Отзыв на диссертацию

Пономарева Андрея Артемьевича на тему: «Численное исследование ламинарного пламени в условиях возмущения слабым электрическим полем», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа Пономарева А.А. посвящена численному исследованию структуры и скорости распространения ламинарного пламени в условиях внешних возмущений: при наличии дисперсной фазы в виде капель топлива и при воздействии слабого электрического поля. Работа выполнена на стыке теплофизики, физики горения и вычислительной гидродинамики, что определяет её междисциплинарный характер и высокую научную значимость.

Актуальность темы исследования обусловлена необходимостью детального понимания механизмов управления процессами горения в современных энергетических установках. Инжекция части топлива в виде капель и наложение слабого электрического поля являются перспективными способами воздействия на пламя, позволяющими интенсифицировать горение, расширить пределы устойчивости и снизить выбросы вредных веществ. Несмотря на значительное количество экспериментальных и теоретических работ, в литературе отсутствуют детальные численные исследования ламинарных пламен, возмущенных указанными выше способами с полным разрешением тонкой структуры фронта пламени. Результаты, полученные в работе Пономарева А.А. открывают новые данные о фундаментальных процессах, происходящих при взаимодействии капель топлива либо внешнего электрического поля с пламенем, ввиду чего тема диссертации представляется высоко актуальной.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов обеспечивается комплексным подходом, сочетающим современные методы вычислительной гидродинамики с тщательной валидацией по экспериментальным данным. Автором использованы апробированные подходы: метод прямого численного моделирования для разрешения тонкой структуры фронта пламени, Эйлерово-Лагранжево описание для газокапельных смесей, и применение детальных кинетических механизмов, в том числе с учётом ионной химии. Полученные расчетные данные были подтверждены путём сравнения с данными анемометрии по изображениям частиц (PIV), плоской лазерно-индуцированной флюоресценции (PLIF) OH и вольтамперных характеристик. Также результаты согласуются с известными литературными данными, что свидетельствует об их обоснованности и достоверности.

Научная новизна работы заключена в следующем:

1. Впервые на основе параметрического численного исследования предложена общая модельная кривая, описывающая зависимость осредненной скорости распространения пламени этанола от размера монодисперсных капель топлива для богатых режимов горения, и определены три критических диаметра капель, соответствующих смене тренда этой кривой.
2. Впервые методом прямого численного моделирования в двумерной постановке исследовано влияние слабого продольного электрического поля на структуру плоского метановоздушного пламени. Установлено влияние модели диффузии на точность описания тока насыщения.
3. Впервые численно описан эффект деформации пламени Бунзена под действием поперечного электрического поля. Численно продемонстрировано экранирование поля внутри конуса пламени и возникновение нескомпенсированного положительного заряда в продуктах реакции.
4. Продемонстрировано, что фронт пламени остаётся практически электронейтральным, а наибольший заряд формируется в области максимальной кривизны, что приводит к локальному увеличению скорости распространения.

Научная и практическая значимость

Полученные данные расширяют фундаментальные представления о процессах горения в условиях воздействия слабого электрического поля. Результаты могут служить основой для разработки новых методов управления режимами горения, подавления неустойчивостей, стабилизации пламени и снижения выбросов вредных веществ в энергетических установках. Также важность и ценность полученных Пономаревым А.А. результатов подтверждается публикациями в ведущих рецензируемых научных журналах и обсуждением на конференциях.

Оценка содержания диссертации

Диссертация изложена на 131 странице, состоит из четырех глав, заключения и списка литературы. Структура работы логична и полностью отражает ход исследований соискателя.

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель и задачи, научная новизна, практическая значимость, положения, выносимые на защиту, а также описаны методология и методы исследования.

В первой главе представлен подробный обзор литературы по горению газокапельных смесей и пламенам в слабом электрическом поле. Рассмотрены классические и современные работы, описаны основные эффекты: влияние размера капель на скорость распространения, концепция эффективного коэффициента избытка топлива, роль заряженных частиц и

хемиионизации. Сделан вывод о необходимости детальных численных исследований с разрешением структуры фронта.

Во второй главе описано численное моделирование ламинарного пламени Бунзена для предварительно перемешанных смесей этанола с воздухом в присутствии капель топлива. Представлена математическая модель, включающая уравнения Навье-Стокса, модели испарения капель, радиационного теплопереноса. Проведена валидация по экспериментальным данным. Проведено параметрическое численное исследование с варьированием размера капель этанола при сохранении полного расхода топлива и окислителя. Установлена немонотонная зависимость средней скорости распространения пламени от диаметра капель, предложена модельная кривая с тремя критическими точками. Показано, что локальный максимум скорости достигается при приблизительном равенстве времён испарения и химического реагирования, что соответствует значению второго числа Дамкёллера по испарению $Da \approx 1$.

В третьей главе продемонстрированы результаты моделирования плоского метановоздушного пламени в продольном электрическом поле. Модифицирован решатель для учёта электрических сил и омического нагрева. Проведено сравнение двух моделей диффузии: эффективной и с индивидуальными коэффициентами. Показано, что модель эффективной диффузии адекватно предсказывает величину тока, но требует большего напряжения для выхода на насыщение, тогда как детальная модель лучше согласуется с вольтамперными характеристиками, но менее устойчива. Обе модели предсказывают отсутствие влияния поля на форму плоского фронта.

В четвертой главе представлены результаты численного моделирования по воздействию слабого поперечного электрического поля на ламинарное пламя Бунзена метановоздушной смеси, валидированные по результатам PIV и OH PLIF. Численно продемонстрировано экранирование электрического поля внутри конуса пламени, формирование положительного объёмного заряда за фронтом и его влияние на деформацию вершины конуса. Показано, что заряды в продуктах сгорания движутся к обоим электродам, что расширяет зону горения. Расхождение между расчётом и экспериментом по необходимой напряжённости поля объяснено различием геометрии и ограничениями модели эффективной диффузии.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, которые полностью соответствуют поставленным задачам.

При общей высокой оценке работы имеются следующие **замечания и вопросы по работе**:

1. В диссертации на странице 58 представлен детальный анализ влияния размеров капель топлива на структуру фронта пламени. Автору следовало бы включить в текст

диссертации тщательное обоснование выбора характерных размеров топливных капель, которые были использованы в процессе моделирования.

2. В главе 3, посвященной математическому моделированию динамики горения метановоздушной смеси в условиях воздействия продольного электрического поля, особое внимание уделяется исследованию влияния следующей конфигурации электродов: анод расположен в нижней части горелки, а катод — в верхней. Однако, для обеспечения полноты анализа, необходимо также рассмотреть и провести детальный анализ зеркального варианта вышеприведенной конфигурации, при котором катод расположен у основания горелки, а анод — в верхней ее части. Такой подход позволяет провести всестороннее исследование влияния поляризации электродов на процессы горения.
3. На рисунке 42 (страница 89) приведены поля плотности электронов, а также концентраций O_2^- и H_3O^+. Анализ рисунков показывает, что в направлении от условной оси симметрии пламени к аноду концентрация электронов наибольшая, что объясняется процессом компенсации заряда. Однако можно заметить, что и концентрация положительно заряженных ионов гидроксония также значительна в направлении к катоду. К сожалению, автор не объясняет этого эффекта.
4. На рисунке 44 приведено поле концентрации трехокиси углерода. Автор при анализе полученных результатов, к сожалению, не акцентировал внимание на резкий, можно сказать, скачкообразный рост концентрации CO_3^- на условной границе системы «пламя – внешняя среда».
5. Необходимо внести некоторые уточнения в описание математической модели. Например, на странице 39 в формуле (16), описывающей силу аэродинамического сопротивления, приведен параметр $A_к$ – площадь поверхности капли. При этом, как правило, при расчете скорости движения капель используется площадь миделевого сечения эквивалентной сферы.
6. В уравнении (16), описывающем нагрев капли топлива, радиационная составляющая теплового потока от внешней среды стоит со знаком минус. Другими словами, происходит охлаждение капли, не является ли это опечаткой.

Указанные вопросы и замечания не снижают общей высокой научной и практической значимости диссертационной работы.

Заключение

Диссертационная работа Пономарева Андрея Артемьевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача, в которой решена актуальная задача детального исследования структуры и скорости распространения

ламинарного пламени в условиях возмущения слабым электрическим полем и при наличии капель топлива. Получены новые фундаментальные результаты, имеющие важное значение для теории горения и развития методов управления процессами горения.

Диссертация соответствует требованиям, установленным п.п 9-11, 13, 14 «Положения о присуждении ученых степеней» (Постановление Правительства РФ №842 от 24.09.2013г. в действующей редакции), предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук. Основываясь на изученном тексте диссертации, автореферата и опубликованных работ по теме диссертации, **считаю, что ее автор, Пономарев Андрей Артемьевич, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника**.

Официальный оппонент:
Доктор технических наук (1.04.14. Теплофизика и теоретическая теплотехника), Сыродой Семен Владимирович, профессор Научно-образовательного центра И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики Национального исследовательского Томского политехнического университета.
e-mail: ssyrodoy@yandex.ru

_____ / Сыродой С.В.
«14» 10 2026г.

Подпись, ученую степень и должность Сыродоя С.В. заверяю: Ученый секретарь Ученого совета ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский Политехнический университет» Новикова Валерия Дмитриевна, канд. геол.-минерал. наук.

_____ / Новикова В.Д.
«14» 10 2026г.

Научно-образовательный центр И.Н. Бутакова Инженерной школы энергетики ФГБОУ ВО Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 634034, Томск, пр-т. Ленина, дом 30, корпус №4, +7(3822)701-777, доп 1663, e-mail: taylasheva@tpu.ru, сайт организации: https://tpu.ru/university/structure/department/view/?id=8025.

Я, Сыродой Семен Владимирович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой Пономарева Андрея Артемьевича, и их дальнейшую обработку.