

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)»

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Объединенный институт высоких температур Российской академии наук

На правах рукописи

Волков Лука Сергеевич

**Интенсификация смещения поперечной струи с высокоскоростным потоком
воздуха с помощью электрических разрядов**

Специальность 1.1.9. –

«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:

к.ф.-м.н. Фирсов А.А.

Москва – 2026

Работа выполнена в рамках обучения в аспирантуре Московского физико-технического института (национального исследовательского университета) в Физтех-школе физики и исследований им. Ландау.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенном институте высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель: **Фирсов Александр Александрович**,
кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник, заместитель
заведующего лабораторией 21.3 ОИВТ РАН.

Официальные оппоненты: ...

Ведущая организация: ...

Защита диссертации состоится _____ на заседании
диссертационного совета...

С диссертацией можно ознакомиться...

Автореферат разослан «__» _____ 2026 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Для множества устройств, в которых осуществляется горение топлива, перемешивание топлива с окислителем является одной из ключевых функций и важной задачей для оптимизации при разработке таких устройств. Это относится к широкому кругу устройств: к горелкам, автомобильным двигателям внутреннего сгорания, двигателям космических ракет. К этому списку также относятся перспективные прямоточные воздушно-реактивные двигатели, в том числе со сверхзвуковым потоком на входе. Организация эффективного перемешивания для этих устройств является критически важной задачей ввиду низкого времени пребывания элементарного объема топливно-воздушной смеси в камере сгорания. И поэтому одним из ключевых направлений исследований в мировой науке, связанных с разработкой научных основ вышеупомянутых устройств, является задача интенсификации смешения топлива и окислителя (воздуха) [1]. Исследования смешения, воспламенения и поддержания горения топлива в условиях сверхзвукового потока проводятся в ряде государств (Россия, Китай, США, Австралия, Франция) и носят как фундаментальный, так и прикладной характер.

Объект исследования – нестационарное газодинамическое течение, образованное взаимодействием сверхзвукового потока воздуха вдоль стенки и вторичной струи газа, инжектируемой в этот поток через отверстие на стенке, в присутствии периодических искровых разрядов в отрывной зоне перед инжектором. Это одна из стандартных конфигураций течения, на примере которых исследуются способы интенсификации перемешивания газов в условиях сверхзвукового потока [2].

Степень разработанности темы

Проработанность проблематики перемешивания веществ в высокоскоростных потоках имеет неоднородный характер. Некоторые отдельные направления в рамках оптимизации смешения являются тщательно и всесторонне исследованными, в то время как другие потенциально перспективные направления исследованы недостаточно.

Так, в последние несколько десятилетий были всесторонне исследованы так называемые «пассивные» стратегии перемешивания. Они предусматривают внедрение механических элементов в сверхзвуковой тракт с целью внесения определенных возмущений в поток. Среди исследованных вариантов выделяются, например, каверны разнообразной формы, обеспечивающие рециркуляцию или изменяющие структуру вихрей в зоне перед инжектором, или пилоны и вихрегенераторы, частично экранирующие вторичную струю.

Другие, «активные» стратегии перемешивания, исследованы в гораздо меньшей степени. В этих стратегиях предусмотрен ввод энергии в область перемешивания: например, путем модуляции расхода струи, возбуждения неустойчивости с помощью искровых разрядов или других плазменных образований. Фундаментальные исследования в данной области остаются немногочисленными ввиду сложности проведения экспериментов. По теме интенсификации перемешивания газов в высокоскоростных потоках посредством искровых разрядов известен ряд работ коллектива из Китая [3,4], а также отдельные прошлые наработки сотрудников коллектива из ОИВТ РАН [5,6]. Другой близкой работой можно считать [7], где исследовалось перемешивание сверхзвукового потока с вторичной струей при воздействии лазерных импульсов, сфокусированных в отверстии инжектора струи.

Цель работы – выявление закономерностей отклика поперечной струи в сверхзвуковом потоке на периодические искровые разряды, локализованные на плоскости инъекции, в отрывной зоне с наветренной стороны от инжектора. Эта цель включает в себя исследование структуры течения в присутствии разрядов, а также выявление зависимости эффективности перемешивания от энергии и частоты разрядов. В рамках диссертационной работы для достижения поставленной цели были сформулированы и выполнены следующие **задачи**:

- Провести анализ литературы, посвященной исследованию активных стратегий перемешивания сверхзвукового потока с поперечной струей; собрать информацию о частотах воздействия на исследуемое течение при применении этих стратегий.
- Провести численное компьютерное моделирование вторичной газовой струи в сверхзвуковом потоке воздуха в отсутствие разрядов и в присутствии искровых разрядов с наветренной стороны от инжектора.
- Составить подробное описание физических механизмов возбуждения неустойчивости струи и генерации крупных возмущений при воздействии искровых разрядов на исследуемое течение.
- По данным численного моделирования определить эффективность перемешивания в зависимости от частоты и энергии разрядов, найти оптимальные частоты.
- Провести натурные эксперименты по возбуждению вторичной струи газа в сверхзвуковом потоке воздуха периодическими искровыми разрядами.
- На основе экспериментальных данных определить частоты основных процессов в данном течении при отсутствии разрядов и в присутствии разрядов с разной частотой.

Научная новизна

Некоторые российские и зарубежные работы, посвященные интенсификации перемешивания газов за счет искрового разряда, были перечислены выше. На основании анализа литературы в настоящей работе было принято решение перенести точку воздействия разрядом на струю ближе к инжектору и использовать искру с малым межэлектродным расстоянием. Также было установлено, что механизм развития неустойчивости струи в отсутствие внешнего возбуждения описан не полностью. Поэтому в данной работе место выделения энергии (т.е. разрядный промежуток) было расположено в «ближней зоне» исследуемого течения: выше по потоку от инжектора в отрывной зоне. А именно, на расстоянии одного диаметра инжектора от центра инжектора (в экспериментах) или непосредственно на кромке инжектора (в основных компьютерных расчетах). Была исследована структура течения и его эволюция в отсутствие разрядов и с разрядами.

В настоящей диссертационной работе был описан цикл естественных осцилляций струи в сверхзвуковом потоке в отсутствие разрядов, а также было впервые проведено комплексное исследование влияния частоты и энергии разрядов на процесс перемешивания сверхзвукового потока со вторичной струей при нескольких значениях коэффициента динамического напора струи. При этом был целенаправленно исследован сравнительно небольшой диапазон частот, в котором, согласно проведенному анализу литературы, ожидался максимальный эффект от воздействия плазменного актуатора. Стоит заметить, что некоторые работы других авторов, посвященные активным стратегиям перемешивания, включали в себя параметрические исследования с варьированием частоты активного воздействия на струю с целью поиска оптимума по тем или иным критериям. Самый яркий пример из известных соискателю – статья [8], в которой для возбуждения струи (путем задания пульсации расхода) были опробованы 5 частот в широком диапазоне от 5 до 200 кГц. Подобные работы, посвященные возбуждению струи искровыми разрядами, соискателю не известны.

Впервые одни и те же расчетные данные (полученные при моделировании поперечной струи в сверхзвуковом потоке) были проанализированы с позиции нескольких независимых критериев перемешивания.

Научная и практическая значимость

Исследование механизмов развития неустойчивости струи при воздействии искровых разрядов, проведенное в рамках диссертационной работы, представляет интерес для фундаментальной науки, поскольку в научной литературе практически не уделяется внимание физическим механизмам распространения возмущений от искровых разрядов в исследуемой конфигурации течения и роли этих физических механизмов в интенсификации кинематического перемешивания

газов. Исследование этих механизмов потенциально позволит оптимизировать разработку новых способов интенсификации смешения газов в сверхзвуковых потоках.

Проведено комплексное параметрическое исследование зависимости эффективности смешения от частоты и энергии искрового разряда. Это параметрическое исследование, являющееся частью диссертационной работы, может иметь значимость для будущих научных работ по теме активного перемешивания газов искровыми разрядами, поскольку дает новую информацию о характере зависимости эффективности смешения от нескольких независимых параметров.

Ожидается, что результаты, полученные в данной работе, способны внести вклад в реализацию приоритетов научно-технологического развития РФ в части «занятия и удержания лидерских позиций <...> в освоении и использовании космического и воздушного пространства», поскольку создают фундаментальный задел для развития технологий камер сгорания и других энергетических установок.

Методология и методы исследования

В работе использовался комплексный подход, включающий эксперимент и численное моделирование.

Экспериментальные исследования проводились в сверхзвуковой аэродинамической трубе ИАДТ-50 ОИВТ РАН. Были задействованы цифровые методы визуализации и анализа нестационарных газодинамических процессов. Диагностический комплекс включал в себя теньевую систему с лазерной подсветкой и высокоскоростной видеокамерой, электронный газовый расходомер и шунт для определения энергии искровых разрядов.

Моделирование выполнялось, в основном, методом нестационарных осредненных уравнений Навье-Стокса (URANS), решаемых методом конечных объемов, а также методом моделирования крупных вихрей (LES) в российском CFD-комплексе тяжелого класса FlowVision 3.14.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Течение, которое формируется при инъекции вторичной околозвуковой поперечной струи в сверхзвуковой поток через отверстие на плоской стенке, реагирует на искровые разряды, локализованные на стенке в отрывной зоне с наветренной стороны от отверстия инжектора, следующим образом: во-первых, искровые разряды способны инициировать формирование крупных возмущений с наветренной стороны от отверстия струи; во-вторых, периодические искровые разряды приводят к тому, что возмущения на границе струи синхронизируются с

разрядами. В зависимости от частоты разрядов, характерная частота возмущений на границе струи становится равной частоте разрядов или кратной этой частоте. В-третьих, наличие разрядов увеличивает среднюю интегральную глубину проникновения струи и влияет на интегральную эффективность смешения.

2. Механизм интенсификации смешения искровыми разрядами состоит из следующих основных этапов. На первом этапе после разряда размер отрывной зоны существенно увеличивается (в ~ 2 раза), что способствует проникновению струи в поток за счет частичной блокировки потока отрывной зоной. Затем, направление градиентов давления в распадающейся тепловой каверне разряда способствует проникновению вещества струи внутрь отрывной зоны. Также, ударная волна от очередного разряда проходит изгиб границы струи, создавая на этой границе условия для развития неустойчивости конвективного типа. Указанные процессы приводят к увеличению векторного произведения градиентов плотности и давления в области перед инжектором, и, следовательно, к росту поперечной компоненты вектора завихренности, что в свою очередь приводит к улучшению кинематического перемешивания за счет интенсификации формирования поперечных вихрей.

3. Коэффициент эффективности смешения вторичной струи с поперечным сверхзвуковым потоком немонотонно зависит от частоты разрядов при постоянном среднем энергокладе (т.е. при постоянном произведении частоты разряда и энергии одного разряда). Для значений коэффициента динамического напора J в диапазоне от 0,7 до 1,3 существуют локальные максимумы эффективности смешения. Один из этих локальных максимумов наблюдается на частоте, равной характерной частоте рождения крупных поперечных вихрей на передней границе струи. Для этой частоты число Струхала, рассчитанное по диаметру отверстия инжектора и скорости свободного сверхзвукового потока, составляет 0,24. Для $J = 0,7$ наблюдается еще один максимум эффективности смешения на низких частотах разряда, $Sr \sim 0,06$.

Достоверность полученных 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 проведенной верификацией: сопоставлением результатов моделирования стандартного частного случая поперечной струи в сверхзвуковом потоке с данными из литературы, полученными другими независимыми исследователями.

Соответствие паспорту специальности

Круг вопросов, рассматриваемых в диссертации, соответствует паспорту специальности 1.1.9 Механика жидкости, газа и плазмы, в частности следующим пунктам:

- 5 – «Течения сжимаемых сред и ударные волны»
- 14 – «Гидродинамическая устойчивость»
- 18 – «Экспериментальные методы исследования динамических процессов в жидкостях и газах»

Апробация работы

Результаты работы докладывались соискателем лично на 15 научных конференциях российского и международного уровня:

XLVII Академические чтения по космонавтике (г. Москва, 2023), 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Москва, 2023), XXII Международное Собрание по магнитоплазменной аэродинамике (г. Москва, 2023), Физика низкотемпературной плазмы – ФНТП-2023 (г. Казань, 2023), XLVIII Академические чтения по космонавтике (г. Москва, 2024), XXV Международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости» – НеЗаТеГиУс (г. Звенигород, 2024), 51-я Международная звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу (г. Звенигород, 2024), XXIII Международное Собрание по Магнитоплазменной Аэродинамике (г. Москва, 2024), 66-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Москва, 2024), 52 Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС (г. Звенигород, 2025), XXXV научно-техническая конференция по аэродинамике (пос. Володарского Московской области, 2025), II Российская молодежная научная конференция «Новые горизонты прикладной математики» (г. Москва, 2025), 67-я Всероссийская научная конференция МФТИ (г. Москва, 2025), XXIV Международное Собрание по магнитоплазменной аэродинамике (г. Москва, 2025), I Академические чтения по космонавтике (г. Москва, 2026).

Дополнительно, доклады по теме диссертации были представлены соавторами соискателя на следующих конференциях:

XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (г. Санкт-Петербург, 2023), The 3rd International Conference on High-Speed Vehicle Science and Technology (г. Пусан, Южная Корея, 2024), XI International conference "Plasma Physics and Plasma Technology" (г. Минск, Беларусь, 2025).

Публикации

По материалам диссертации было опубликовано 4 [A1-A4] статьи в рецензируемых научных журналах, индексируемых в RSCI, Scopus, WoS.

Личный вклад автора

Все представленные экспериментальные данные и результаты численного моделирования по теме смещения поперечной газовой струи со сверхзвуковым потоком получены соискателем лично при научном руководстве А.А. Фирсова, либо с определяющим участием соискателя в постановке задач и анализе результатов. Результаты исследований опубликованы в журналах: Компьютерные исследования и моделирование, Теплофизика высоких температур, Письма в журнал технической физики и International Journal of Thermal Sciences.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, четырех глав основной части, заключения и списка литературы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** дана общая характеристика работы, обоснована актуальность исследования, сформулированы цели и задачи, изложена научная новизна представленной работы, приведены выносимые на защиту положения.

В **первой главе** сделан обзор литературы по теме диссертации. Сделано обобщение информации об известных методах перемешивания веществ, сформулировано предположение о возможной эффективности искровых разрядов для перемешивания газов в высокоскоростных потоках. Обозначены условные рамки для поиска оптимальных частот разрядов. Представлены некоторые известные количественные критерии перемешивания.

В **разделе 1.1** сформулирована задача интенсификации перемешивания газов в высокоскоростных потоках. Перечислены некоторые способы («стратегии») интенсификации перемешивания, которые были исследованы в последние годы. Приведен краткий обзор статей, в которых освещены эти исследования.

В **разделе 1.2** описаны критерии, которые используются для определения качества перемешивания веществ в условиях высокоскоростных потоков. В настоящее время для результатов, полученных методом численного моделирования, как правило, используется интегральный критерий эффективности перемешивания:

$$\eta_m(\rho, U, W) = \frac{\int W_r \rho U dA}{\int W \rho U dA}, \quad W_r = \min \left\{ W, W_{st} \frac{1-W}{1-W_{st}} \right\} \quad (1)$$

Интегралы берутся по некоторой плоскости, перпендикулярной потоку, W – массовая доля газа струи, U – продольная компонента скорости, ρ – плотность, W_{st} – массовая доля газа струи в стехиометрической смеси или произвольное предпочтительное значение массовой доли газа струи в смеси. Так, $\eta_m = 0$ означает отсутствие перемешивания, а $\eta_m = 1$ означает отсутствие областей с богатой топливно-воздушной смесью (что, впрочем, не исключает наличия областей с бедной смесью). В [9] показано, что в случае горения η_m коррелирует с коэффициентом сгорания топлива. В [10] отмечено, что важно подставлять в (1) мгновенные величины, а не осредненные, поскольку скорость горения определяется мгновенной концентрацией веществ в каждой точке. Однако в экспериментах η_m не применяется, поскольку он требует измерения скорости, плотности и химического состава смеси в большом количестве точек. В работах, посвященных струям в сверхзвуковом и дозвуковом потоке, можно встретить косвенные способы количественного описания перемешивания. Например, в [11] измеряется площадь поперечного сечения засеянной струи, подсвеченной лазерным ножом. Таким же способом в [12,13] визуализирована и представлена в явном виде на рисунках граница струи в заданных плоскостях, что делает возможным нахождение длины этой границы. В работе [14] методом планарной лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) исследовано мгновенное распределение концентрации вещества струи, построены поля и профили концентрации. В настоящее время остается малоизученной связь между интегральным критерием (1) и более простыми критериями, применимыми в экспериментах.

В разделе 1.3 приводится описание течения, которое является объектом исследования в настоящей работе. Это околосвуковая струя, поперечно инжектируемая в сверхзвуковой поток воздуха через круглое отверстие на плоской стенке. Кратко излагается история исследования этого течения. На основании информации из современных работ раскрывается структура течения. Некоторые структурные элементы этого течения изображены на рисунке 1.



Рисунок 1 – Некоторые структурные элементы исследуемого течения

Приводится частный случай постановки задачи поперечной инжекции газовой струи в сверхзвуковой поток с определенными заданными наборами параметров потока и струи. Этот частный («эталонный») случай примечателен тем, что по нему накоплен большой объем экспериментальных и расчетных данных, полученных разными независимыми исследователями с помощью нескольких разных экспериментальных и расчетных методов.

В разделе 1.4 приводится обзор статей, информация из которых может быть полезной при выборе частоты внешнего воздействия на поперечную струю в сверхзвуковом потоке. Рассматривается две группы работ. В первой группе – те работы, в которых исследуются нестационарные характеристики течения с поперечной струей в сверхзвуковом потоке, без применения активных методов перемешивания. Для таких работ анализировались характерные частоты наблюдаемых периодических или квазипериодических процессов в области смешения струи с потоком. Во второй группе – работы, содержащие конкретные примеры применения или тестирования активных стратегий перемешивания в указанной конфигурации течения. В эту группу вошли статьи про пульсирующие струи (т.е. струи с переменным расходом) и про струи в присутствии импульсно-периодического выделения энергии посредством электрических разрядов или лазерного излучения. Для удобства анализа информация о частотах периодических процессов была систематизирована: частоты периодических процессов выражены в безразмерном виде как число Струхалия, рассчитанное по диаметру инжектора и по скорости потока Sh_∞ (или, где это возможно, по скорости газа в струе). Некоторые необходимые для этого значения параметров течения (например, скорость сверхзвукового потока) рассчитывались косвенно, по общеизвестным формулам газодинамики, если они не были в явном виде приведены в той или иной статье. Во многих работах характерные частоты лежат в диапазоне $Sh_\infty = 0,2-0,3$. Однако при исследовании активных стратегий перемешивания иногда рассматриваются и меньшие частоты воздействия на струю ($Sh_\infty \sim 0,1$).

В разделе 1.5 кратко изложены некоторые этапы развития плазменной аэродинамики. Упомянуты некоторые работы, в которых показана возможность управления структурой дозвуковых и сверхзвуковых течений с помощью плазменных актуаторов. Обозначены преимущества плазменных актуаторов. Перечислены некоторые типы разрядов, используемых в задачах интенсификации смешения и горения.

В разделе 1.6 приведены описанные в литературе газодинамические процессы, происходящие после искрового разряда в воздухе. Выделены три стадии развития течения после разряда. В условиях сверхзвукового потока существенное влияние на перемешивание газов может оказывать только первая стадия: быстрое увеличение объема порции вещества, нагретой разрядом (так называемой «тепловой каверны»), сопровождающееся появлением расходящейся ударной волны. Течение на этой стадии развивается аналогично задаче о сильном взрыве.

Вторая глава посвящена постановке расчетной задачи и выбору численных моделей. Материалы данной главы изложены в статьях [A1, A2].

В разделе 2.1 дается описание расчетной области, в которой было выполнено моделирование (рисунок 2) и граничных условий.

В большинстве представленных в диссертации расчетов сверхзвуковой тракт моделировался как прямоугольный параллелепипед с заданными значениями параметров сверхзвукового потока воздуха на входе и свободным граничным условием на выходе. К нижней поверхности этого параллелепипеда примыкал цилиндр ($D = 3$ мм), который служил в качестве инжектора вторичной струи. За начало координат принимался центр отверстия инжектора. Ввиду симметрии задачи, для экономии ресурсов рассматривалось только полупространство $Z > 0$. На нижней грани параллелепипеда и на боковой поверхности инжектора устанавливалось граничное условие (ГУ) типа «стенка» с пристеночными функциями. На остальных поверхностях был задан нулевой градиент всех физических величин в направлении нормали к поверхности («симметричное» ГУ). Размер расчетной области был достаточно большим, чтобы эти поверхности не оказывали какого-либо влияния на исследуемое течение.

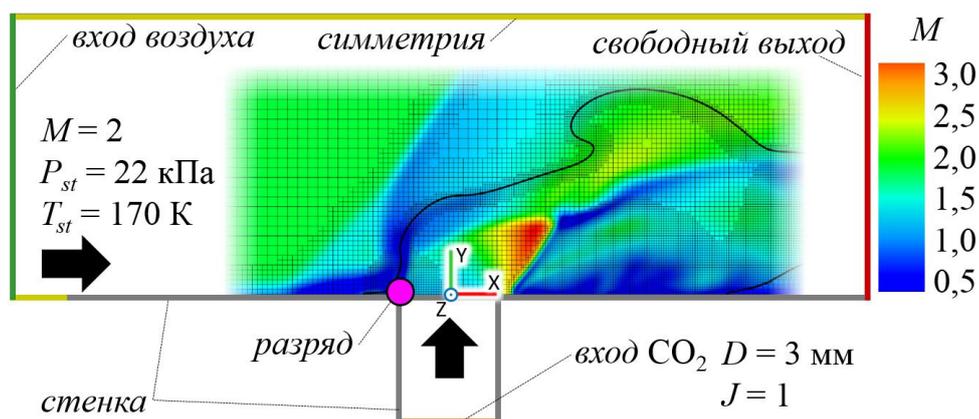


Рисунок 2 – Схематичное изображение расчетной области, расстановка граничных условий и пример расчетной сетки с адаптациями, на фоне распределения числа Маха. Указаны типичные значения параметров потока и струи. Черная линия – изолиния 50% массовой доли CO_2

Значения основных физических параметров численной модели выбирались близкими к тем значениям, которые было возможным достичь в эксперименте (см. Главу 4). Число Маха в свободном сверхзвуковом потоке задавалось от 1,7 до 2,2. При $M = 2$ статическая температура потока составляла 170 К, а статическое давление 22 кПа. Коэффициент динамического напора струи и потока составлял в разных расчетах от 0,6 до 1,6, а полная температура газа струи составляла около 300 К. В качестве газа вторичной струи был выбран углекислый газ (CO_2), при обычных условиях не реагирующий с воздухом. Это было сделано для того, чтобы исключить химический аспект моделируемого явления и, соответственно, избежать усложнения расчетной задачи. Благодаря такому подходу было исследовано влияние разряда только на процесс перемешивания, вне связи с процессами горения.

В разделе 2.2 приведена информация об используемых численных моделях. Выписаны основные уравнения, указаны методы их решения, описаны свойства веществ.

Большая часть расчетов была проведена методом нестационарных уравнений Навье-Стокса, осредненных по Фавру (URANS). Уравнения решались методом конечных объемов с использованием схемы второго порядка аппроксимации. Система уравнений была замкнута модифицированной моделью турбулентности $k-\varepsilon$ – KEFV [15] с пристеночными функциями, выбранными на основании параметра Y^+ для использованной расчетной сетки. Вычисления проводились в российском программном комплексе FlowVision на многоядерных и многопроцессорных системах ОИВТ РАН, включая суперкомпьютер Фишер.

Искровой разряд моделировался как объемный источник тепла (добавочный член с объемным тепловыделением в УНС), локализованный в некоторой области.

В большинстве расчетов, за некоторыми оговоренными исключениями, предполагалось, что искровой разряд располагается на кромке отверстия инжектора (рисунок 2). Область тепловыделения представляла собой цилиндр со скругленными торцами длиной 2,2 мм и диаметром 0,8 мм.

Для расчетов использовалась прямоугольная неравномерная сетка (рисунок 2). В областях с большим градиентом давления или концентрации газа струи применялась многоуровневая динамическая адаптация: на каждом уровне адаптации расчетная ячейка делилась пополам по каждому измерению, в результате чего получалось 8 ячеек. Размер ячеек в области около отверстия и в зонах адаптации составлял около 75 мкм (40 ячеек на диаметр инжектора). Шаг по времени при действии модификатора импульсного нагрева составлял около 30 нс, а в остальное время повышался до 100 нс, что соответствует числу Куранта-Фридрихса-Леви ~ 2 . Благодаря применению динамических адаптаций количество ячеек составляло от 1 до 1,5 млн. Для завершения всех переходных процессов требовалось порядка нескольких тысяч шагов. Типичный расчет на 64 ядрах суперкомпьютера Фишер занимал 7 суток.

В разделе 2.3 излагается проведенная проверка (тестирование) выбранной численной модели. Проверка включала следующие основные этапы.

На первом этапе была отобрана информация из литературы об одном стандартном частном случае течения с поперечной струей в сверхзвуковом потоке. Этот «эталонный» частный случай был подробно исследован несколькими независимыми научными группами с помощью экспериментальных и расчетно-теоретических методов. Статьи, посвященные данному частному случаю, перечислены в обзоре литературы в Главе 1. Данный частный случай был воспроизведен с помощью выбранной компьютерной модели. Были построены профили осредненной скорости на нескольких осях: эти профили сравнивались с аналогичными профилями из литературы. Была показана сеточная сходимость этих профилей и их хорошее согласие с данными из литературы.

На следующем этапе с помощью этой же численной модели был воспроизведен другой случай инъекции поперечной струи в сверхзвуковой поток, однако в этот раз все параметры струи и потока были выбраны в том диапазоне, в котором предполагалось дальнейшее численное и экспериментальное исследование. Для этого случая была также продемонстрирована сеточная сходимость и независимость решения от шага по времени: для профилей скорости, и для осредненных значений интегрального критерия эффективности перемешивания (1). В данном исследовании независимость этого критерия от сетки и от шага по времени очень важна, поскольку именно на основании этого критерия в дальнейшем были сделаны выводы о качестве перемешивания в различных рассмотренных случаях.

Последний этап проверки численной модели заключался в сопоставлении численного решения поставленной задачи с данными, полученными в натурном эксперименте. Поэтому подробности об этом этапе проверки вынесены в Главу 4, посвященную экспериментам. Здесь стоит отметить, что результаты расчетов хорошо согласовывались с экспериментальными данными.

Дополнительно было проведено моделирование исследуемого течения методом LES с подсеточной моделью Смагоринского. Параметры течения были взяты из диапазона, исследованного с помощью URANS. Результаты расчета методами LES и URANS находились в хорошем согласии друг с другом. Однако LES-расчеты исследуемого течения оказались весьма ресурсоемкими. Поэтому, для дальнейших исследований был выбран метод URANS как приемлемый, с учетом положительного прохождения всех вышеупомянутых проверок.

Третья глава посвящена анализу результатов численного моделирования. Материалы этой главы изложены в статьях [A1, A2, A3].

В **разделе 3.1** рассмотрена структура течения в отсутствии разрядов (рисунок 3) и частота периодических процессов в этом течении. На основании расчетных данных показано: при некотором диапазоне параметров задачи (указан далее) наблюдается периодическое формирование крупных возмущений в виде поперечных вихрей. На основании теории размерностей показано, что частота формирования этих возмущений в данной задаче (обозначенная как «естественная» частота струи) может зависеть от 3 параметров: это число Маха в сверхзвуковом потоке M , коэффициент динамического напора струи и потока J , число Рейнольдса Re (в данной работе рассчитанное по диаметру инжектора и скорости газа в инжекторе). Структура течения струи остается неизменной в диапазоне параметров: M от 1,7 до 2,2; Re от $7 \cdot 10^4$ до $1,4 \cdot 10^5$, J от 0,8 до 1,6. «Естественная» частота, выраженная в безразмерных единицах через скорость потока v_∞ и диаметр инжектора D как $Sh_\infty = f \cdot D / v_\infty$, также остается неизменной в пределах обозначенного диапазона параметров: $Sh_\infty = 0,24 \pm 0,01$. Это значение согласуется с данными из литературы, обобщенными в разделе 1.4. При малых значениях $J \sim 0,6$ формирование крупных вихрей оказалось слабо выраженным. Данное предварительное исследование позволило предположить, что эффекты от исследуемого в дальнейшем активного воздействия на струю проявляются схожим образом в данном диапазоне (или, возможно, даже в более широком диапазоне).

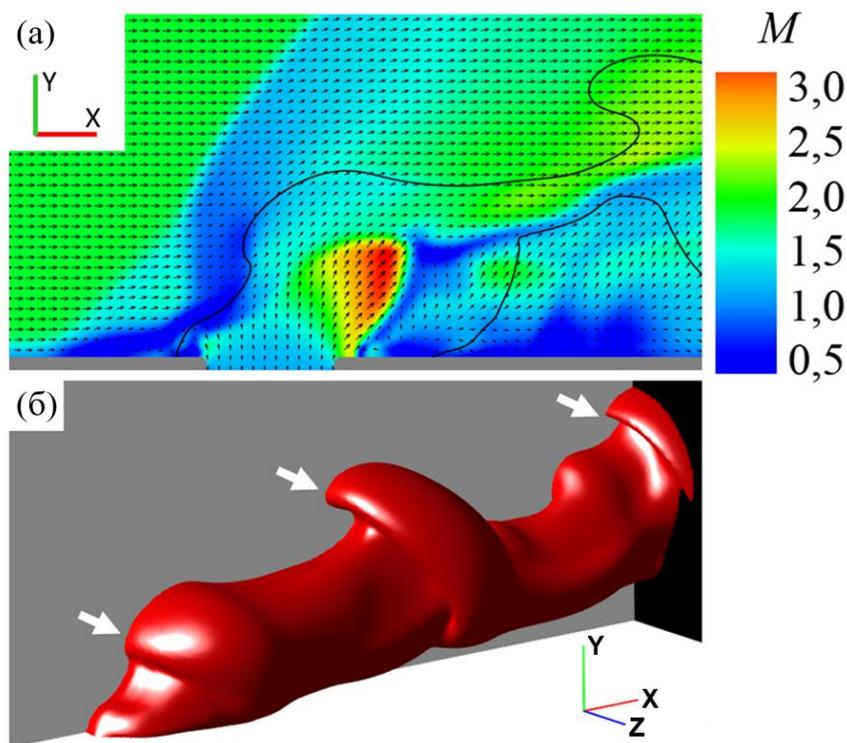


Рисунок 3 – Общий вид структуры течения при отсутствии разрядов. $J = 1$, $M_\infty = 2$. Поле числа Маха, изолиния $W=0,5$ и векторы скорости для одного произвольного момента времени (а). Трехмерное изображение изоповерхности $W=0,5$ (б). Стрелками отмечены поперечные вихри

В разделе 3.2 продолжено исследование структуры течения в отсутствии разрядов. На конкретном примере течения с $M = 2$ и $J = 1$ описан механизм возникновения поперечных вихрей в струе, состоящий из трех основных циклически сменяющихся стадий. Показано, что в области взаимодействия струи с потоком периодически возникают области с неколлинеарными градиентами давления и плотности, что, в соответствии с уравнением вихря, приводит к увеличению завихренности и интенсификации формирования поперечных вихрей.

В разделе 3.3 исследованы физические процессы, которые инициируются искровым разрядом на кромке инжектора. Аналогично случаю искрового разряда в неподвижном потоке, рассмотренном в обзоре литературы, после импульсного энерговыделения в разряде образуется ударная волна и расширяющаяся тепловая каверна (рисунок 4), что может приводить к качественным изменениям структуры течения и частоты периодических процессов в нем.

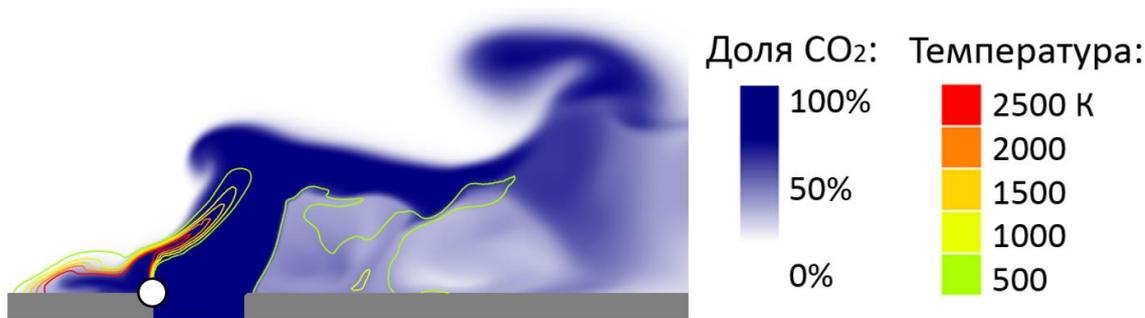


Рисунок 4 – Распределение газа струи и температуры в плоскости $Z = 0$ спустя 8 мкс после начала очередного разряда. Белой точкой отмечено положение разрядного промежутка. $M = 2$, $J = 1$. Энергия разряда 25 мДж

При малых значениях $J \sim 0,6$ разряды способствуют формированию крупных возмущений в сдвиговом слое на границе струи, которые наблюдаются в отсутствие разрядов. При $J = 1$ и $1,3$ в случае течения с разрядами формирование поперечных вихрей синхронизируется с разрядами. Происходит «захват частоты»: под воздействием разрядов подавляются периодические процессы на «естественной» частоте струи, и развиваются процессы на частоте, определяемой частотой разряда.

Выделены и подробно описаны три основных процесса, которые составляют физический механизм ускорения кинематического перемешивания струи с потоком при воздействии периодических искровых разрядов за счет интенсификации вихреобразования (рисунок 5). Первый процесс – периодическое изменение размера отрывной зоны в результате эволюции тепловой каверны разряда. Воздействие этого периодического процесса на исследуемое течение можно описать как периодическое частичное экранирование струи от набегающего сверхзвукового потока за счет расширенной отрывной зоны, что позволяет струе проникнуть глубже в поток. Второй процесс – возбуждение конвективной неустойчивости при прохождении ударной волны от разряда через границу вторичной струи, то есть через границу областей с разными плотностями. Третий физический процесс, активирующийся при наличии разрядов – это заброс вещества струи в отрывную зону. В течение короткого времени порция вещества струи движется вдоль стенки против направления сверхзвукового потока при распаде тепловой каверны разряда.

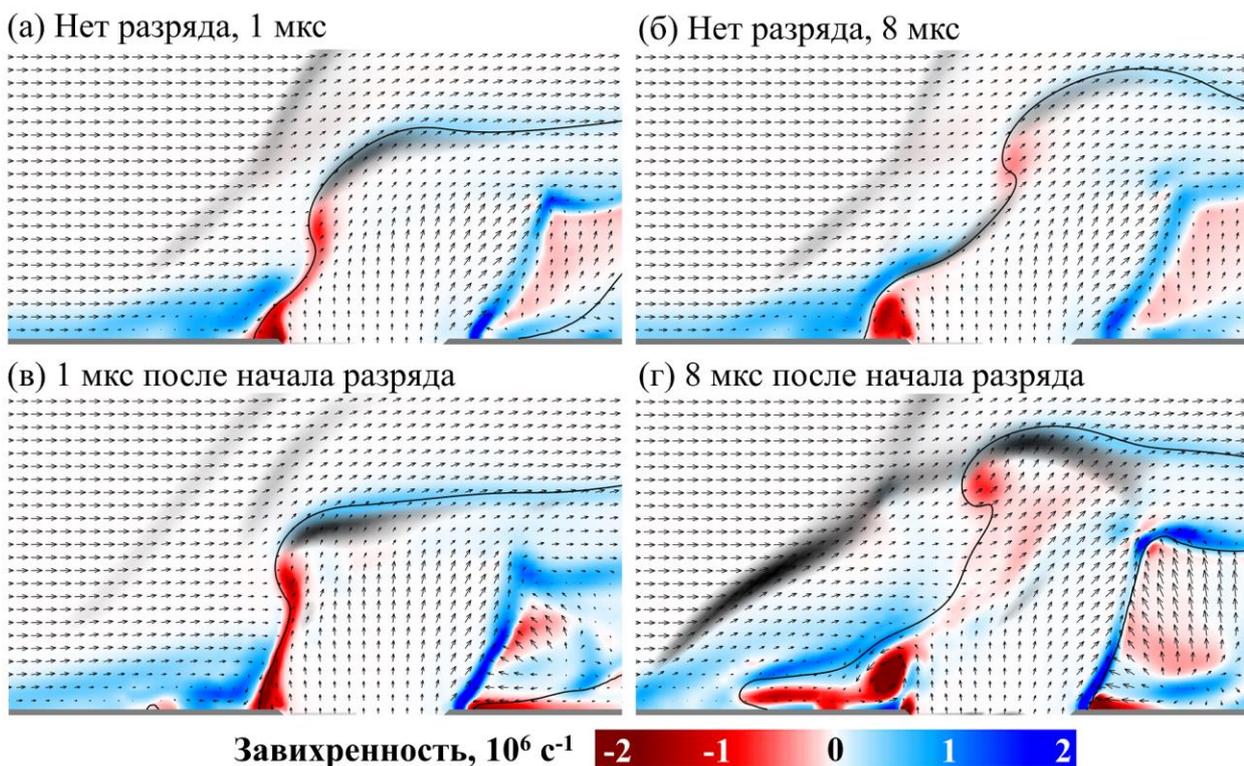


Рисунок 5 – Z-компонента вектора завихренности в плоскости симметрии в два момента времени. $J = 1$. Случай без разрядов (а, б) и с разрядами на частоте $Sh_{\infty} = 0,24$ (в, г). Стрелки – поле скоростей. Черная линия – изолиния $W = 0,5$. Черная заливка – численный шпирен для визуализации скачков уплотнения

Этот физический механизм приводит к увеличению векторного произведения градиентов давления и плотности, и, согласно уравнению вихря, способствует росту завихренности в области формирования поперечных вихрей на передней границе струи.

В разделе 3.4 проводится сравнение четырех независимых критериев перемешивания на конкретных примерах нестационарных данных, полученных при моделировании поперечной струи в сверхзвуковом потоке в присутствии искровых разрядов ($M = 2, J = 1$). Проведено параметрическое исследование: энергия, выделяемая в каждом разряде, была задана постоянной, а частота разрядов варьировалась: $Sh_{\infty} = 0,06-0,3$.

Первым рассчитанным критерием был η_m (1) в определенной плоскости, перпендикулярной потоку, $X/D = 5$. Вторым критерием была длина L условной границы струи, то есть изолиния постоянной массовой доли газа струи ($W = \text{const}$) в этой же плоскости. Еще одним критерием была площадь S , ограниченная этой изолинией в указанной плоскости. Последним критерием была максимальная массовая концентрация вещества струи c_{max} в той же плоскости $X/D = 5$. Три последних критерия примечательны тем, что в работах других исследователей уже публиковались экспериментальные данные, позволяющие воспользоваться этими критериями. Поэтому с точки зрения анализа эффективности перемешивания в

экспериментах эти критерии являются существенно более реалистичными по сравнению с η_m .

Для того, чтобы определить связь критериев между собой, было проведено их сравнение двумя способами: сначала сравнивались значения критериев как функций от времени для одного набора нестационарных данных. Затем сравнивались средние значения критериев, рассчитанных по нескольким наборам данных. Между мгновенными значениями критериев не была обнаружена сильная корреляция (рисунок 6).

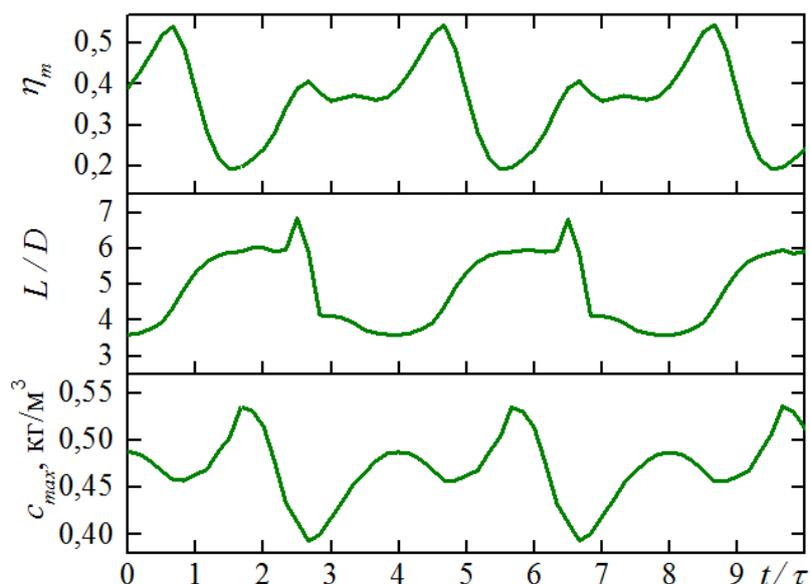


Рисунок 6 – Графики критериев перемешивания в плоскости $X/D = 5$ для случая без разрядов

Было исследовано изменение этих критериев во время прохождения поперечных вихрей через заданную плоскость, в которой рассчитывались эти критерии, благодаря чему показана связь между поперечными вихрями и эффективностью перемешивания. Показано, что осредненные значения критериев согласуются друг с другом (кроме критерия, основанного на площади сечения струи). Это означает, что критерии указывают на существование «оптимального» диапазона частот вблизи $Sh_\infty = 0,24$: при частоте разрядов из этого диапазона эффективность перемешивания достигает максимума сразу по нескольким независимым критериям.

В завершении раздела также отмечено, что интегральная глубина проникновения струи в поток также достигает максимума при оптимальной частоте разрядов около $Sh_\infty = 0,24$, и при любой из рассмотренных частот разрядов глубина проникновения струи существенно увеличивается по сравнению со случаем без разрядов: от 22 до 45%.

В разделе 3.5 продолжено параметрическое исследование зависимости эффективности перемешивания от параметров периодических разрядов.

Варьировалась энергия и частота разрядов при нескольких значениях коэффициента динамического напора струи и потока J . В этом разделе использовался только один критерий перемешивания – осредненное значение η_m .

В первой серии расчетов (рисунок 7) варьировалась частота и энергия разрядов, причем произведение энергии и частоты (средняя мощность) поддерживалось постоянным. Благодаря этому была получена информация о том, какой режим энергоснабжения в разрядах позволяет достичь наилучшего перемешивания. Было обнаружено, что для $J = 1$ и $1,3$ оптимальный диапазон частоты разрядов находится вблизи $Sh_\infty = 0,24$, так же, как и в предыдущем разделе. Для $J = 0,7$ был обнаружен еще один оптимальный диапазон вблизи частоты $Sh_\infty = 0,06$. С помощью визуализации мгновенных расчетных данных было дано качественное объяснение найденным оптимальным частотам.

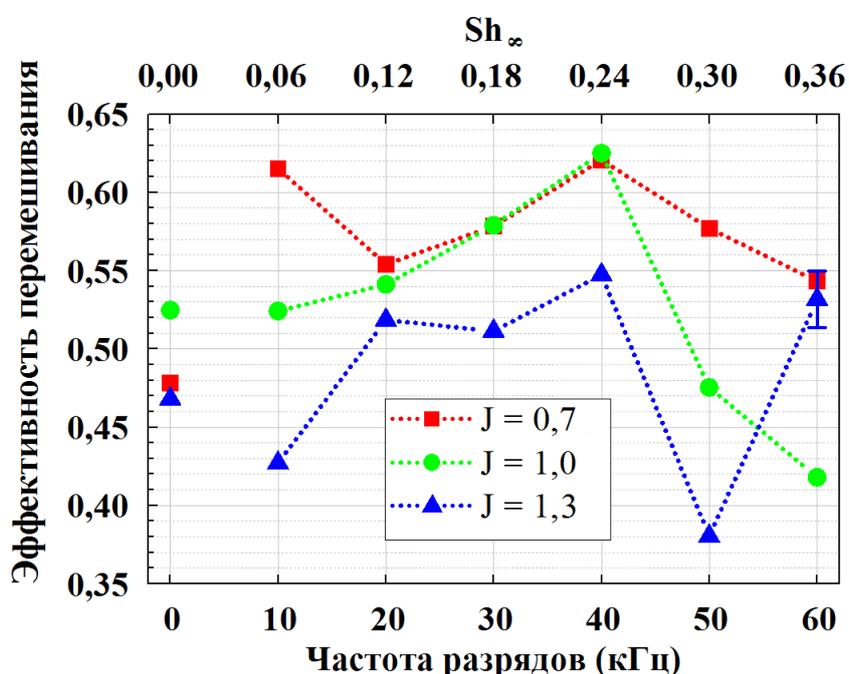


Рисунок 7 – Зависимость $\langle \eta_m \rangle$ от частоты импульсного энергоснабжения при неизменной средней мощности. Точки соединены для удобства восприятия

Во второй серии расчетов варьировалась энергия разрядов при неизменной частоте. Для $J = 0,7$ это была частота $Sh_\infty = 0,06$, а для $J = 1,3$ – соответственно $Sh_\infty = 0,24$. Показано, что зависимость эффективности перемешивания от энергии является монотонной.

Таким образом, исследованы два фактора, которые могут влиять на эффективность перемешивания: энергия разряда и частота разрядов. Показано, что зависимость $\langle \eta_m \rangle$ от частоты разрядов оказывается немонотонной, а от энергии – монотонной (в рамках рассмотренных значений параметров задачи).

В разделе 3.6 кратко представлены дополнительные расчеты, в которых разряд располагался не на передней кромке инжектора, а в других локациях: чуть

выше по потоку на расстоянии $1D$ от центра инжектора или на задней кромке инжектора (то есть с подветренной стороны от инжектора). Отмечено, что перемещение разряда с передней кромки инжектора чуть выше по потоку, в отрывную зону течения, качественно не влияет на развитие исследованного механизма перемешивания. Это наблюдение важно, поскольку в экспериментах, освещенных в Главе 4, разрядный промежуток располагался не на кромке инжектора, а немного выше по потоку, в отрывной зоне. Что же касается разрядов, расположенных на задней кромке инжектора, то было обнаружено, что они практически не воздействуют на область формирования поперечных вихрей, и поэтому способствуют перемешиванию в гораздо меньшей степени по сравнению с рассмотренными ранее конфигурациями. Следовательно, расположение разрядов в отрывной зоне с наветренной стороны от инжектора является более выгодным для интенсификации перемешивания, по сравнению с разрядами на подветренной стороне от инжектора.

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию течения в области инъекции поперечной струи в сверхзвуковой поток, в том числе в присутствии искровых разрядов в отрывной зоне. Большая часть материалов этой главы изложена в статье [А4].

В разделе 4.1 дано описание экспериментальной установки и диагностического комплекса. Эксперименты были проведены в тестовой секции импульсной аэродинамической трубы ИАДТ-50 на число Маха $M = 2$. В тестовой секции размещалась пластина с острой передней кромкой, которая разрезала ядро сверхзвукового потока. Исследуемое течение воспроизводилось на верхней поверхности этой пластины (рисунок 8). К отверстию в этой поверхности подводилась трубка для подачи газа CO_2 . Искровые разряды создавались между двумя электродами, расположенными заподлицо с поверхностью с наветренной стороны от отверстия инжектора. Основным методом диагностики была высокоскоростная теневая видеосъемка (по методу Теплера) со скоростью 160 тыс. кадров в секунду. Также в разделе изложены использованные методы определения количества энергии, затраченной на искровой разряд, и количества энергии, вложенной разрядом в газовую среду.

В разделе 4.2 показан общий вид теневых изображений течения без разрядов (при различных значениях J) и в некоторые моменты времени после разрядов (рисунок 9). Проведен анализ теневых видеозаписей с помощью периодограмм. В кадре видеозаписей были выбраны несколько областей, и от яркости пикселей в этих областях была взята периодограмма (оконное преобразование Фурье). При малых значениях $J \sim 0,6$ в отсутствие разрядов не наблюдаются ярко выраженные периодические пульсации или возмущения, это проявляется в практически полном отсутствии спектральной плотности мощности на частотах диапазона 10-80 кГц ($Sr_\infty = 0,06 \dots 0,48$).

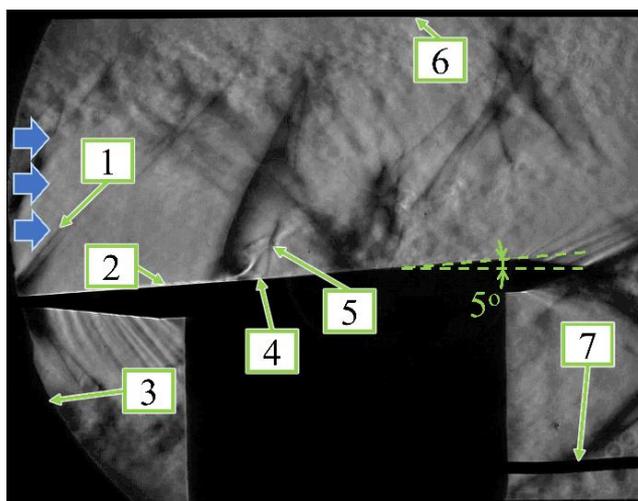


Рисунок 8 – Обтекание пластины: теньевая фотография. Направление свободного сверхзвукового потока обозначено синими стрелками. Цифрами обозначены: 1 – слабый скачок уплотнения от передней кромки пластины, 2 – плоскость инъекции с тонким пограничным слоем, 3 – круглый край смотрового окна тестовой секции, 4 – место инъекции вторичной струи, 5 – диск Маха, 6 – стенка канала с толстым пограничным слоем, 7 – один из проводов питания разряда

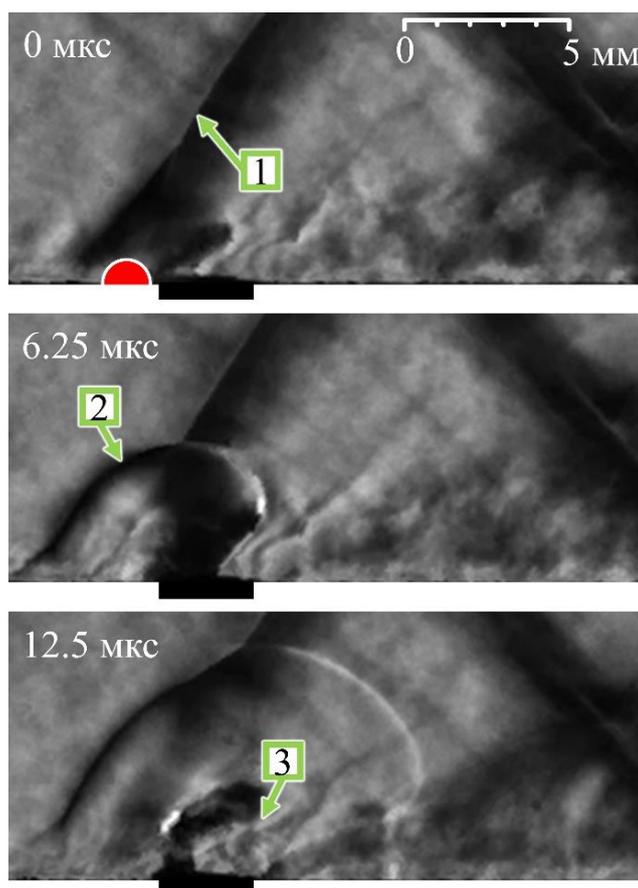


Рисунок 9 – Теньевая видеозапись ударной волны, расходящейся от искрового разряда. $J = 0,6$. Красным полукругом обозначено место разряда. 1 – головной скачок уплотнения, 2 – фронт ударной волны, 3 – формирующееся возмущение в потоке. Время отсчитывается от начала очередного разряда

Разряды вызывают конвективную неустойчивость, приводят к формированию возмущений. На периодограммах это проявляется как пики с частотами, кратными частоте разрядов, причем набор частот оказывается разным в нескольких участках течения. При сравнительно больших $J \sim 1,3$, даже в отсутствии разрядов, на периодограммах наблюдаются пики, соответствующие периодическим процессам, в том числе процессу формирования крупных поперечных вихрей на границе струи. Периодические разряды приводят к тому, что частоты этих процессов смещаются и становятся кратными частоте разрядов. Таким образом, эксперимент подтверждает, что в зависимости от J разряды способствуют формированию крупных поперечных вихрей или влияют на частоту этих вихрей.

В разделе 4.3 описана более сложная математическая процедура – спектральное собственное ортогональное разложение (SPOD). По руководству из статьи [16] данная процедура была применена к высокоскоростным теневым видеозаписям течения с несколькими наборами параметров. Рассчитаны SPOD-моды и их «энергетические спектры», в которых моды с наибольшей «энергией» характеризуются наибольшей амплитудой пульсаций яркости в отдельных областях теневой видеозаписи.

Обнаружено, что SPOD-спектр течения с $J \sim 1,3$ характеризуется широким пиком около характерной частоты формирования поперечных вихрей в сдвиговом слое на наветренной стороне струи. При наличии разрядов во всем течении развиваются пульсации на частотах, кратных частоте разрядов, и подавляются пульсации на других частотах (рисунок 10). Наибольшей «энергией» при этом обладают моды, частота которых попадает в область первоначального широкого пика, который имеет место в случаях без разрядов. Это означает, что частота формирования поперечных вихрей стабилизируется и синхронизируется с разрядами.

Визуализация SPOD-мод позволяет установить местоположение областей с пульсациями на той или иной частоте: например, пульсацию головного скачка уплотнения и λ -скачка на частоте разрядов, или рождение поперечных вихрей с частотой, кратной частоте разрядов и близкой к $Sr_\infty = 0,24$ (рисунок 11).

В разделе 4.4 экспериментальные данные сравниваются с результатами численного моделирования. Показано, что экспериментальные данные хорошо согласуются с численной моделью, использовавшейся в предыдущих главах. Именно, модель позволила корректно рассчитать размеры, местоположение и частоту осцилляции для некоторых основных структурных элементов исследуемого течения, а также корректно описать распространение ударной волны от разряда в неоднородной среде.

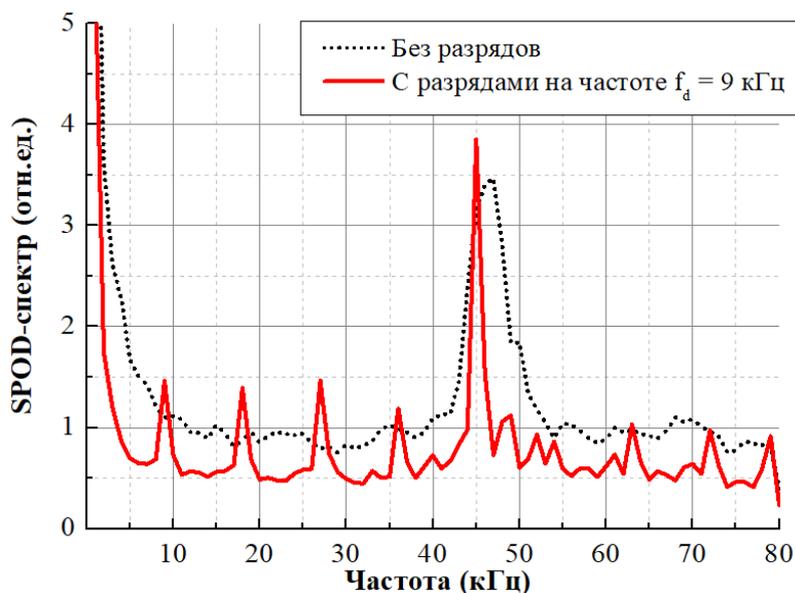


Рисунок 10 – SPOD-спектры для случая без разрядов и с разрядами на частоте 9 кГц. Течение с $J = 1,3$, $M = 1,9$

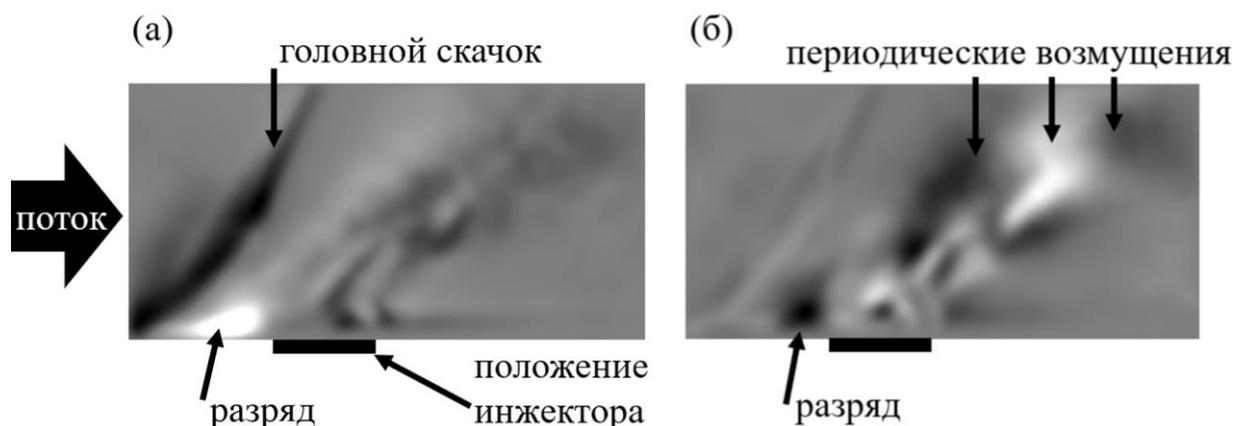


Рисунок 11 – SPOD-моды (вещественная часть) с частотами 10 кГц (а) и 50 кГц (б). Режим течения $J = 1,3$, $M = 1,9$. Частота разрядов 10 кГц

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертации:

1. На основании экспериментальных и расчетных данных показано, что периодические искровые разряды приводят к развитию возмущений на передней границе струи. Частоты этих возмущений равны или кратны частоте разрядов. Таким образом, имеет место «захват частоты»: периодические осцилляции течения осуществляются с частотами, которые определяются частотой разрядов, а периодические процессы на других частотах подавляются. В частности, разряды позволяют стабилизировать частоту рождения крупных возмущений (поперечных вихрей) в сдвиговом слое на границе струи.
2. Впервые исследован механизм интенсификации смешения сверхзвукового потока с поперечной струей посредством искровых разрядов на передней кромке

инжектора струи. Описаны процессы, инициируемые разрядом и приводящие к локальному увеличению векторного произведения градиентов плотности и давления, что в свою очередь способствует формированию поперечных вихрей в сдвиговом слое на передней границе струи и ускорению кинематического перемешивания веществ.

3. Впервые исследована зависимость эффективности перемешивания от энергии и частоты искровых разрядов. При одной и той же средней мощности энергоклада (т.е. при постоянном произведении частоты разрядов и энергии каждого разряда) оптимальной частотой разрядов является $Sh_{\infty} = 0,24 \pm 0,01$. Эта частота приблизительно совпадает с «естественной» частотой струи в исследованном диапазоне параметров: $M = 1,7-2,2$, $Re = (0,7-1,4) \cdot 10^4$, $J = 0,8-1,6$. Под «естественной» частотой здесь понимается частота, на которой наблюдаются осцилляции течения и формирование поперечных вихрей.

4. При сравнительно малом параметре инжекции ($J = 0,6-0,7$) в отсутствие разрядов и внешних возмущений не наблюдается естественное формирование крупных поперечных вихрей, что подтверждается моделированием и экспериментом. В этом случае разряды инициируют развитие конвективной неустойчивости. После разряда развивается пакет возмущений в сдвиговом слое на передней границе струи, что приводит к улучшению кинематического перемешивания. При неизменной средней мощности энергоклада в случае $J \sim 0,7$ наряду с оптимальной частотой $Sh_{\infty} = 0,24$ существует еще одна, сравнительно низкая оптимальная частота разрядов $Sh_{\infty} \sim 0,06$, существование которой объясняется кратковременным качественным изменением структуры течения после разряда.

5. На примере с $J = 1$ показано, что при неизменной энергии разряда наилучшее перемешивание также достигается при частотах разрядов в окрестности значения $Sh_{\infty} = 0,24$, что подтверждается сразу тремя независимыми критериями перемешивания. Показано, что разряды способны увеличить степень перемешивания до 20% (согласно интегральному критерию перемешивания), а глубину проникновения струи до 45%.

6. Полученные выводы об оптимальных частотах разрядов согласуются с найденной в литературе информацией о характерных частотах поперечной струи в сверхзвуковом потоке и о тех частотах, на которых осуществляется воздействие на струю в известных работах по исследованию иных активных способов перемешивания газов в сверхзвуковом потоке. Достоверность выводов о структуре и частоте течения в отсутствие и в присутствии искровых разрядов подтверждается согласием между экспериментальными данными и результатами расчетов, проведенных двумя методами.

ОСНОВНЫЕ РАБОТЫ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации, в которых отражены основные результаты диссертации, в изданиях из перечня ВАК, а также в изданиях, индексируемых в WoS, Scopus и RSCI:

A1. Волков Л.С., Фирсов А.А. Моделирование влияния импульсно-периодического нагрева на формирование возмущений на границе поперечной струи в сверхзвуковом потоке // Компьютерные исследования и моделирование, 2023, т. 15, № 4, с. 845-860.

A2. Volkov L. S., Miroshnikov Y. V., Firsov A. A. Modeling of jet mixing with supersonic crossflow under the influence of repeated spark discharges // International Journal of Thermal Sciences. 2026. V. 224. P. 110680.

A3. Волков Л.С., Фирсов А.А. Выбор критерия эффективности перемешивания газов на примере поперечной струи в сверхзвуковом потоке в присутствии искровых разрядов // Письма в ЖТФ. 2026. т. 25, № 8, с. 43-47.

A4. Волков Л.С., Селивонин И.В., Фирсов А.А. Экспериментальное и численное исследование управления возмущениями на границе поперечной струи в сверхзвуковом потоке с помощью искрового разряда // Теплофизика высоких температур. 2025. Т. 63. № 1, с. 24-31.

Другие публикации:

1. Волков, Л. С., Фирсов, А.А. Моделирование воздействия импульсно-периодического источника тепловой энергии на поперечную струю в сверхзвуковом потоке // XLVII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства, Москва, 2023. — М.: МГТУ им. Баумана (НИУ), 2023. – С. 358-360.

2. Волков Л.С., Фирсов А.А. Моделирование влияния локального импульсно-периодического нагрева на эффективность смешения поперечной струи со сверхзвуковым потоком // 65-я Всероссийская научная конференция МФТИ в честь 115-летия Л.Д. Ландау, Москва, 2023. — М.: МФТИ, 2023. – С. 330-332.

3. Волков, Л.С., Фирсов, А.А. Моделирование смешения сверхзвукового потока с поперечной струей в присутствии импульсно-периодического нагрева // XXII Международное Собрание по магнитоплазменной аэродинамике, Москва, 2023. — М.: ОИВТ РАН, 2023. С. 21-23.

4. Волков, Л.С., Фирсов, А.А. Моделирование воздействия периодических искровых разрядов на границу поперечной струи в сверхзвуковом потоке // Физика низкотемпературной плазмы (ФНТП-2023), Казань, 2023. — Казань: Издательство Казанского университета, 2023. С. 128-129.

5. Волков, Л.С., Фирсов, А.А. Расчет влияния импульсно-периодического локального нагрева на поперечную струю, инжектируемую в сверхзвуковой поток

// XIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике, Санкт-Петербург, 2023. — Электронный сборник тезисов, Р. 0100005f35.

6. Волков Л.С., Фирсов А.А. Влияние импульсно-периодического локального энерговклада на интегральные и локальные характеристики в области инжекции поперечной струи в поток воздуха // XXV Международная конференция «Нелинейные задачи теории гидродинамической устойчивости и турбулентность», г. Звенигород, 18 – 24 февраля 2024. — М: Издательство Московского Университета, 2024. С. 33-34.

7. Волков, Л.С., Фирсов, А.А. Моделирование влияния искровых разрядов на эффективность смешения потока воздуха с дозвуковой и сверхзвуковой вторичной струей // LI Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, г. Звенигород, 18 – 22 марта 2024. — М.: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2024 г. С. 197.

8. Волков, Л.С., Фирсов, А.А. Моделирование развития конвективной неустойчивости при импульсном тепловыделении в области инжекции поперечной струи в сверхзвуковой поток // XXIII Международное Собрание по магнитоплазменной аэродинамике, Москва, ОИВТ РАН, 2024. — М.: ОИВТ РАН, 2024 г. С. 73-74.

9. Волков, Л.С., Фирсов, А.А. Поиск оптимальных частот в задаче интенсификации смешения поперечной струи со сверхзвуковым потоком с помощью локального импульсного энерговыделения // Труды 66-й Всероссийской научной конференции МФТИ, 1–6 апреля 2024 г. Фундаментальная и прикладная физика. — М: Физматкнига, 2024. — с. 317-318.

10. Firsov, A.A., Volkov, L.S. Simulation of the Mixing of a Supersonic Air Flow with a Transverse Jet under the Conditions of Pulse-Periodic Local Heating // The 3rd International Conference on High-Speed Vehicle Science and Technology, Busan, South Korea, 2024. P. 194.

11. Волков, Л.С., Фирсов, А.А. Влияние частоты импульсного энерговклада на интенсификацию смешения дозвуковой и сверхзвуковой вторичной поперечной струи с потоком воздуха // XLVIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых — пионеров освоения космического пространства (Москва, 23–26 января 2024 года) : сборник тезисов : в 3 т. — М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2024. т. 1, с. 368-370.

12. Волков Л.С., Трошкин Р.С., Мирошников Я.В., Фирсов А.А. Искровой разряд перед инжектором поперечной струи в сверхзвуковом потоке: моделирование и эксперимент // LII Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу 17 – 21 марта 2025 г., г. Звенигород. Сборник тезисов докладов. — М.: АО НТЦ «ПЛАЗМАИОФАН», 2025 г. с. 198.

13. Волков Л.С., Мирошников Я.В., Трошкин Р.С., Фирсов А.А. Влияние периодических искровых разрядов на частоту возмущений поперечной струи в сверхзвуковом потоке // Материалы XXXV научно-технической конференции по аэродинамике ЦАГИ 2025 г., г. Жуковский, 2025. с. 37-38.
14. Трошкин, Р.С., Волков, Л.С., Фирсов, А.А. Воспламенение сверхзвуковой струи предварительно перемешанной топливно-воздушной смеси в сверхзвуковом потоке воздуха с помощью электрического разряда // Прикладная механика и техническая физика. 2025. № 4(392), с. 18-23.
15. Волков Л.С., Трошкин Р.С., Мирошников Я.В., Фирсов А.А. Экспериментальное исследование частоты возмущений поперечной струи в сверхзвуковом потоке в присутствии периодических искровых, разрядов // Тезисы XXIV Международного Совещания по магнитоплазменной аэродинамике. — Москва, ОИВТ РАН, 2025, с. 38-39.
16. Волков Л.С., Фирсов А.А. Исследование механизма формирования возмущений на передней границе поперечной струи в сверхзвуковом потоке под воздействием искровых разрядов // Новые горизонты прикладной математики: тезисы II Российской молодежной научной конференции (г. Москва, 17–19 апреля 2025 г.) — М.: ИПМ им. М.В. Келдыша, 2025. – с. 44-45.

СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Liu Q., Vaccarella D., Lee T. Review of combustion stabilization for hypersonic airbreathing propulsion // Progress in Aerospace Sciences. 2020. Т. 119. С. 100636.
2. Sun M., Wang H., Xiao F. Jet in Supersonic Crossflow. Singapore: Springer Singapore, 2019.
3. Cai Z. и др. Numerical Study on Transverse Jet Mixing Enhanced by High Frequency Energy Deposition // Energies (Basel). MDPI, 2022. Т. 15, № 21.
4. Wang H. и др. Mechanism of a transverse jet mixing enhanced by high-frequency plasma energy deposition // Physics of Fluids. 2023. Т. 35, № 9. С. 096101.
5. Firsov A. и др. Plasma-enhanced mixing and flameholding in supersonic flow // Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. Royal Society of London, 2015. Т. 373, № 2048.
6. Долгов Е. В., Колосов Н. С., Фирсов А. А. Исследование влияния искрового разряда на смешение струи газообразного топлива со сверхзвуковым воздушным потоком // Компьютерные исследования и моделирование. 2019. Т. 11, № 5. С. 849–860.
7. Rogg F. и др. Mixing Enhancement in a Hydrocarbon-Fuelled Scramjet Engine Through Repeated Laser Sparks // 23rd AIAA International Space Planes and Hypersonic Systems and Technologies Conference. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020.

8. Zhao M., Ye T. URANS study of pulsed hydrogen jet characteristics and mixing enhancement in supersonic crossflow // *Int. J. Hydrogen Energy*. 2019. Т. 44, № 36. С. 20493–20503.
9. Banica M. C. и др. Numerical Study of Supersonic Combustion Processes with Central Strut Injection // *J. Propuls. Power*. 2010. Т. 26, № 4. С. 869–874.
10. Watanabe J. и др. Large-eddy simulation of jet in supersonic crossflow with different injectant species // *AIAA Journal*. 2012. Т. 50, № 12. С. 2765–2778.
11. Sivadas V. и др. Flow visualisation studies on growth of area of deflected jets // *Exp. Fluids*. 1997. Т. 23, № 2. С. 105–112.
12. Sun M. и др. Experimental investigation on transverse jet penetration into a supersonic turbulent crossflow // *Sci. China Technol. Sci.* 2013. Т. 56, № 8. С. 1989–1998.
13. Gruber M. R. и др. Mixing and Penetration Studies of Sonic Jets in a Mach 2 Freestream // *J. Propuls. Power*. 1995. Т. 11, № 2. С. 315–323.
14. Mungal M. G., Smith S. H. *Jets in Crossflow — Scalar Mixing via PLIF*. 2003. С. 15–24.
15. Жлуктов С. В., Аксенов А. А. Пристеночные функции для высокорейнольдсовых расчетов в программном комплексе FlowVision // *Компьютерные исследования и моделирование*. 2015. Т. 7, № 6. С. 1221–1239.
16. Schmidt O. T., Colonius T. Guide to Spectral Proper Orthogonal Decomposition // *AIAA Journal*. 2020. Т. 58, № 3. С. 1023–1033.