлежащей решению системы уравнений вязко-невязкого взаимодействия.

3. При данном во Введении на стр.19 кратком освещении «Методологии и метода исследования» отмечается, что «Для математической постановки задач используются результаты линейной теории устойчивости, позволяющие определять характерные области и масштабы...». В тексте диссертации это положение никак не раскрывается.

4. Детально вопросы условностей, которые возникают при конкретной, «технологической» формулировке критерия начала бафтинга, основанного на анализе зависимости коэффициента подъемной силы от угла атаки, обсуждаются лишь в 4-й («экспериментальной») главе (стр.93), в то время как этот критерий уже широко используется автором при обработке результатов вычислений, представляемой во второй главе.

5. Данное во второй главе описание метода определения начала бафтинга по полученным расчетным данным для распределения коэффициента трения на поверхности крыла страдает нечеткостью. Кроме того, по данным, приведенным на рисунках 2.15, 2.16 и 2.18, 2.19, можно заключить, что этому методу присущ повышенный уровень погрешностей, обусловленных применением весьма «смелой» линейной экстраполяцией графика «целевой» функции по значениям  $C_{f,max}$ , полученным для относительно небольшого интервала изменения угла атаки.

6. В тексте отсутствуют пояснения, каким образом визуальные изображения, полученные методом баропокрытий и тепловизионным методом (глава 3), были обработаны с тем, чтобы определить «начало бафтинга». Если обработка данных, полученных методом баропокрытий, основывалась на анализе изменений коэффициента давления вблизи задней кромки крыла с ростом угла атаки (как и в случае Критерия 4, введенного в четвертой главе), то следовало бы это указать явно.

7. В таблице 1, приведенной на стр.87, экспериментальное значение «критического» угла атаки, полученное методом люминесцентных мини-шелковинок, почему-то сопоставляется с расчетным значением, найденным посредством анализа изменений в распределениях коэффициента трения с ростом угла атаки (метод 3 во

второй главе). Очевидно, что более последовательным было бы сопоставление указанного экспериментального значения с расчетной оценкой, полученной по методу 1, который основан на анализе топологии картины приповерхностных линий тока.

8. Ряд высказанных положений и заголовков параграфов сформулированы неудачно или неясно. Например, название параграфа 1.4 звучит весьма многообещающе: «Определение точности математического аппарата», хотя в этом параграфе приведены только результаты вычислений на последовательности сгущающихся сеток, т.е. в некоторой степени оцениваются лишь погрешности дискретизации, а вопросы оценки ошибок, которые исходно присущи приближенной «двухзонной» математической модели, лежащей в основе математического аппарата, не затрагиваются.

9. Есть замечания к оформлению работы. Например, на рисунках 1.6-1.7 отсутствует идентификация приведенных кривых; на ряде графиков не подписаны оси. Для одних и тех же величин используются разные обозначения, даже в пределах одной главы. Чтение работы значительно облегчило бы наличие списка обозначений.

Высказанные замечания относятся, главным образом, к представлению материала на страницах диссертации и не меняют общего положительного впечатления о выполненной Н.Н. Брагиным работе, которая представляет собой завершенное научное исследование, актуальное по тематике, целям и задачам, и содержит ряд новых научных результатов, имеющих также большое практическое значение.

По результатам исследований опубликовано 34 работы, в том числе 2 статьи в изданиях из Перечня, рекомендованного ВАК при Минобрнауки России и 8 работ в сборниках материалов конференций, издание которых отражено в базах данных Scopus и Web of Science. Результаты работы неоднократно обсуждались на научных семинарах, российских и международных конференциях. Автореферат диссертации достаточно полно отражает ее содержание и основные результаты.

**Заключение.** Содержание диссертации, научные положения и сформулированные выводы дают основание считать, что цель проведенного соискателем 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 (по отраслям исследования – Ламинарные и турбулентные течения (п.3 паспорта специальности), Аэродинамика и теплообмен летательных аппаратов (п.9 паспорта специальности), Пограничные слои, слои смещения, течения в следе (п.11 паспорта специальности)) и 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.

Отзыв рассмотрен и одобрен на семинаре научно-исследовательской лаборатории (НИЛ) гидроаэродинамики Института прикладной математики механики (ИПММ) Санкт-Петербургского политехнического университета Петра Великого (СПбПУ), состоявшемся 06 ноября 2019 года в СПбПУ (протокол №2 от 06.11.2019).

Заведующий НИЛ гидроаэродинамики ИПММ СПбПУ,  
кандидат физико-математических наук  
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы)



Иванов Николай Георгиевич

тел. +7 (812) 552-6621, email: ivanov\_ng@spbstu.ru

Гл. научный сотрудник НИЛ гидроаэродинамики ИПММ СПбПУ,  
профессор Высшей школы прикладной математики  
и вычислительной физики ИПММ СПбПУ,  
доктор физико-математических наук  
(01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы),  
профессор



Евгений Михайлович Смирнов

тел. +7 (812) 552-6621, email: smirnov\_em@spbstu.ru

18.11.2019 г.

**Сведения об организации:**

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого

195251, г. Санкт-Петербург, ул. Политехническая, 29.

+7 (800) 707-18-99; office@iamm.spbstu.ru; <http://www.spbstu.ru>