

На правах рукописи



Пономарев Андрей Артемьевич

**ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ЛАМИНАРНОГО ПЛАМЕНИ В
УСЛОВИЯХ ВОЗМУЩЕНИЯ СЛАБЫМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ
ПОЛЕМ**

1.3.14 Теплофизика и теоретическая теплотехника

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск-2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук (ИТ СО РАН).

Научный руководитель:	Доктор физико-математических наук, профессор РАН Дулин Владимир Михайлович
Официальные оппоненты:	Сыродой Семен Владимирович, доктор технических наук, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Минаков Андрей Викторович, доктор физико-математических наук, профессор, федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», директор Института инженерной физики и радиоэлектроники, профессор кафедры теплофизики
Ведущая организация:	Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН

Защита состоится 18 ноября 2026 года в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.1.129.01, созданного на базе ИТ СО РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИТ СО РАН: www.itp.nsc.ru. Отзыв на автореферат, заверенный печатью учреждения, просьба отправлять на имя ученого секретаря диссертационного совета по адресу: 630090, г. Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, д. 1. (e-mail: dissovet@itp.nsc.ru).

Автореферат разослан «___» сентября 2026 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.ф.-м.н., профессор РАН



Терехов Владимир Викторович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Управление характеристиками горения является фундаментальной задачей теплофизики, имеющей ключевое значение для повышения эффективности и экологической безопасности энергетических установок. Воздействие на ламинарный фронт пламени внешними факторами, такими как электрическое поле и дисперсная фаза топлива, открывает широкие возможности для управления режимами горения, однако детальные физические механизмы такого воздействия остаются недостаточно изученными.

Введение в топливовоздушную смесь капель жидкого топлива коренным образом трансформирует структуру фронта пламени. Капли, испаряясь, создают локальные неоднородности концентрации и отбирают тепло, что приводит к изменению характеристик пламени. Аналогично, применение слабого внешнего электрического поля напряженностью до 1.5 кВ/см способно заметно изменять форму и скорость распространения пламени, расширяя пределы стабильного горения. Несмотря на различную физическую природу воздействия на пламя, их общая идея однозначна: необходимым образом возмущая пламя возможно достижение наиболее оптимального режима горения в системе. Для точного понимания закономерностей отклика пламени на управляющее возмущение необходимы детальные исследования с точным разрешением тонких структур фронта горения.

Проблема управления режимами горения носит междисциплинарный характер и актуальна для широкого класса технических устройств и приложений. Таким образом, научная проблема диссертации заключается в необходимости систематических численных исследований, позволяющих детально описать физические механизмы возмущения ламинарного пламени с полным разрешением его пространственной структуры двумя независимыми способами (дисперсная фаза и слабое электрическое поле), а также в определении закономерностей изменения его ключевых характеристик при варьировании управляющих параметров.

Степень разработанности темы исследования

Несмотря на значительное количество экспериментальных работ в этих областях, численные исследования, особенно в многомерной постановке с полным разрешением структуры фронта при воздействии указанных возмущений, практически отсутствуют. Особенно слабо изучены переходные режимы, когда время испарения капли становится соизмеримым с временем химической реакции. Для возмущения электрическим полем основные работы по численным исследованиям, как правило, ограничиваются упрощенными одномерными постановками без

учета пространственной структуры фронта и детальной химической кинетики, либо рассматривают предельный случай сильных полей с пробоем. В литературе отсутствуют систематизированные данные о влиянии данных возмущений на тонкую структуру фронта горения и ее корреляции со скоростью распространения и температурой пламени.

Целью работы является численное исследование структуры и скорости распространения ламинарного пламени в условиях возмущений внешним слабым электрическим полем и при наличии капель топлива различного размера.

Задачи, поставленные в соответствии с темой работы:

- Реализация и отладка математического метода расчета термохимической структуры пламени и моделирования его динамики в условиях внешнего воздействия слабого электрического поля с учетом ионной химии, а также наличия дисперсной фазы.
- Исследование влияния размера капель на осредненную структуру, поле температуры и скорость потока для пламени Бунзена монодисперсной газок капельной смеси модельного углеводородного топлива (этанола) с воздухом.
- Математическое моделирование плоского пламени метановоздушной смеси в условиях воздействия слабого постоянного электрического поля для различных соотношений топливо-окислитель. Анализ влияния напряженности поля и модели диффузии газовых компонент на термохимическую структуру пламени и величину электрического тока.
- Исследование влияния слабого поперечного электрического поля на конусообразное метановоздушное пламя Бунзена. Анализ физико-химических механизмов при деформации пламени и локальном увеличении скорости его распространения.

Научная новизна

- Впервые установлена немонотонная зависимость осредненной скорости распространения фронта пламени газок капельной взвеси от размера монодисперсных капель топлива. Установлено влияние размера монодисперсных капель на осредненную структуру фронта пламени газок капельной смеси.
- Впервые методом прямого численного моделирования в двумерной постановке исследовано влияние слабого продольного электрического поля на структуру плоского пламя метановоздушной смеси. Установлено влияние электрического поля на величину ионного тока. Установлено влияние моделей диффузии на точность описания структуры фронта пламени при воздействии внешнего продольного электрического поля.
- Впервые численно описан эффект деформации пламени Бунзена при воздействии поперечного электрического поля. Описан эффект

увеличения скорости распространения в области максимальной кривизны у вершины пламени. Впервые численным методом продемонстрировано экранирование электрического поля внутри конуса пламени.

Теоретическая и практическая значимость

Полученные в ходе численных исследований данные обладают большим потенциалом и значительно расширяют понимание процессов изменения структуры фронта пламени при возмущениях пламени каплями топлива и внешним электрическим полем. Полученные данные могут служить основой для разработки новых методов управления режимами горения и подавления неустойчивостей в силовых установках. Результаты исследований могут служить основой для разработки новых устройств стабилизации пламени и распыла топлива.

Методология и методы исследования

Для численных исследований использовались широкого применяемые в практических и научных расчетах пакеты вычислительной гидродинамики (CFD, англ.: computational fluid dynamics) с открытым исходным кодом CANTERA-v3.1.0 в одномерных постановках и OpenFOAM 7-ой и 12-ой версий в случаях многомерных задач. Расчеты основаны на решении уравнений Навье-Стокса для реагирующих течений с учетом сжимаемости среды методом прямого численного моделирования с полным разрешением структуры фронта пламени. Капли жидкости учитывались в виде Лагранжевых частиц. Полученные численные данные валидированы по экспериментальным данным анемометрии по изображениям частиц (PIV), плоской лазерно-индуцированной флуоресценции (PLIF) и величинам тока насыщения совместно с вольтамперными характеристиками.

Достоверность результатов

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается комплексным подходом, сочетающим валидацию численных результатов по надежным и апробированным экспериментальным методам исследования, таких как ОН PLIF, PIV, экспериментально измеренным величинам электрического тока насыщения и вольтамперным характеристикам. Все начальные и граничные условия устанавливались в соответствии с данными натурных экспериментов. Методики, используемые в исследовании, зарекомендованы и популярны в научной литературе. Результаты были сопоставлены с другими работами из этой области. Также достоверность результатов подтверждается публикациями в строго рецензируемых научных журналах.

Положения выносимые на защиту

1. Немонотонная зависимость средней скорости распространения пламени от размера монодисперсных капель для пламени газокпельной этаноловоздушной смеси. Механизм достижения оптимальной скорости распространения пламени в газокпельном

монодисперсном потоке этаноловоздушной смеси для богатых режимов горения пламени.

2. Эффект увеличения скорости распространения пламени метановоздушной смеси в области наибольшей кривизны фронта конусного пламени под воздействием электрического поля. Возникновение некомпенсированного положительного заряда в продуктах реакции за фронтом конусного пламени метановоздушной смеси.

3. Эффект экранирования электрического поля внутри ламинарного конусного пламени Бунзена метановоздушной смеси при воздействии внешнего электрического поля.

Личный вклад автора

Соискатель лично получил научные результаты, включенные в диссертацию для защиты. Вклад автора заключался в создании математических моделей учета динамики пламени во внешнем слабом электрическом поле, валидации численных моделей, проведении численных исследований, анализе полученных данных и подготовке научных статей. Постановка задачи и основные методы исследования сформулированы руководителем диссертационной работы д.ф.-м.н. В.М. Дулиным.

Апробация работы

Результаты исследований неоднократно обсуждались на конференциях и семинарах: «2d International Conference on Physics and Chemistry of Combustion and Processes in Extreme Environments» (2022, Самара); «XXXIX Сибирский теплофизический семинар» (2023, Новосибирск); «10th International Seminar on Flame Structure» (2023, Новосибирск); «16-ая Ежегодная научная конференция отдела горения и взрыва ФИЦ ХФ РАН» (2023, Москва); XXIV школа семинар «Проблемы газодинамики и теплообмена в энергетических установках» (2023, Казань); «Горение топлива: теория, эксперимент и приложения» (2024, Новосибирск); «1-st Sino-Russia Workshop on Low-Carbon/Low-Emission Combustion for Gas Turbine Applications» (2025, Шанхай); «2-nd Sino-Russia Workshop on Low-Carbon/Low-Emission Combustion for Gas Turbine Applications» (2025, Новосибирск); «XLI Сибирский теплофизический семинар» (2025, Новосибирск); «IX Всероссийская конференция по задачам со свободными границами» (2026, Новосибирск).

Публикации

По теме диссертация опубликовано 6 работ в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК. Из опубликованных работ: 4 работы 1 уровня «Белого списка» РЦНИ и 1 работа в журналах 2 уровня «Белого списка» РЦНИ.

Объем и структура диссертация

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объем диссертации составляет 131 страницу с 48 рисунками и 1 таблицей. Список литературы содержит 267 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДРЕЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертационной работы обоснована её актуальность, показана степень разработанности темы, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, определена научная новизна, достоверность, теоретическая и практическая значимость работы, представлены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава является литературным обзором современного состояния исследований, посвященных исследованию воздействия дисперсной фазы топлива и электрического поля на ламинарный фронт пламени. В разделе, посвященном газокapельным смесям, рассмотрены классические работы (Burgoyne, 1954; Williams, 1985; Polymeropoulos, 1975; Hayashi, 1977), в которых установлены немонотонные зависимости скорости распространения пламени от размера и концентрации капель. Проанализированы современные численные исследования (Neophytou, 2009; Rochette 2019), подтверждающие эффект увеличения скорости в богатых смесях. Показано, что наличие дисперсной фазы топлива способно как интенсифицировать, так и подавлять процессы горения в зависимости от широкого спектра условий. Ключевой концепцией является эффективный коэффициент избытка топлива, когда локальный состав смеси в зоне реакции оказывается ближе к стехиометрии.

В разделе об электрических полях рассмотрены механизмы воздействия поля на пламя. Выделены различные диапазоны напряженности электрического поля. Акцент сделан на слабое электрическое поле (до 150 кВ/м), в котором основной эффект связан с изменением гидродинамики за счет движения заряженных частиц в пламени, но влияние на химическую кинетику незначительно. Отмечены работы Calcote, 1955; Weinberg, 1976; Van Den Boom, 2009; Bradley, 1984, в которых зафиксировано увеличение скорости распространения пламени и улучшение отрывных характеристик пламен при воздействии слабого электрического поля. Подчеркнуто, что в литературе имеется лишь одна работа по численному исследованию с применением метода прямого численного моделирования в трехмерной постановке (Belhi, 2019), в которой авторы признают лишь качественное совпадение с экспериментальными данными, что подтверждает актуальность темы.

Вторая глава посвящена численному исследованию влияния дисперсной фазы топлива на пламя Бунзена предварительно перемешанной газокapельной смеси этанола с воздухом с применением метода прямого численного моделирования в трехмерной нестационарной постановке. Представлена используемая математическая модель с применением Эйлера-Лагранжевого подхода. Указан используемый детальный кинетический механизм (Millán-Merino, 2018). Проведен анализ сеточной сходимости, показавший, что размер ячейки 80 мкм в области фронта пламени является оптимальным значением для его точного разрешения.

Пример фотографии газокapельного пламени этанола и расчетная сетка представлены на Рисунке 1. Начальные и граничные условия задавались согласно эксперименту. Исследовались два режима горения с одновременной инжекцией паров этанола и капель. Условия горения соответствовали атмосферному давлению при температуре 296 К. Расход паров спирта составлял 1.6 г/мин (насыщенный пар) и 1.2 г/мин (с разбавлением сухим воздухом). Полный объемный расход воздуха в обоих режимах составлял 10.84 л/мин. Поток жидкой фазы считался одинаковым в обоих случаях и составлял 0.5 г/мин при монодисперсном размере капель 14 мкм (spraySpy). Исследуемые режимы горения предварительно перемешанных смесей соответствовали полным коэффициентам избытка топлива $\varphi_{tot} = 1.47$ и $\varphi_{tot} = 1.19$, при соответствующей концентрации паров $\varphi_g = \varphi_{sat} = 1.12$ (насыщенный пар) и $\varphi_g = 0.84$. Коэффициент избытка топлива для жидкой фазы соответствовал $\varphi_{liq} = 0.35$. Вокруг сопла был организован спутный поток воздуха с величиной скорости 5% от значения на выходе из сопла.

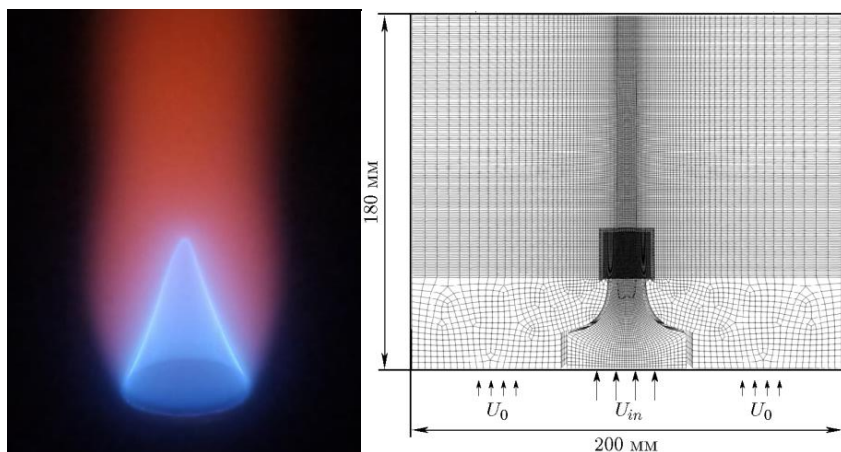


Рисунок 1. Фотография газокapельного пламени этанола для режима $\varphi_{tot} = 1.47$ (слева) и вид расчетной сетки в центральном сечении (справа).

Для выбранных режимов была выполнена валидация расчетных данных по измеренным методом ОН PLIF полям температуры в эксперименте. Результаты показали хорошее соответствие высоты конуса пламени и температуры для режима $\varphi_{tot} = 1.47$. Высота конуса в расчете и эксперименте составила 23 и 20 мм (13%) при максимальной температуре пламени 2036 К и 1980 К, соответственно. Для режима $\varphi_{tot} = 1.19$ наблюдалось существенное отличие в высоте конуса (33%) и температуре пламени (300 К) от эксперимента (Рисунок 2). Установлено, что наблюдаемое отклонение для режима $\varphi_{tot} = 1.19$ связано отсутствием

возможности точного определения массового расхода паров спирта и его жидкой фазы в эксперименте ввиду разбавления потока сухим воздухом, что приводит к испарению капель внутри сопла до достижения области фронта пламени. Дальнейшее численное исследование было сфокусировано на режиме $\varphi_{\text{tot}} = 1.47$, в котором однозначно определяются начальное соотношение массового расхода паров и капель спирта, а также установлено, что капли топлива не испаряются до достижения области пламени ввиду насыщенности паров.

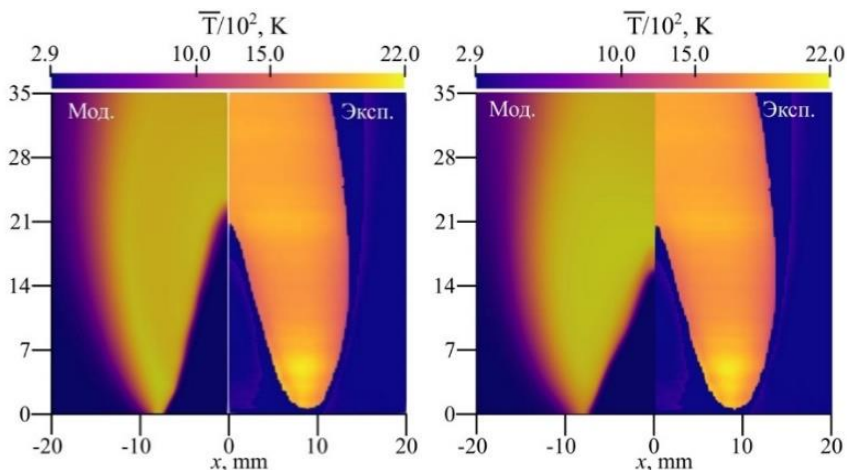


Рисунок 2. Сравнение средних полей температуры в моделировании и эксперименте для пламени этанола: $\varphi_{\text{tot}} = 1.47$ (слева) и $\varphi_{\text{tot}} = 1.19$ (справа).

Для режима $\varphi_{\text{tot}} = 1.47$ было проведено сравнение пламен газок капельной смеси с чисто газовым при том же полном расходе топлива и воздуха ($\varphi_g = 1.47$). Установлено, что инжекция части топлива в виде капель размером 14 мкм приводит к снижению высоты пламени с 35 мм до 23 мм, что соответствует увеличению средней скорости распространения с 23 см/с (для газа) до 42 см/с (для газок капельной смеси). При этом фронт пламени гомогенной смеси гладок, в то время как для газок капельной смеси существенно искривлен. Средняя скорость распространения рассчитывалась путем осреднения нормальной к фронту пламени компоненты скорости в 20 различных точках. При инжекции части топлива в виде капель температура пламени возрастает с 1915 К до 2000 К. Анализ профилей промежуточных радикалов показал значительное увеличение концентрации атомарного водорода (H) в газок капельном режиме, что, согласно анализу чувствительности кинетического механизма, прямо коррелирует с возросшей скоростью распространения.

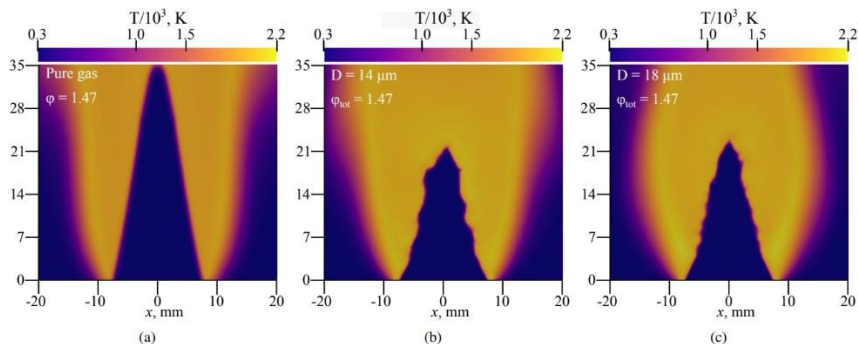


Рисунок 3. Расчетные поля мгновенной температуры для различных размеров капель этанола: (а) – 0 мкм (все топливо в газовой фазе), (б) – 14 мкм, (с) – 18 мкм.

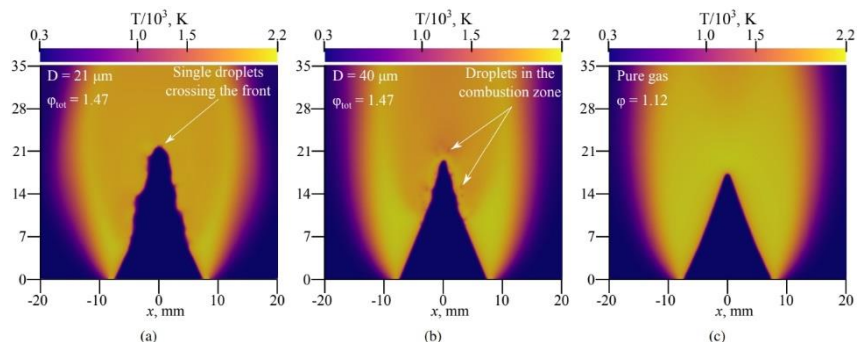


Рисунок 4. Расчетные поля мгновенной температуры для различных размеров капель этанола: (а) – 21 мкм (все топливо в газовой фазе), (б) – 40 мкм, (с) – чистый газ при $\phi = 1.12$.

Параметрическое исследование влияния размера капель (0, 14, 18, 21, 25, 30, 40 мкм) выявило немонотонную зависимость осредненной скорости распространения от диаметра. При инъекции всего топлива только в газообразной форме (0 мкм) фронт конуса пламени стационарен и не испытывает видимых деформаций (Рисунок 3а). Для диаметра до 18 мкм фронт пламени существенно искривляется каплями топлива, однако их размер все ещё недостаточен для его пересечения (Рисунок 3б).

Для размера 21 мкм наблюдаются единичные капли, пересекающие фронт пламени (Рисунок 4а), что говорит о том, что характерное время испарения капель начинается превосходить характерное время химического реагирования. При дальнейшем увеличении размера большее количество капель пересекает фронт. При размере 40 мкм амплитуда деформации фронта пламени заметно снижается. Наблюдаемая форма конуса и его высота (18.7 мм) становится близка к горению гомогенной смеси при $\phi = \phi_{\text{sat}}$

= 1.12 (Рисунок 4с), указывая на существенное снижение влияния жидкой фазы топлива на характеристики пламени.

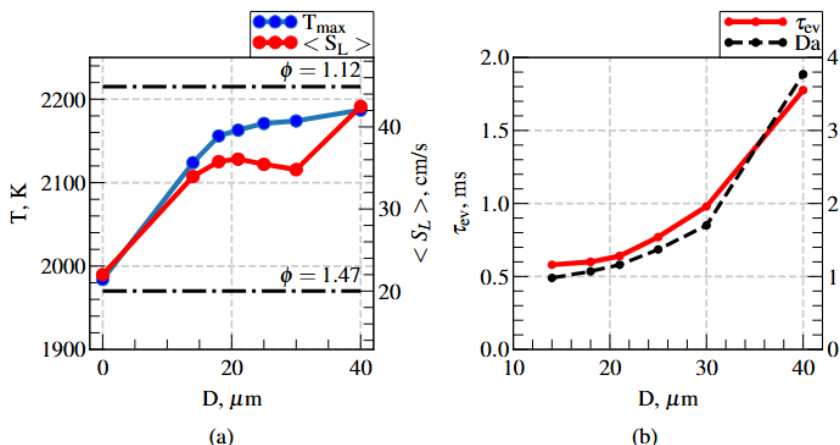


Рисунок 5. Графики максимальной температуры пламени со средней скоростью распространения пламени $\langle S_L \rangle$ (а) и средняя скорость испарения капель этанола с расчетным числом Дамкелера (б).

Для параметрического исследования осредненная скорость распространения пламени считалась путем нахождения нормали среднего поля скорости $\langle S_L \rangle$ к среднему положению фронта пламени, рассчитанного через поле температуры в области наличия капель. Средние скорости распространения и характерные времена испарения капель, рассчитанные в ходе моделирования для различных размеров капель представлены на Рисунке 5. Данные продемонстрировали наличие локального максимума в области 20 мкм и минимума в области 30 мкм. Для капель 40 мкм осредненная скорость распространения становится близка к величине, соответствующей гомогенной смеси (без капель) при горении только насыщенного пара ($\phi = 1.12$). Анализ распределения средних полей промежуточных радикалов Н, О, ОН показал прямую корреляцию с величиной скорости распространения. Максимальная температура пламени монотонно растет из-за эффекта аэродинамической фокусировки капель, ввиду чего у основания конуса пламени смесь приближается к стехиометрической (Рисунок 4б).

На основе полученных данных и научной литературы предложена модельная кривая (Рисунок 6), описывающая зависимость осредненной скорости распространения пламени этанола от размера капель, на основе числа Дамкёлера для времени испарения капель (Рисунок 5б): $Da = \frac{\tau_{\text{ev}}}{\tau_{\text{chem}}}$, $\tau_{\text{chem}} = \frac{\delta_L}{\langle S_L \rangle}$. Толщина фронта пламени определена через максимальный

градиент температуры $\delta_L = (T_{max} - T_{min})/(dT/dx)_{max}$ при горении гомогенной смеси ($\phi = 1.12$) и составила 200 мкм. На данной кривой имеется три характерные точки. При размере меньшем D_1 капли очень малы и успевают испаряться до достижения реакционной зоны фронта. При этом $\langle S_L \rangle$ соответствует гомогенному пламени при $\phi = \phi_{tot}$. Дальнейшее увеличение размера вплоть до D_2 приводит к увеличению скорости распространения, ввиду того что капли уже имеют достаточный размер для достижения зоны химического реагирования. Так как часть топлива в этом случае все ещё находится в жидкой фазе в зоне реакции, одномоментная концентрация паров топлива во фронте горения снижается. Топливозвоздушная смесь локально становится беднее (ближе к стехиометрии), что интенсифицирует процесс горения. При размере D_2 достигается локальный максимум $\langle S_L \rangle$, когда время испарения и время химического реагирования становятся примерно равны ($Da \approx 1$).

При дальнейшем увеличении размера скорость распространения падает, так как лимитирующим процессом становится испарение капель. При этом результирующее увеличение площади поверхности пламени и потребление энергии на испарение преобладает над сдвигом локального коэффициента избытка топлива ближе к стехиометрии. Уменьшение скорости наблюдается вплоть до размера D_3 . С ростом размера капель, их концентрация падает и расстояние между ними увеличивается. При размере D_3 расстояние между каплями становится значительным, что позволяет пламени двигаться в промежутках между каплями, ввиду чего влияние жидкой фазы на фронт пламени слабеет. Характерное соотношение было оценено через среднее межкапельное расстояние L и размер капель: $(L - D)/\delta_L \approx 2$.

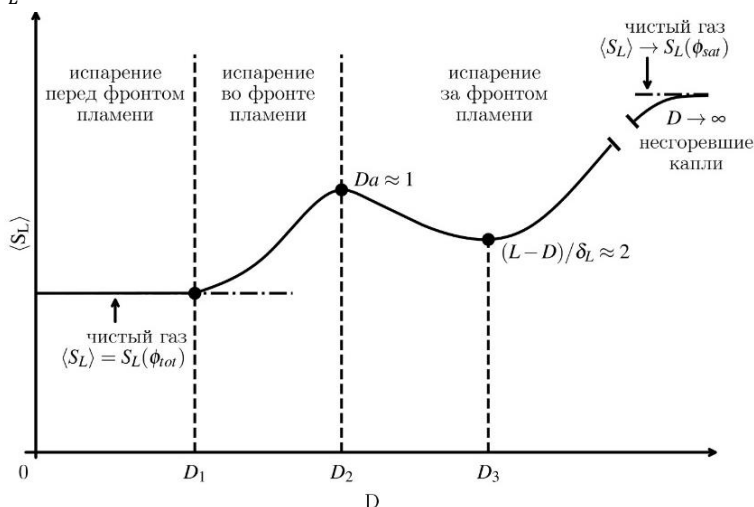


Рисунок 6. Общая зависимость средней скорости распространения пламени этанола от диаметра капель для монодисперсного аэрозоля при богатой смеси насыщенного пара топлива с воздухом.

В конечном итоге дальнейшее увеличение размера ведет к асимптотическому приближению величины средней скорости распространения к скорости распространения гомогенного пламени, в котором горит только начально инжектированное газообразное топливо ($\varphi = \varphi_{\text{sat}}$). То есть, влияние жидкой фазы полностью пропадает.

Третья глава посвящена численному исследованию плоского пламени предварительно перемешанной метановоздушной смеси в продольном относительно оси симметрии горелки электрическом поле с использованием метода прямого численного моделирования в нестационарной осесимметричной постановке. Для проведения численных исследований была реализована математическая модель, учитывающая дрейф заряженных частиц, омический нагрев и силу электрического поля. Математическая модель включала в себя модернизацию классических уравнений Навье-Стокса. Дрейф ионов был реализован в виде поправки к классическому члену диффузии, с учетом подвижности заряженных частиц, рассчитанных через соотношение Эйнштейна-Смолуховского и аппроксимацию Сазерленда динамической вязкости. Подвижность электронов считалась постоянной и равной $0.1 \text{ м}^2/(\text{В} \cdot \text{с})$.

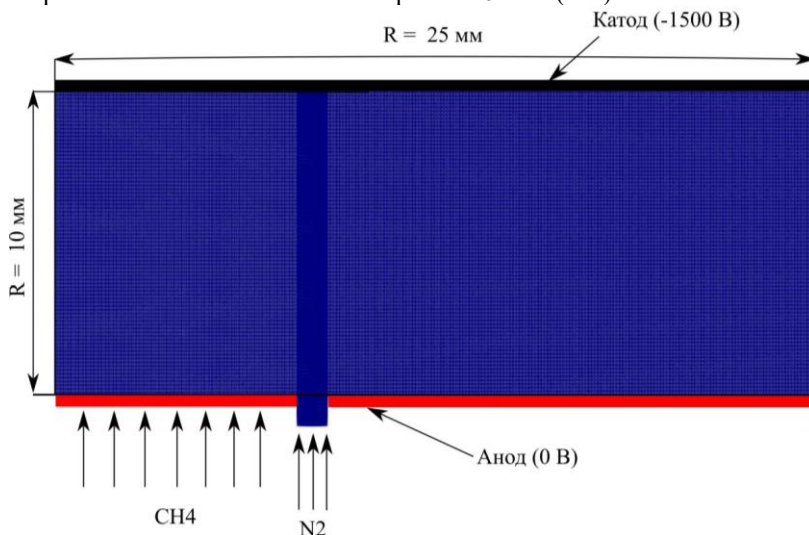


Рисунок 7. Расчетная область и сетка для плоского пламени в продольном электрическом поле.

Плоское пламя было стабилизировано на выходе термостатированной горелки типа Бота-Сполдинга. Вокруг основного

потока был организован спутный поток инертного газа. Для расчета применялась осесимметричная постановка с сектором в 1° . Схема расчетной области приведена на Рисунке 7. В качестве анода выступало само сопло, в качестве катода – набор цилиндрических трубочек, через которые мог свободно проходить газ. Исследовались режимы с широким диапазоном коэффициента избытка топлива от 0.7 до 1.3. Исследовались две модели массопереноса компонент: с эффективной диффузией и с учетом индивидуальных коэффициентов диффузии. На Рисунке 8, слева представлено сравнение экспериментальной величины тока в пламени с предсказанной моделью эффективной диффузии. Наилучшее совпадение достигается в области бедных ($\phi \leq 0.8$) и богатых ($\phi \geq 1.3$) режимов горения. Наибольший ток достигается при $\phi = 1.1$, что соответствует экспериментальным данным.

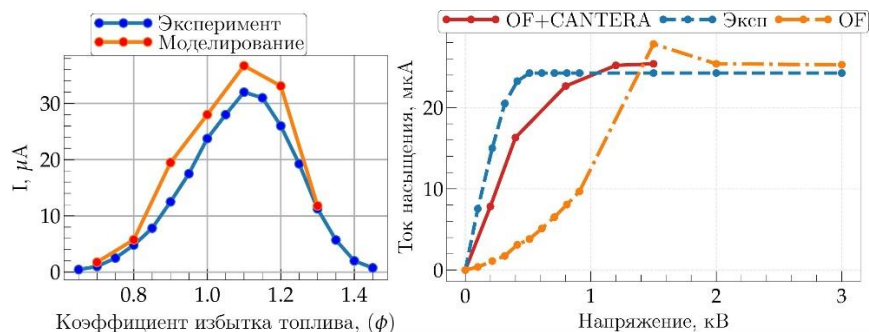


Рисунок 8. Сравнение расчетной величины электрического тока (слева) и вольтамперных характеристик (справа) с экспериментом. OF – эффективная диффузия, OF + CANTERA – индивидуальная диффузия.

Также были проанализированы концентрации промежуточных компонентов CH и O , взаимодействие которых является иницирующей реакцией образования заряженных частиц в пламени углеводородных топлив, а также радикалов H и OH для режима $\phi = 1.0$. Сравнение профилей радикалов в случае воздействия поля и без него с одномерным фронтом пламени, рассчитанном в CANTERA, продемонстрировало, что модель эффективной диффузии приводит к существенно завышенным концентрациям упомянутых выше радикалов. При этом концентрация CH возрастает при воздействии электрического поля в 4 раза до значений сопоставимых с 1D пламенем.

Модель с учетом индивидуальных коэффициентов диффузии компонентов смеси, реализована в модуле CANTERA, совмещенном с OpenFOAMv12. В этом случае для стехиометрической смеси концентрации радикалов оказываются с высокой точностью равны значениям в 1D пламени. Наибольшее относительное отклонение в 5.5% достигается для H , что обусловлено его малой массой, относительно других радикалов, что в

осесимметричной задаче приводит к более выраженной диффузии в радиальном направлении и снижению концентрации на оси горелки.

Сравнение вольтамперной характеристики, предсказанной моделями и рассчитанной в эксперименте представлены на Рисунке 8, справа. Случай учета индивидуальных коэффициентов диффузии требует меньшую разницу потенциалов между электродами для выхода на режим насыщения. Необходимое напряжение составляет 1000 В, в отличие от 1500 В для случая с эффективной диффузией. Обе модели незначительно превышают ток насыщения по сравнению с экспериментом (~ 1 мкА). Обе модели демонстрируют отсутствие влияния на форму фронта пламени при воздействии поля, что согласуется с экспериментом, и предсказывают близкое максимальное значение концентрации положительных и отрицательных зарядов в пламени.

Серьезным недостатком модели с индивидуальными коэффициентами диффузии является существенно меньшая стабильность расчета. При одинаковых численных схемах требуется на порядок меньший шаг по времени, чем при использовании модели эффективной диффузии для достижения решения. Это делает модель эффективной диффузии более предпочтительной для использования при расчетах больших трехмерных задач.

Четвертая глава представляет результаты численного исследования методом прямого численного моделирования в нестационарной постановке трехмерного ламинарного пламени Бунзена предварительно перемешанной смеси метан/воздух в поперечном (относительно оси симметрии горелки) электрическом поле с использованием реализованной модели эффективной диффузии. Схема эксперимента представлена на Рисунке 9. В качестве горелочного устройства применялось аналогичное сопло, представленное в Главе 2. Расстояние между пластинами в эксперименте составляло 40 мм при разности напряжения 2500 В, что соответствовало постоянной напряженности электрического поля 62.5 кВ/м.

Для моделирования использовался аналогичный цилиндрический осесимметричный домен с расчетной сеткой, представленной в Главе 2. Внешний диаметр составлял 218 мм. Ось y совпадала с осью сопла, ось x направлена по нормали к электродам. Данный домен был использован ввиду отдаления граничных стенок от сопла, что значительно увеличивает стабильность расчета. На внешней стороне цилиндра потенциал устанавливался таким образом, чтобы создавать однородное электрическое поле постоянной величины. В численных расчетах исследовались два случая напряженности электрического поля: 62.5 кВ/м (как в эксперименте) и 125 кВ/м. В качестве химического механизма использовалась комбинация механизмов Lu и Law, 2008 для нейтральной химии и механизма Prager, 2007 для ионной химии. Радиационный теплообмен не учитывался.

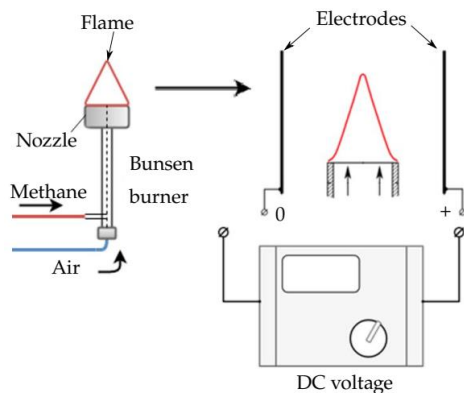


Рисунок 9. Схема экспериментальной установки для пламени Бунзена в поперечном электрическом поле.

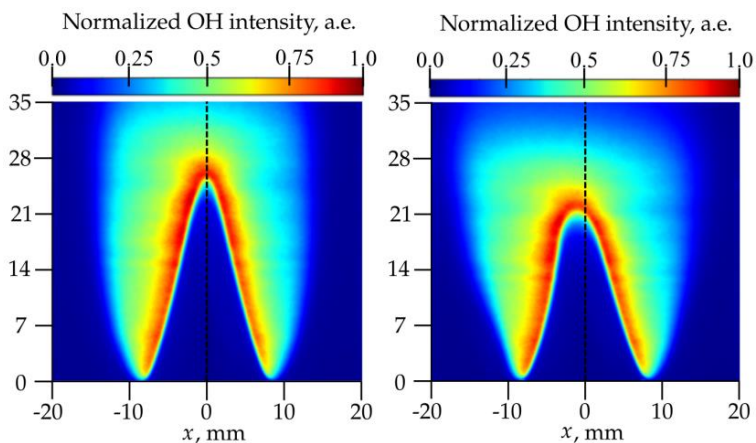


Рисунок 10. Интенсивность флуоресценции OH: без электрического поля (слева) и в поле (справа).

Экспериментальными методами OH PLIF (Рисунок 10) и PIV было получено распределение поля температуры и скорости ($\vec{u}$) при воздействии на пламя внешнего электрического поля и при его отсутствии. Экспериментально полученное нормализованное на адиабатическую поле температуры ($T_{ad} = 2240$ K) с линиями тока, построенными по полю скорости представлено на Рисунке 11. При приложении электрического поля высота пламени в эксперименте уменьшается с 25 мм до 22 мм, при этом область вблизи вершины конуса размывается и смещается примерно на 2 мм от оси сопла в направлении катода. Линии тока (белый цвет) перед фронтом пламени не изменяются. Линии тока за фронтом пламени расширяются, что

указывает на действие силы, притягивающей пламя как к аноду, так и к катоду. Распределение линий тока становится асимметричным (Рисунок 11b). Линии тока вблизи оси симметрии (черный пунктир) преимущественно искривляются в сторону катода, что указывает на доминирование силы, действующей в его направлении.

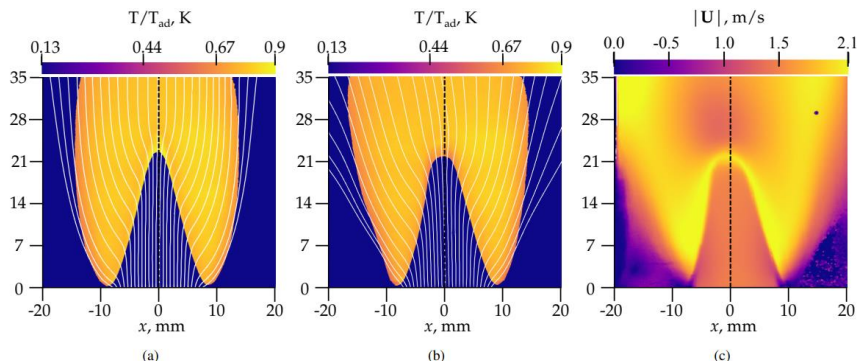


Рисунок 11. Экспериментальное распределение полей температуры (a, b) и скорости (c): без электрического поля (a), в электрическом поле (b, c).

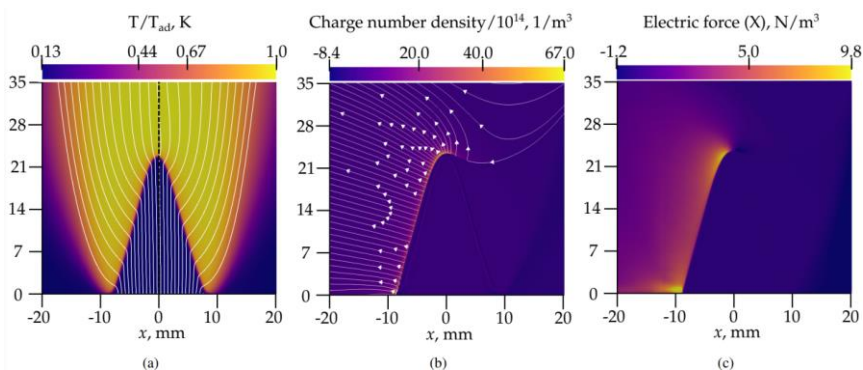


Рисунок 12. Расчетное поле температуры с линиями тока (a), плотность числа зарядов с линиями электрического поля (b) и x -компонента электрической силы (c) в поле $E = 62.5 \text{ кВ/м}$.

В численном моделировании при $E = 62.5 \text{ кВ/м}$ (Рисунок 12) форма пламени практически не меняется, однако наблюдается разделение зарядов: за фронтом горения со стороны катода возникает нескомпенсированный положительный заряд плотностью $1.07 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^3$. Поле электрической силы прямо коррелирует с концентрацией заряда, и ее максимальная величина находится в областях максимальной плотности заряда. У вершины пламени наблюдается смена знака x -компоненты электрической силы (Рисунок 12c) из-за смены знака компоненты электрического поля. В

результате на вершину действуют две противоположно направленные силы вдоль оси x с различием амплитуд примерно на порядок (9.8 Н/м^3 и -1.2 Н/м^3). При этом электрическое поле внутри конуса пламени полностью экранируется. Расчетные данные показывают, что электроны, достигающие внешнего слоя смещения, образуют отрицательные заряженные O^-_2 , CHO^-_3 и CO^-_3 .

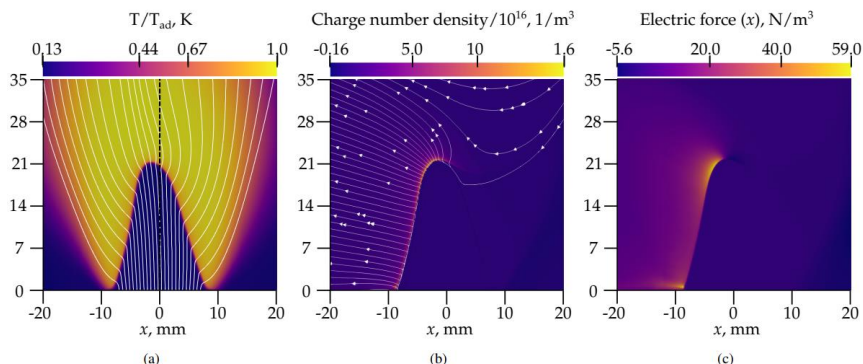


Рисунок 13. Расчетное поле температуры с линиями тока (а), плотность числа зарядов с линиями электрического поля (б) и x -компонента электрической силы (с) в поле $E = 125 \text{ кВ/м}$.

При $E = 125 \text{ кВ/м}$ происходит заметная деформация: вершина конуса смещается на 2 мм в сторону катода, высота пламени уменьшается с 23 мм до 21 мм, зона горения расширяется. Смоделированная форма пламени (Рисунок 13а) с высокой точностью повторяет экспериментальную (Рисунок 10, справа). При этом в сечении $y = 12 \text{ мм}$ над срезом сопла форма фронта пламени изменяется с круглой на эллиптическую. Видимое размытие конуса объясняется действием возросшей электрической силы. По сравнению со случаем внешнего поля 62.5 кВ/м максимальная величина силы в направлении оси x увеличивается с 9.8 Н/м^3 до 59.0 Н/м^3 , тогда как ее минимальное значение изменяется с -1.2 Н/м^3 до -5.6 Н/м^3 . Несмотря на это, отношение максимальной и минимальной величины x -компоненты силы, действующих на вершину, остается практически неизменным, изменяясь от -8.1 до -10.5 . Максимальная плотность числа зарядов возрастает с $6.7 \cdot 10^{15} \text{ 1/м}^3$ до $1.60 \cdot 10^{16} \text{ 1/м}^3$, что соответствует увеличению плотности заряда с $1.07 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^3$ до $2.57 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^3$. При данной напряженности поля отрицательные ионы O^-_2 , CHO^-_3 и CO^-_3 двигаясь во внешнем слое смещения уширяют зону горения в направлении анода. Электрическое поле также полностью экранируется внутри области конуса пламени.

На Рисунке 14б показана нормальная к фронту скорость потока, рассчитанная по контурам изотерм $T = 350 \text{ К}$ (Рисунок 14а, белая линия) для

моделируемых (S) случаев без электрического поля (E_{off}) и с электрическим полем 125 кВ/м (E_{on}). В случае без электрического поля нормальная к фронту скорость составляет примерно 36 см/с в областях, удаленных от вершины пламени. Это значение согласуется со скоростью распространения свободно распространяющегося ламинарного метановоздушного пламени при $\phi = 1$. Ближе к вершине пламени эта компонента значительно возрастает в результате резкого увеличения кривизны фронта пламени. Приложение электрического поля ($E = 125$ кВ/м) существенно изменяет этот профиль. Область повышенной скорости расширяется, а максимальное значение увеличивается на 15 см/с.

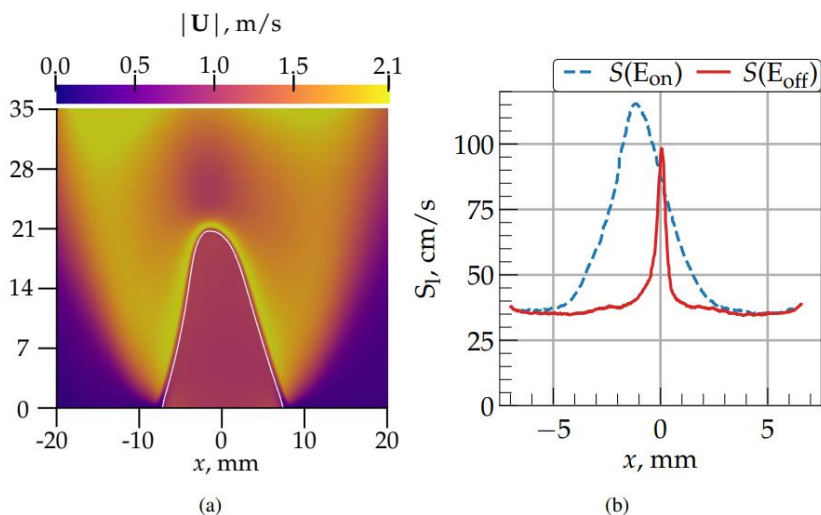


Рисунок 14. Расчетное распределение модуля скорости с изотермой $T = 350$ К (белая линия) при $E = 125$ кВ/м (а) и нормальная к фронту скорость для случаев с электрическим полем и без него ($E_{\text{on}}/E_{\text{off}}$) (b).

Сравнение профилей скорости, полученных в расчете и методом PIV в плоскости $z = 0$ на высоте 30 мм, показал хорошее соответствие компонент скорости U_x и U_y (Рисунок 15). Сравнение профилей температуры на той же высоте показало значительное завышение значения в расчете по сравнению с экспериментом, что объясняется отсутствием учета радиационного теплообмена. Расчетные данные аналогично эксперименту предсказывают увеличение внешней зоны горения с доминирующей компонентой в направлении катода.

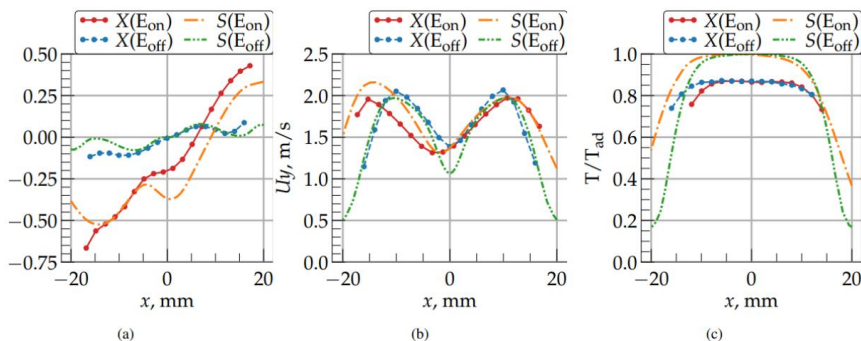


Рисунок 15. Сравнение экспериментальных (X) и расчетных (S) данных при наличии и отсутствии электрического поля (E_{on}/E_{off}) на высоте 30 мм в плоскости $z = 0$: U_x (a), U_y (b), температура (c).

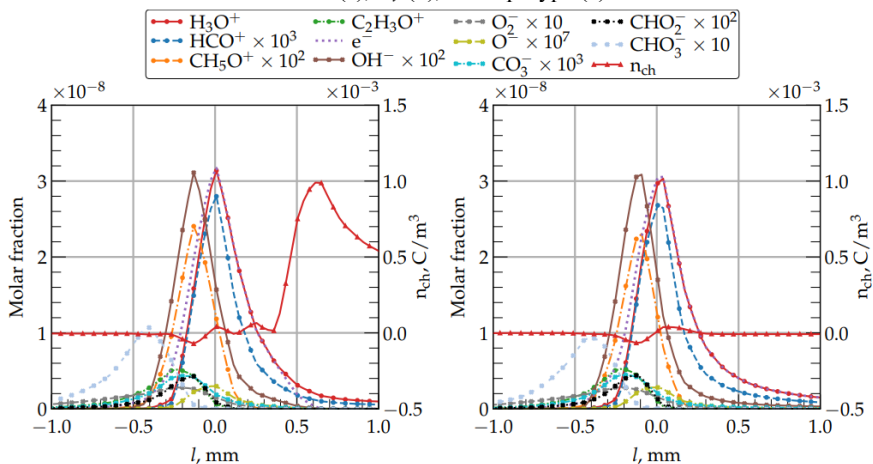


Рисунок 16. Расчетные профили концентрации заряженных частиц и плотности заряда в области фронта пламени для линий тока, исходящих из координат $(-4, 0, 0)$ мм (слева) и $(4, 0, 0)$ мм (справа).

Анализ профилей заряженных компонент смеси и плотности заряда (n_{ch}) во фронте горения для линий тока, исходящих из координат $(-4, 0, 0)$ и $(4, 0, 0)$ представлен на Рисунке 16. Для линии тока, исходящей из точки $(-4, 0, 0)$, что ближе к катоду, концентрация электронов резко падает до нуля за фронтом пламени при $l = 0.65$ мм. Для линии тока, расположенной ближе к аноду, наоборот, для электронов наблюдается плавная нисходящая тенденция, которая совпадает с тенденцией для H_3O^+ с максимальной молярной долей $3 \cdot 10^{-8}$ моль/моль. Это приводит к формированию положительной концентрации заряда со значением 10^{-3} Кл/м³ в продуктах горения непосредственно за фронтом пламени на стороне катода (Рисунок 16, слева). Концентрация заряда на стороне анода за фронтом пламени

остается нулевой (Рисунок 16, справа). Распределения ионов не демонстрируют заметных изменений. Фронт пламени остается электронейтральным.

Расчетные данные демонстрируют точное совпадение по деформации формы пламени при внешней напряженности поля в расчете дважды превышающее экспериментальное. Анализ чувствительности показал, что основными факторами влияния оказывается различие экспериментальной и расчетной геометрии, а также модель диффузии компонент смеси. Большее расстояние между электродами позволяет находится большему заряду в домене, что сильнее экранирует поле. Отсутствие учета радиационного теплообмена не влияет на картину, так как не приводит к заметному изменению концентраций CH и O , и, как следствие, заряженных частиц.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты работы:

1. На основе численного моделирования были получены данные о влиянии инъекции части топлива в виде монодисперсных капель на осредненную скорость распространения, температуру и структуру пламени. Описан эффект увеличения средней скорости распространения пламени при инъекции части топлива в виде капель. Установлено, что инъекция капель определенного размера приводит к достижению локального максимума осредненной скорости распространения пламени. Установлена прямая корреляция величины средней скорости распространения пламени и средней концентрации радикалов H , O и OH во фронте пламени.
2. Предложена общая зависимость средней скорости распространения пламени от размера капель топлива для газочапельной этаноловоздушной смеси. Установлено, что локальный максимум средней скорости распространения соответствует размеру капель топлива, при котором времена химического реагирования смеси и испарения капель приблизительно равны.
3. Реализованы две численные модели описания динамики пламен в слабых электрических полях, основанные на модели общей эффективной диффузии, и учете индивидуальных коэффициентов диффузии. Установлено, что обе модели применимы для расчета движения фронта пламени и силы электрического тока (при напряженности электрического поля 1.5 кВ/см и более). При этом детальная модель с учетом индивидуальных коэффициентов диффузии требует практически на порядок более подробного шага по времени.
4. На основе разработанной модели эффективной диффузии было выполнено численное исследование ламинарного конусного метановоздушного пламени в поперечном электрическом поле. Получены

количественные оценки эффекта разделения зарядов в фронте пламени. Определен механизм деформации формы конусного пламени:

- Установлено практически полное экранирование электрического поля внутри конуса пламени.
- Обнаружено, что фронт пламени остается практически электронейтральным, в то время как за фронтом пламени возникает положительный заряд (главным образом H_3O^+) со стороны катода.
- Наибольший заряд образуется в области максимальной кривизны фронта пламени (вершина конуса), где имеет эффект смены знака вектора электрического поля, что в свою очередь приводит к изменению формы вершины конуса, сопряженному с существенным увеличением локальной скорости распространения пламени.
- Обнаружено, что движение зарядов в продуктах горения приводит к возникновению ионного ветра в направлении обоих электродов. Продемонстрирована важность учета отрицательных ионов O_2^- , CHO_3^- и CO_3^- для корректного описания переноса импульса в направлении анода.

Список публикаций автора диссертации, в которых отражены основные научные результаты диссертаций

1. **Пonomarev A. A.**, Sharaborin D. K., Khrebtov M. Yu, Mullyadzhyanov R. I., Dulin V. M. Numerical study of ethanol suspension combustion in air // Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2023. – V. 59. – №. 2. – P. 129-136.
2. **Пономарев А. А.**, Хребтов М. Ю., Мулляджанов Р. И., Дулин В. М. Численное моделирование конусного пламени газокapельной взвеси этанола в воздухе. Сравнение с горением газовой смеси // Физика горения и взрыва. – 2025. – Т. 61. – №. 3. – P. 6-13.
3. **Пономарев А. А.**, Хребтов М. Ю., Мулляджанов Р. И., Дулин В. М. Численное исследование эффекта увеличения скорости распространения пламени этанола в дисперсной среде // Сборник трудов XVII Всероссийской конференции «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидродинамики». – 2023. – P. 102-106.
4. **Пономарев А. А.**, Мулляджанов Р. И., Дулин В. М. Моделирование Бунзеновского Пламени Метана в слабом поперечном электрическом поле // Горение и взрыв. 2025. – Т. 18. – №. 2. – P. 3–12.
5. **Пономарев А. А.**, Мулляджанов Р. И., Дулин В. М. Численное исследование структуры пламени газовой смеси и газокapельной взвеси при одинаковой скорости распространения пламени в богатых режимах // Proceedings of the 10th international seminar on flame structure, Novosibirsk, 2023, P173-178.

6. **Пономарев А.А.**, Черепанов А.В., Мулладжанов Р.И., Дулин В.М. Моделирование плоского пламени метановоздушной смеси в продольном электрическом поле // Теплофизика и аэромеханика 2025. Т. 32, Р. 1089-1094
7. **Ponomarev A. A.**, Sharaborin D. K., Mullyadzhannov R. I., Dulin V. M. Experimental and numerical investigation of a weak DC electric field effects on a premixed Bunsen flame //Combustion and Flame. – 2026. – V. 291. – P. 115124.
8. **Ponomarev A.**, Mullyadzhannov R. Validation of the Simplified and Detailed Models of Mixed Polymer Combustion in a Small Fire in a Cargo Compartment //Fire. – 2025. – V. 8. – №. 10. – P. 403.