

Ученому секретарю
диссертационного совета 31.1.006.01
при ФАУ «ЦАГИ им. проф. Н.Е.Жуковского»
доктору физико-математических наук
Брутяну М.А.

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

доктора физико-математических наук, профессора Знаменской Ирины Александровны на диссертационную работу Волкова Луки Сергеевича «Интенсификация смешения поперечной струи с высокоскоростным потоком воздуха с помощью электрических разрядов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Диссертационная работа посвящена актуальной задаче интенсификации перемешивания газов в условиях высокоскоростных потоков с помощью искровых разрядов.

Актуальность работы обусловлена тем, что перемешивание топлива и окислителя является неотъемлемой частью работы камер сгорания со сверхзвуковым потоком. Интенсификация перемешивания считается одной из ключевых задач для оптимизации работы этих устройств. Это подтверждается большим количеством научных работ, посвященных тематике перемешивания, которые были опубликованы в научной литературе за последние десятилетия. Работы, посвященные перемешиванию газов в высокоскоростных потоках с помощью плазменных актуаторов, остаются немногочисленными.

Диссертация состоит из введения, 4 глав, заключения и списка литературы. Полный объем диссертации – 133 страницы. В тексте имеется 68 рисунков и 5 таблиц. Список источников содержит 109 работ.

Во введении указаны актуальность и степень разработанности темы, сформулированы цель и задачи работы, методы исследования, новизна, обоснованы достоверность и практическая значимость результатов.

Первая глава является обзором литературы. В обзоре описаны некоторые количественные критерии, которые используются для определения эффективности перемешивания веществ в высокоскоростных потоках. Упомянут «классический» частный случай поперечной струи в сверхзвуковом потоке воздуха, который в дальнейшем используется для проверки численной модели. Систематизирована информация о частотах периодических процессов в течениях с поперечной струей в сверхзвуковом потоке при различных параметрах струи и потока, а также о частотах периодических воздействий на струю при использовании «активных» способов перемешивания в работах других исследователей. Также приведены некоторые исторические сведения о плазменной

аэродинамике. Прочитированы работы, в которых исследованы процессы, происходящие после искрового разряда в газах.

Вторая глава посвящена постановке расчетной задачи и выбору численной модели. Вниманию уделено проверке выбранной модели. Проверка проводилась путем сравнения результатов моделирования с результатами из работ других исследователей. Также проведена проверка сеточной сходимости и независимости решения от шага по времени. Проведено сравнение результатов расчетов, выполненных двумя методами (URANS и LES).

В третьей главе проанализированы результаты численного моделирования поперечной газовой струи в сверхзвуковом потоке воздуха в присутствии искровых разрядов на передней кромке инжектора. Описан механизм интенсификации вихреобразования в сдвиговом слое с наветренной стороны струи после искрового разряда. Исследована зависимость эффективности перемешивания от частоты и энергии разрядов. Показано, что она монотонно зависит от энергии разрядов и немонотонно зависит от частоты разрядов (в рамках рассмотренного диапазона параметров задачи). Проведено сравнение нескольких независимых количественных критериев эффективности перемешивания. Показано, что разряды с наветренной стороны от инжектора способствуют лучшему перемешиванию, по сравнению со случаями без разрядов и с разрядами на кромке инжектора с подветренной стороны.

В четвертой главе описаны экспериментальные исследования поперечной газовой струи в сверхзвуковом потоке в присутствии искровых разрядов. Приведено описание экспериментальной установки и диагностического комплекса. Проанализированы полученные в эксперименте высокоскоростные теневые видеозаписи течения. По этим видеозаписям построены периодограммы, выполнен анализ видеозаписей методом спектрального ортогонального разложения. Показано, что результаты экспериментов согласуются с результатами численного моделирования.

В заключении представлены основные выводы по результатам диссертационной работы.

Новизна работы состоит в исследовании оригинального способа интенсификации перемешивания сверхзвукового потока с поперечной струей. Предложенный способ предполагает воздействие искровых разрядов на газовую среду в отрывной зоне с наветренной стороны инжектора струи. В тексте диссертации раскрыт физический механизм влияния разрядов на течение. Исследована зависимость эффективности перемешивания от частоты и энергии разрядов, а также проведено сравнение нескольких независимых критериев эффективности перемешивания.

Теоретическую значимость имеет рассмотренный в диссертационной работе механизм интенсификации вихреобразования и перемешивания газов после искрового разряда в конфигурации течения с поперечной струей в сверхзвуковом потоке. Также теоретическую значимость имеет исследованная зависимость эффективности перемешивания от частоты и энергии разрядов.

Практическая значимость работы обусловлена тем, что результаты работы вносят вклад в фундаментальный задел для развития технологий камер сгорания и других

энергетических установок. Также практическую значимость имеет исследованная взаимосвязь между несколькими критериями перемешивания, некоторые из которых удобны и общеприняты при анализе данных численного моделирования, а другие – потенциально применимы при анализе экспериментальных данных.

Диссертационная работа Волкова Л.С. представляет собой самостоятельное, цельное и завершенное научное исследование.

Полученные автором и изложенные в диссертации результаты являются новыми, а выводы – обоснованными. Достоверность полученных автором результатов подтверждается воспроизводимостью и хорошим согласием экспериментальных данных и результатов численного моделирования. В свою очередь, достоверность результатов моделирования подтверждается сеточной сходимостью решения, сходимостью по временному шагу. Достоверность моделирования также подтверждается сопоставлением результатов моделирования стандартного частного случая поперечной струи в сверхзвуковом потоке с данными из литературы, полученными другими независимыми исследователями.

По диссертации имеются следующие замечания:

- 1) На странице 88 в описании оптической схемы рис. 2 сказано: “Инфракрасное излучение, исходящее от точечного источника ... попадает на собирающую линзу ... пройдя через тестовую секцию аэродинамической трубы ...” и т.д. Означает ли это, что вся теневая регистрация каким-то очень сложным способом велась в инфракрасном диапазоне? “Подробная схема оптической диагностики на ИАДТ-50 приведена в статье (так в диссертации) [72].” Но в данной статье упоминается “лазерный луч” как источник в теневой схеме.
- 2) В диссертации нет указаний или предположений относительно того, каков характер пограничного слоя профиля в месте инъекции, (ламинарный он или турбулентный). Судя по рис. 4.5, на нижней стороне пластины – турбулентный, на верхней – ламинарный.
- 3) Различие между значениями энергии разряда, определенной двумя методами, (от 10 до 20 мДж и $24,0 \pm 1,2$ мДж) может быть объяснено тем, что реальная область энерговклада меньше области засветки, на которую ориентировался автор. Учет этого обстоятельства даст большие значения энерговклада.

Приведенные недостатки не являются принципиальными при общей оценке работы. В целом диссертация выполнена на высоком научном уровне. Основные результаты диссертации опубликованы в 4 научных статьях в журналах, рекомендованных ВАК. Результаты докладывались автором на 15 научных конференциях. Результаты могут быть использованы в ряде организаций: ЦАГИ им. Н.Е. Жуковского, МГУ им. М.В. Ломоносова, ИТПМ им. С.А. Христиановича, и др. Автореферат в полной степени отражает наиболее существенные положения и выводы диссертации.

Диссертационная работа Волкова Луки Сергеевича удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и соответствует требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013 в действующей редакции), а Волков Л.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент,

профессор Физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова, д.ф.-м.н.,

профессор Знаменская Ирина Александровна.

Декан Физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова,
профессор Белокуров В.В.



Адрес: 119991, Москва, ГСП-1, Ленинские горы, д. 1, стр. 2.
тел. (495) 939-44-28, e-mail: znamensk@phys.msu.ru

Профессор Физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова,
д.ф.-м.н., профессор
И.А. Знаменская

« 09 » июня 2026 г.

Подпись проф. Знаменской И.А. заверяю
Ученый секретарь Физического ф-та МГУ
Профессор Стремоухов С.Ю.

ОТЗЫВ

официального оппонента, кандидата физико-математических наук
Борисова Виталия Евгеньевича
на диссертационную работу Волкова Луки Сергеевича «Интенсификация смешения поперечной струи с высокоскоростным потоком воздуха с помощью электрических разрядов», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы

Рецензируемая диссертационная работа направлена на решение научно-технической проблемы, состоящей в необходимости разработки новых способов ускоренного перемешивания веществ в условиях высокоскоростных течений. Плазменные актуаторы представляются эффективным средством для перемешивания затопленных струй со сверхзвуковым потоком, однако экспериментальные работы в данной области остаются немногочисленными. Численное моделирование новых способов перемешивания позволяет оптимизировать работу двигательных установок и повышает степень понимания физических механизмов, благодаря которым осуществляется кинематическое перемешивание, что необходимо для создания новых энергетических систем для аэрокосмической отрасли.

1. Актуальность темы диссертации

Актуальность исследования связана с фундаментальной научной проблемой разработки новых эффективных способов перемешивания топлива с окислителем в высокоскоростном потоке для дальнейшего воспламенения. Перемешивание веществ в сверхзвуковом потоке существенно зависит от ряда физических процессов и их взаимодействия, в частности, молекулярной диффузии и кинематического перемешивания. В работе предложен и исследован способ перемешивания на основе плазменного актуатора с искровыми разрядами, который позволяет осуществлять импульсное локальное энерговыделение в ограниченной области пространства за счет джоулева тепла. Проведено параметрическое исследование влияния данного актуатора на эффективность перемешивания газов в зависимости от частоты и энергии разрядов, продемонстрирована адекватность применения выбранного метода численного моделирования к рассматриваемому классу течений с поперечной струей в сверхзвуковом потоке.

Работа соответствует паспорту специальности 1.1.9 – в частности, следующим пунктам: «течение сжимаемых сред и ударные волны», «гидродинамическая устойчивость», «экспериментальные методы исследования динамических процессов в жидкостях и газах». Поставленная в работе цель соответствует одному из приоритетных направлений научно-технологического развития РФ в части «занятия и удержания лидерских позиций <...> в освоении и использовании космического и воздушного пространства».

На основе сказанного можно заключить, что тема диссертационной работы является актуальной как с теоретической, так и с практической точек зрения.

2. Анализ содержания диссертационной работы

Диссертационная работа имеет классическую структуру, изложена на 133 страницах, состоит из введения, 4 глав, заключения, списка литературы (109 наим.), включает 68 рисунков и 5 таблиц. Каждая глава диссертации раскрывает определенный этап проведенного исследования, все главы объединены общим предметом диссертационной работы.

Во Введении продемонстрированы актуальность и степень разработанности темы, поставлены цели и задачи работы. Приведены положения, выносимые на защиту. Отмечены выступления на конференциях по теме диссертации и опубликованные статьи. Показано, что тематика исследования соответствует паспорту специальности 1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы.

Первая глава посвящена обзору литературы. В разделах главы представлены некоторые известные способы интенсификации перемешивания газов в сверхзвуковом потоке, применяемые критерии эффективности перемешивания, описана задача поперечной инжекции околосзвуковой струи газа в сверхзвуковой поток воздуха, приведены доступные сведения о развитии плазменной аэродинамики и применении плазменных актуаторов. Систематизирована информация из ряда статей, посвященных поперечной струе в сверхзвуковом потоке, и, в частности, применению активных способов перемешивания.

Во второй главе автор описывает использованную вычислительную модель. Основная часть расчетов проводилась методом осредненных по Рейнольдсу и Фавру уравнений Навье–Стокса (URANS) в российском коммерческом пакете для междисциплинарного моделирования FlowVision. В главе изложены результаты валидационных и верификационных расчетов, включающих в себя моделирование широко распространенного и всесторонне изученного частного случая поперечной струи в сверхзвуковом потоке, исследование сеточной сходимости и сходимости по временному шагу. Также приведены результаты отдельных расчетов, выполненных методом крупных вихрей (LES), которые демонстрируют приемлемое сходство с результатами расчетов методом URANS.

В третьей главе приведены результаты исследований по установлению механизмов развития поперечных вихрей в условиях импульсного энерговыделения за счет искровых разрядов. С использованием численного моделирования определены основные стадии развития вихрей в отсутствии и в присутствии разрядов; опробовано несколько независимых критериев перемешивания, рассчитанных на основе одних и тех же данных. Проведено сравнение мгновенных и осредненных значений этих критериев. Исследована зависимость эффективности перемешивания от частоты разрядов (при неизменной энергии), от энергии (при неизменной частоте), а также от частоты и энергии при неизменной средней мощности энерговыделения (т.е. при постоянном произведении частоты и энергии разрядов).

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию поперечной струи в сверхзвуковом потоке под воздействием вышеупомянутого плазменного актуатора. Внимание уделено в основном исследованию частоты и размера поперечных вихрей. При этом в эксперименте не определяется эффективность перемешивания. Подтверждено существование ряда рассмотренных в прошлой главе стадий механизма развития вихрей

после искрового разряда. Обнаружено явление стабилизации формирования вихрей при работе плазменного актуатора. В конце главы приведено качественное сравнение результатов расчетов с экспериментальными данными.

В заключении обобщаются основные результаты работы.

Работа хорошо структурирована. Последовательность изложения материала создает целостное представление об этапах исследования и личном вкладе соискателя. Распределение материала по главам выглядит соразмерным. Работа содержит подробный обзор литературы по теме исследования, обоснованную научную постановку, практическую и теоретическую ценность.

Список литературы оформлен в соответствии с требованиями ГОСТ и показывает, что автор хорошо осведомлен об исследованиях по тематике диссертации. Автореферат отвечает основному содержанию диссертации, дает правильное представление о полученных в процессе выполнения работы результатах.

3. Научная новизна исследования

Новизна диссертационной работы определяется результатами параметрического исследования рассмотренной стратегии перемешивания, в ходе которого была изучена эффективность перемешивания в условиях изменения двух независимых параметров, определяющих режим энерговыделения. Также впервые выполнен сравнительный анализ различных критериев перемешивания на основе единого массива данных, сформированного при исследовании «активной» стратегии перемешивания. Продemonстрировано, что обработка высокоскоростных теневого видеозаписей исследованного течения позволяет получить значимую информацию о частотах периодических и квазипериодических процессов.

4. Значимость полученных результатов

Теоретическая значимость работы состоит в подробном рассмотрении механизма интенсификации вихреобразования после импульсного энерговыделения в течении, образованном сверхзвуковым потоком и поперечно инжектируемой в него газовой струи. Также теоретическую значимость имеет информация об обнаруженной немонотонной зависимости эффективности перемешивания от частоты разрядов.

Практическая значимость работы заключается в том, что исследование нового способа перемешивания веществ в высокоскоростных потоках вносит вклад в задел для оптимизации энергетических установок, в которых осуществляется горение в условиях сверхзвукового потока.

5. Обоснованность и достоверность научных результатов

Достоверность полученных результатов обеспечивается строгостью и обоснованностью используемого математического аппарата и подтверждена сравнением полученных результатов моделирования с известными данными. Результаты исследования представлены в рецензируемых изданиях, в том числе входящих в Перечень ВАК РФ, а также докладывались на международных конференциях.

6. Замечания по диссертационной работе

1. Для численных расчетов в работе использовались значения турбулентных чисел Прандтля и Шмидта, равные единице. Однако известно, что экспериментальные оценки для воздушной смеси дают величины порядка 0.85–0.9 и 0.7–0.9, соответственно. Следовало кратко обосновать такой выбор параметров для вычислительной модели.
2. В качестве газа струи в работе используется углекислый газ. Было бы полезным уделить внимание вопросу о том насколько применимы сделанные выводы для случая горючих газов, поскольку наибольший практический интерес представляет перемешивание воздуха и горючего топлива.
3. При проведении валидационных расчетов и оценке сеточной сходимости было бы полезным привести численные оценки ошибки, что более наглядно продемонстрировало бы точность результатов.
4. В работе большое внимание уделено анализу результатов расчетов в поперечных сечениях (плоскости вида $X/D=\text{const}$). При этом сами расчетные данные практически не визуализированы, что затрудняет восприятие описываемых результатов.
5. При проведении LES расчетов использовалась классическая модель Смагоринского для подсеточной вязкости, известная в такой постановке своим некорректным поведением у стенок. Для исправления ее недостатков существует несколько вариантов модификаций, включая демпфирующие функции, адаптивный сеточный масштаб и т.д. Их использование, вероятно, повысило бы точность расчетов, проведенных в работе. Кроме того, вызывает вопросы метод калибровки константы Смагоринского, а также отсутствие описания способа задания турбулентных пульсаций в течении для его перехода в LES режим.

Данные замечания носят рекомендательный характер и не влияют на общую положительную оценку диссертационной работы.

7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о присуждении ученых степеней

Диссертация Волкова Луки Сергеевича «Интенсификация смешения поперечной струи с высокоскоростным потоком воздуха с помощью электрических разрядов» является самостоятельной законченной научно-исследовательской работой, посвященной решению актуальной задачи и выполненной на высоком научном уровне. По объему полученных данных, новизне поставленных и решенных задач, научному и практическому значению полученных результатов, диссертационная работа Волкова Луки Сергеевича полностью соответствует требованиям «Положения о присуждении учёных степеней» (утверждено Постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени кандидата наук, а её автор, Волков Лука Сергеевич, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.1.9. – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Официальный оппонент,
кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник Федерального государственного учреждения «Федеральный исследовательский центр Институт прикладной математики им. М.В.Келдыша Российской академии наук» (ИПМ им. М.В. Келдыша РАН)



Борисов Виталий Евгеньевич

« 05 » июня 2026 г.

Контактные данные:

тел.: +7 (499) 220-79-24, эл. почта: borisov@keldysh.ru

Адрес места работы:

Россия, 125047, г. Москва, Миусская пл., д. 4, ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
тел.: +7 (499) 978-13-14, факс: +7 (499) 972-07-37, эл. почта: office@keldysh.ru

Подпись Борисова Виталия Евгеньевича заверяю

Ученый секретарь
ИПМ им. М.В. Келдыша РАН,
к.ф.-м.н.



Давыдов А.А.