

УТВЕРЖДАЮ
Директор ФГБУН Институт теоретической и
прикладной механики им. С.А. Христиановича,
чл.-корр. РАН, д.ф.м.н.

А.Н. Шилок

14.10.2021



ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 4/1

на диссертацию Абрамовой Ксении Александровны

«УПРАВЛЕНИЕ ОБТЕКАНИЕМ ПРОФИЛЯ КРЫЛА С ПОМОЩЬЮ ВЫДУВА ТАНГЕНЦИАЛЬНОЙ СТРУИ ПРИ КОЛЕБАНИЯХ СКАЧКА УПЛОТНЕНИЯ»,
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9.– Механика жидкости газа и плазмы.

Диссертация К.А. Абрамовой посвящена **актуальной** теме улучшения аэродинамических характеристик несущих поверхностей трансзвуковых самолетов за счет активного управления трансзвуковым бафтингом. Наличие на борту летательного аппарата устройства подавления или затягивания возникновения трансзвукового бафтинга позволит существенно увеличить максимально допустимые углы атаки и числа Маха, при которых обеспечивается безопасный режим полета. Расширение этих границ может способствовать созданию более эффективных летательных аппаратов. В рамках диссертационного исследования рассматривалась задача подавления осцилляций скачка уплотнения и отрывной зоны на подветренной стороне крыла путем выдува тангенциальной струи. Преимуществом предлагаемого активного метода, в отличие от большинства пассивных методов управления потоком, является сохранение геометрии профиля крыла, что обеспечивает отсутствие дополнительного сопротивления на расчетных режимах полета. Важной особенностью подхода, использованного в

диссертационной работе, является применение оптимизационных алгоритмов для решения поставленной задачи. Как результат, в работе не только демонстрируется принципиальная возможность управления течением, но и приводятся наиболее оптимальные параметры тангенциального выдува для подавления трансзвукового бафтинга. Вышеизложенные факты свидетельствуют о том, что исследуемая тематика является важной и **актуальной задачей**.

Структура и содержание диссертации

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения. **Во введении** дан обзор литературы по теме диссертации, обоснована актуальность темы и цель исследования, ставятся задачи работы. **Первая глава** посвящена численному моделированию исследуемого течения в стационарной и нестационарной постановке. Рассмотрено влияние параметров тангенциальной струи на трансзвуковой бафтинг. Сделаны выводы о возможных механизмах воздействия струи на подавление осцилляций ударной волны и отрывной зоны. **Вторая глава** описывает экспериментальную часть работы, проведенной в аэродинамической трубе ЦАГИ Т-112. Проведен анализ полученных экспериментальных результатов. Выполнено сопоставление экспериментальных данных с расчетными. Проведено численное моделирование обтекания модели крыла в виртуальной аэродинамической трубе для учета особенностей экспериментальной установки. **В третьей главе** описываются используемые подходы при решении оптимизационной задачи. Демонстрируются результаты численного моделирования, полученные в ходе решения задачи оптимизации с разными целевыми функциями. **В заключении** приводятся основные выводы.

Положения, выносимые на защиту:

- Результаты численного моделирования обтекания профиля крыла и тангенциального выдува струи на верхнюю поверхность профиля крыла при различных геометрических параметрах сопла с различной интенсивностью на режимах с колебаниями скачка уплотнения;

- Результаты экспериментальных исследований, проведенных в аэродинамической трубе ЦАГИ Т-112, по подавлению колебаний скачка уплотнения с помощью выдува тангенциальной струи;
- Результаты оптимизации параметров тангенциального выдува струи для улучшения аэродинамических характеристик профиля крыла при различных целевых функциях.

Научная новизна и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций, сформулированных в диссертации

Научная новизна работы заключается в детальном исследовании эффекта тангенциальной струи на крупномасштабные колебания скачка уплотнения и отрывной зоны, формирующиеся при трансзвуковом обтекании профиля крыла. Впервые (на основе решения уравнений Рейнольдса) было проведено подробное численное моделирование предложенного метода управления, которое позволило определить механизмы воздействия тангенциального выдува на трансзвуковой бафтинг для различных параметров течения и струи: 1) выдув струи небольшой интенсивности в области отрыва, которая меняет течение в целом, смещает скачок вниз по потоку и устраняет колебания; 2) выдув очень слабой струи (меньшей, чем в первом случае) в области отрыва из-под скачка, которая разделяет область отрыва на две подобласти, почти не меняет течение в целом и при этом фиксирует положение скачка. Впервые продемонстрированы экспериментальные результаты, подтверждающие работоспособность предложенного метода подавления трансзвукового бафтинга. Кроме того, в работе впервые решается задача оптимизации параметров тангенциального выдува с целью улучшения течения около трансзвукового профиля на различных режимах, в том числе для режимов близких к возникновению бафтинга.

Достоверность результатов и выводов диссертации обусловлена использованием хорошо известных верифицированных численных методов и проведением экспериментов в аттестованной аэродинамической трубе классическими методами измерения параметров течения. Согласие расчетных и экспериментальных данных, полученное в диссертации, подтверждает достоверность полученных результатов.

Практическая ценность

Результаты, представленные в работе, могут быть использованы на предприятиях ОАК и ОДК, а также в таких организациях, как ЦАГИ, ЦИАМ, ИТПМ СО РАН и в учебном процессе на авиационных, физических и механико-математических факультетах университетов.

Замечания к работе

К работе имеются следующие вопросы и замечания:

1. В первой главе нет обоснований, почему именно модель турбулентности Спаларта-Альмараса была выбрана для проведения расчетов. Сравнение с моделью k-w SST было выполнено в главе 2, но только для стационарного расчета. Было бы интересно узнать о влиянии модели турбулентности на характер колебаний скачка уплотнений. Кроме того, в работе не приведены граничные условия для выбранной модели турбулентности. Какой уровень турбулентности использовался на входе в расчетную область? Оказывал ли он влияние на колебания скачка уплотнения?
2. В первой главе в расчетах с тангенциальным выдувом не учитывается ресивер и сопло. На выходе из сопла течение сразу принималось сверхзвуковым. В реальности, поскольку форма сопла имеет только сужающуюся часть, то стоит ожидать, что струя будет на выходе из сопла звуковой и недорасширенной, что, скорее всего, приведет к формированию сложной бочкообразной структуры на выходе из сопла. В результате эффект от воздействия струи может измениться. Были ли проведены расчеты с ресивером для режимов с выдувом струи? Как может измениться течение при учете эффекта недорасширенной струи?
3. Во второй главе на рисунке 2.3.3 хорошо видно наличие двух пиков пульсаций на режиме бафтинга: один приблизительно на частоте 100 Гц, другой на частоте 137 Гц. Наличие двух пиков так же можно найти и на спектрах пульсаций на рисунке 2.2.3. С чем это может быть связано? Кроме того, было бы полезно продемонстрировать осциллограммы измерения давления. Наблюдалось ли в эксперименте устойчивое периодическое изменение давления, как в расчете?
4. Из экспериментальных данных, демонстрируемых на рисунке 2.3.1г, хорошо видно, что уровень пульсаций в следе струи ($x/c=0.65$) сравним с пульсациями в

режиме бафтинга ($x/c=0.5$). Означает ли это, что колебания потока, создаваемые за счет нестационарности струйного течения, не менее опасны чем колебания скачка уплотнения?

5. В работе есть неточности в тексте и в представлении графических результатов, например: в диссертации нет списка сокращений, что затрудняет расшифровку некоторых сокращений (например СКО); на рисунке 1.8.4 нет расшифровки всех буквенных обозначений; на рисунке 2.2.1 и 2.2.3 перепутаны подписи к рисункам; на странице 94 экспериментальное число Маха приводится с точностью до 6 знака; создается впечатление, что текст и рисунки диссертации смещены от запланированного расположения, т.к. подписи к рисункам часто находятся на следующей странице.

Отметим, что указанные выше замечания не снижают научной значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

Заключение по диссертационной работе

Список публикаций по теме диссертации включает 24 наименования, из которых 6 входят в рекомендованный ВАК список публикаций. Автореферат диссертации полностью отражает ее содержание.

Данные, представленные в разделах диссертации, дополняют друг друга и дают целостную картину изучаемого явления. Суммируя все вышесказанное, можно заключить, что диссертация К.А. Абрамовой представляет собой законченное научное исследование, вносящее важный вклад в развитие механики жидкости и газа, содержит интересные и важные данные для теоретического и практического использования. Диссертация удовлетворяет требованиям пункта 9 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, а ее автор заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертация и отзыв были обсуждены и одобрены на научном семинаре «АЭРОГАЗОДИНАМИКА» ИТПМ СО РАН 23.09.2021.

Отзыв подготовили ведущий научный сотрудник лаборатории физических проблем управления газодинамическими течениями ИТПМ СО РАН, д.ф.-м.-н. Поплавская Татьяна Владимировна и главный научный сотрудник лаборатории волновых процессов в сверхзвуковых течениях ИТПМ СО РАН, д.ф.-м.-н. Косинов Александр Дмитриевич. Согласно на обработку персональных данных и включение их в аттестационное дело соискателя.

В.н.с. лаб. физических проблем управления
газодинамическими течениями ИТПМ СО РАН
доктор физико-математических наук
E-mail: popla@itam.nsc.ru
Тел. раб.: +7 (383) 330-85-28

Татьяна Владимировна Поплавская

Зав. лаб., г.н.с. лаб. волновых процессов
в сверхзвуковых течениях ИТПМ СО РАН
доктор физико-математических наук
E-mail: kosinov@itam.nsc.ru
Тел. раб.: +7 (383) 330-12-28

Александр Дмитриевич Косинов

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН.
Почтовый адрес: 630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, 41
Телефон: +7 (383) 330-42-68
E-mail: admin@itam.nsc.ru
<http://itam.nsc.ru/>



Подписи Т.В. Поплавской и А.Д. Косинова заверяю
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН, к.ф.-м.н.

Ю.В. Кратова