

## ОТЗЫВ

**официального оппонента д.ф.-м.н. Азаровой Ольги Алексеевны**  
на диссертационную работу Долбня Дарьи Илларионовны на тему  
«Воздействие наносекундного объемного разряда на нестационарное  
высокоскоростное течение в канале», представленную на соискание  
ученой степени кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.17. – «Химическая физика, горение и взрыв, физика  
экстремальных состояний вещества».

В диссертационной работе Д.И. Долбня представлены результаты экспериментального исследования взаимодействия импульсного объемного (комбинированного) разряда, инициируемого ультрафиолетовой предыонизацией от плазменных листов, с нестационарным газодинамическим течением в прямоугольном канале с препятствием.

**Актуальность** темы настоящей диссертации обусловлена необходимостью создания новых и эффективных методов управления обтеканием летательных аппаратов, конфигурациями ударных волн, а также способов оптимизации воспламенения и поддержания горения топлива в камерах внутреннего сгорания. При помощи локализованного подвода энергии в набегающий поток становится возможным, в частности, эффективное управление высокоскоростными летательными аппаратами. В последние годы среди всех типов разрядов повышенный интерес вызывают импульсные плазменные разряды с длительностью импульса от нескольких до сотен наносекунд. Развитие наносекундного (импульсного) разряда – это неравновесный процесс с высокой температурой электронов, который может поддерживать диссоциацию быстрых электронов в большом объеме. По этой причине плазменные разряды наносекундной длительности вызывают интерес в исследованиях плазменного горения.

В рамках рассматриваемой диссертации проводилось экспериментальное исследование на стенде УТРО – 3 (Ударная Труба-Разряд-Оптика), представляющем собой однодиафрагменную ударную трубу – газодинамический канал с разрядной секцией и встроенной вставкой. Экспериментальные методы, применяемые в исследовании, включают достаточно информативные инструменты. Автор применяет комплексный подход как в получении большого массива экспериментальных данных, так и в их обработке и анализе, что не только обеспечивает достоверность полученных результатов за счет многократной повторяемости, но и способствует повышению понимания происходящих процессов.

Были реализованы экспериментальные методы с применением высокоскоростной фото- и видеосъемки с высоким пространственно-временным разрешением, необходимым для регистрации быстропротекающих процессов в нано- и микросекундном диапазонах. Регистрация свечения проводилась интегрально по времени в сочетании с покадровой съемкой с наносекундным разрешением в девяти-кадровом представлении, что обеспечило понимание процессов локализации разряда, эволюции и длительности светимости плазмы. На основе теневого метода с применением лазерной подсветки были получены фильмы миллисекундной длительности, представившие информацию о структуре и скорости набегающего потока и об образовавшейся в результате инициирования разряда ударно-волновой конфигурации. Был применен метод трассирования, который дал возможность оценить эволюцию скорости потока за ударной волной. В работе также дана оценка точности проведенных измерений.

Исследовалось нестационарное течение, реализуемое в результате инициирования наносекундного комбинированного разряда, как в условиях неподвижного газа, так и при наличии высокоскоростного набегающего потока с широким диапазоном скоростей, от 200 м/с (дозвуковое течение) до 850 м/с (сверхзвуковое течение). При этом в зоне инициирования разряда было установлено диэлектрическое препятствие (вставка), слабо изменяющее двумерность поля течения, но вносящее значительные изменения в поля газодинамических параметров.

При реализации наносекундного разряда в неподвижном газе без вставки разряд горит в диффузной форме во всем 100-мм промежутке. Диэлектрическое препятствие, помещенное поверх плазменного листа, влечет за собой перераспределение импульсной плазмы – наблюдаются симметричные яркие плазменные каналы вдоль образующих вставки, при этом по всему размаху свободного плазменного листа свечение остается однородным. Данный эффект приводит к образованию взрывных/ударных волн, способных вносить возмущение на интервале времени более 600 мкс из-за периодического отражения от стенок канала. При создании газодинамического потока плазма импульсного разряда перераспределялась преимущественно в зоны низкой плотности из-за сильной зависимости приведенного электрического поля  $E/\rho$  от плотности среды  $\rho$ . Положение зон самолокализации относительно препятствия зависело от скорости набегающего потока и от воздействия газодинамических структур, формируемых вокруг вставки, что приводило к образованию мощных ударных волн, скорость которых могла достигать 1200 м/с.

**Научная новизна** работы, отмеченная в диссертации, заключается в следующем:

- получены экспериментальные данные по эволюции скорости потока в используемой экспериментальной установке;
- впервые описан и исследован эффект вытеснения плазмы импульсного разряда;
- импульсный объемный разряд впервые инициирован на различных стадиях нестационарного сложного течения в прямоугольном канале с препятствием;
- зафиксированы четыре режима самолокализации при однократном инициировании импульсного объемного разряда;
- выделен основной (ударно-волновой) механизм воздействия разряда на элементы структуры высокоскоростного течения;
- определены интервалы длительности воздействия инициированных разрядом ударно-волновых конфигураций на поток.

Диссертация содержит помимо **вводной части** и **обзора** современных исследований (**глава 1**), четыре содержательных главы (**главы 2 – 5**), **заключение**, и **список цитируемой литературы**, включающий публикации автора по теме диссертации.

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована цель данной работы, определяется объект исследования, описываются решенные задачи, даны основные положения, выносимые на защиту, показана их научная новизна, а также их научная и практическая значимость, описаны методы исследования, представлена апробация основных результатов и проанализирована их достоверность; приведено также краткое содержание работы.

В **первой** главе приводится обзор публикаций, содержащих актуальные на текущий момент результаты по тематике диссертации, с подробным анализом способов и механизмов воздействия и управления газодинамическими течениями различной скорости. Обсуждаются исследования, касающиеся импульсных разрядов.

Во **второй** главе дается описание экспериментального стенда, включающего диагностический комплекс, а также методов исследования. Приводятся результаты по эволюции течения в канале ударной трубы.

**Третья** глава посвящена исследованию влияния диэлектрической вставки, помещенной в зону плазменного листа, на перераспределение плазмы наносекундного разряда в неподвижном газе. Приводятся результаты регистрации свечения и теневой регистрации формируемого течения, относящиеся к разным частям потока. Вблизи вставки наблюдаются

интенсивные симметричные плазменные каналы, при этом свободный плазменный лист формирует однородное свечение по всей поверхности 100 мм × 30 мм. Яркость интегрального свечения плазменных каналов и его длительность увеличивалась по мере увеличения плотности газа в разрядном промежутке. Наблюдаемый эффект был назван автором эффектом «вытеснения». Перераспределение энергии импульсного разряда способствовало генерации взрывных волн, тем самым становясь источником ударно-волнового воздействия. Были получены пространственно-временные характеристики взрывных волн от неоднородного импульсного энерговклада.

В **четвертой** главе исследуется перераспределение плазмы импульсного комбинированного разряда в потоке, формируемом за ударной волной после ее выхода из разрядного промежутка. В работе выделены четыре основных режима, соответствующих различным условиям газодинамического обтекания препятствия. Исходя из интегральной фотосъемки свечения разряда приводятся качественные данные о локализации импульсной плазмы.

В **пятой** главе представлены результаты исследования воздействия наносекундного локализованного импульсного комбинированного разряда на высокоскоростное газодинамическое течение. Это воздействие осуществляется посредством образования взрывных волн от зон локализации комбинированного разряда, инициированного на определенных участках газодинамического тракта в профилированной части канала разрядной секции. Рассмотрены четыре режима течения, для каждого из которых были определены пространственно-временные характеристики ударно-волнового воздействия.

В **Заключении** сформулированы выводы, отражающие основные результаты диссертации, которые заключаются в следующем:

1. Обнаружен эффект вытеснения плазмы разряда, вызванный наличием диэлектрической вставки, установленной сверху плазменного листа, который приводит к перераспределению энергии импульсного разряда и генерации взрывных волн.

2. Показано, что изменение газодинамических условий обтекания влечет за собой изменение локализации импульсного объемного разряда. При измеренной скорости основного потока от 850 м/с до 200 м/с выделены и исследованы четыре различных режима самолокализации комбинированного разряда – реализации сильноточных плазменных каналов вблизи препятствия. Получено также, что за счет ударно-волнового воздействия на поток при определенной локализации разряда, структурные элементы потока способны ослабевать или исчезать.

3. В исследованном диапазоне скоростей получена обобщенная количественная зависимость, определяющая времена воздействия на поток взрывных волн, инициированных разрядом.

Отметим, что второй результат, связанный с выделением четырех различных режимов самолокализации разряда вблизи препятствия в зависимости от скорости набегающего потока, является уникальным и носит исключительный характер (Рис. 4.5).

Помимо прочих, следует отметить интересные результаты, содержащиеся в диссертации:

1. Методом трассирования была определена эволюция скорости течения в канале ударной трубы за ударными волнами для чисел Маха  $M_{ув}$  2.8 и 3.2 (Рис. 2.5). Были получены графики зависимости мгновенной скорости потока за ударной волной от времени. Из Рис. 2.5 видно, что экспериментальный результат хорошо совпадает с теоретическим, полученным из соотношения Ренкина-Гюгонио для спутного потока.

2. Эксперименты показали, что свечение разряда, локализованного в области турбулентного пограничного слоя, имеет вид вытянутых по потоку структур, отражающих конфигурации волн Толлмина – Шлихтинга и полосчатых структур в пограничном слое (Рис. 2.8). Из этого рисунка видно, что сравнение картин визуализации разряда с классической схемой Шлихтинга показывает хорошее сходство.

В диссертации содержатся следующие недостатки:

1. По мнению оппонента, научную новизну диссертации следовало бы дополнить пунктом о результате, полученном автором впервые, а именно, доказательством возможности управления элементами сверхзвукового потока (ударно-волновыми структурами над обтекаемым телом) за счет разрядного энерговыклада, осуществляемого в области, расположенной за телом. Этот же результат следовало бы включить в Основные результаты и в Заключение.

2. Результаты по определению эволюции скорости течения методом трассирования (Рис. 2.5) и по сравнению трех картин визуализации разряда для потока за ударной волной с классической схемой Шлихтинга (Рис. 27, 28), несомненно, должны были быть упомянуты в Выводах к Главе 2 и, быть может, в общих выводах диссертации.

3. К сожалению, диссертация содержит некоторые смысловые и стилистические некорректности, а также некорректности в оформлении работы.

Перечислим некорректности и опечатки, касающиеся оформления и анализа рисунков:

Рис. 27: с. 37, 38: в тексте: «Рисунок 2.7 (б-д)». Должно быть: «Рисунок

2.7 (б-г)». Те же замечания касаются подписи к этому рисунку.

В тексте на с. 38 идет речь о «частоте полосчатых структур», а на Рис. 27 соответствующая ось обозначена как «плотность полосчатых структур».

Опечатка в подписи к Рис. 3.2 – пропущен номер рисунка (б).

Рис. 3.3: рисунки (а) и (в) по логике изложения следует поменять местами.

Работа содержит также некоторые стилевые некорректности: с. 4, 2-е и 3-е предложения; с. 5 последний абзац, последнее предложение; с. 23, предпоследняя строка (перед Выводами); с. 48, первый абзац; с. 83, 2-ой абзац; с. 86, 2-ой абзац; с. 87, 1-ый абзац.

Эти замечания ни в коей мере не ставят под сомнение квалификацию автора и не изменяют общего положительного впечатления о представленной диссертации. Замечания 1 и 2 являются, скорее, пожеланиями, касающимися будущей работы диссертанта.

Следует отметить, что Д.И. Долбня имеет значительное количество публикаций по теме диссертации в журналах, входящих в список ВАК, RSCI, а также публикации в высокоимпактных мировых журналах, входящих в первый квартиль в мировых базах цитирования Web of Science и Scopus. Результаты работы представлялись на ведущих международных конференциях по тематике диссертации. Данные факты свидетельствуют о высоком уровне результатов, представленных в диссертации.

Содержание диссертации соответствует паспорту специальности 1.3.17. – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества» и удовлетворяет критериям, определенным пп. 2.1-2.5 Положения о присуждении ученых степеней в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова, а также оформлена согласно п. 3.1. этого Положения. Соискатель Долбня Дарья Илларионовна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.17. – «Химическая физика, горение и взрыв, физика экстремальных состояний вещества».

Официальный оппонент:

Доктор физико-математических наук,

Ведущий научный сотрудник Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук" (ФИЦ ИУ РАН)

Азарова Ольга Алексеевна

29 августа 2023 г.

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена докторская диссертация: 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Контактные данные: E-mail: [scas@ccas.ru](mailto:scas@ccas.ru), тел.: +7 (499) 135-4289.

Сведения о месте работы официального оппонента: Федерального государственного учреждения "Федеральный исследовательский центр "Информатика и управление" Российской академии наук" (ФИЦ ИУ РАН) 119333, Москва, Вавилова, д. 40. (<http://www.ccas.ru/>) E-mail: [wcan@ccas.ru](mailto:wcan@ccas.ru), +7 (499) 135-0440.

29 августа 2023 г.