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 взаимодействия ламинарного пламени с дисперсной фазой топлива в виде монодисперсных капель и с внешним электрическим полем. Работа сочетает методы численного моделирования с разрешением тонкой структуры фронта пламени и валидацию расчетных данных по экспериментальным. Работа демонстрирует новые фундаментальные знания о воздействии на пламя капель топлива и внешнего слабого электрического поля, важные для развития теории горения.

Актуальность темы исследования определяется требованием развития методов управления процессами горения в энергетических установках для повышения эффективности и снижения вредных выбросов. Воздействие на пламя с помощью капель топлива или электрических полей является перспективным, но недостаточно изученным направлением, особенно в области численного моделирования. Существующие численные работы, как правило, ограничены одномерными постановками или упрощёнными моделями химии и уравнений переноса. В связи с этим актуальность диссертации Пономарева А.А., в которой проводится исследование влияние различных факторов на пламена в многомерных постановках, не вызывает сомнений.

Обоснованность и достоверность полученных результатов и выводов подтверждается использованием апробированных программных пакетов (OpenFOAM, CANTERA), анализом сеточной сходимости и валидацией расчетов по экспериментальным данным, полученными методами анемометрии по изображениям частиц (PIV) и плоской лазерно-индуцированной флюоресценции (PLIF) OH, а также с измерениями вольтамперных характеристик и токов насыщения. Автор корректно формулирует начальные и граничные условия в соответствии с экспериментами. Также полученные результаты согласуются с уже известными данными из литературы. Всё это обеспечивает высокую степень обоснованности сделанных выводов.

Научная новизна:

1. Впервые выполнено трёхмерное прямое численное моделирование конусного пламени Бунзена для богатой газокапельной этаноловоздушной смеси с детальным учётом испарения капель и химической кинетики, что позволило установить немонотонную зависимость

средней скорости распространения пламени от диаметра монодисперсных капель и предложить обобщённую модельную кривую для богатых режимов.

2. Впервые реализована и протестирована численная модель для описания динамики плоского метановоздушного пламени методом прямого численного моделирования в продольном электрическом поле с учётом ионной химии.

3. Впервые численно воспроизведён эффект деформации пламени Бунзена в поперечном электрическом поле и обнаружено формирование нескомпенсированного положительного заряда в продуктах реакции, что объясняет наблюдаемую деформацию фронта и локальное увеличение скорости распространения.

4. Впервые численно продемонстрировано экранирование электрического поля внутри конуса пламени Бунзена.

Научная и практическая значимость

Полученные результаты углубляют понимание физико-химических механизмов, определяющих поведение пламени в условиях внешних возмущений. Разработанные численные методики могут быть использованы для оптимизации камер сгорания, систем впрыска топлива и устройств управления горением с помощью электрического поля. Практическая и научная ценность подтверждается публикациями в ведущих рецензируемых журналах и апробацией на международных конференциях.

Оценка содержания диссертации

Диссертация изложена на 131 странице, имеет 48 иллюстраций и одну таблицу, состоит из четырех глав, заключения и списка литературы.

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

В первой главе представлен детальный обзор литературы по воздействию на пламя и режимы горения дисперсной фазы топлива в виде капель, а также слабого электрического поля. Рассмотрены как классические, так и современные работы. Описаны работы по изучению влияние размера капель на скорость распространения, роли ионного ветра и хемионизации в процессах изменения гидродинамики реагирующих потоков. Сделан вывод о необходимости систематических численных исследований пламен в условиях упомянутых воздействий с разрешением тонкой структуры фронта.

Во второй главе описана математическая модель и результаты трёхмерного моделирования ламинарного пламени Бунзена для предварительно перемешанных смесей этанола с воздухом в присутствии капель топлива при варьировании их размера. Представлены уравнения массотеплопереноса. Проведена валидация расчетных данных по

эксперименту. Для параметрического исследования влияния размера капель использовался режим с насыщенными парами топлива в газовой фазе, так как он позволял однозначно задать начальные и граничные условия. По итогам параметрического исследования установлена немонотонная зависимость средней скорости распространения пламени от диаметра капель, предложена модельная кривая с тремя характерными размерами капель. Продемонстрировано, что локальный максимум средней скорости достигается при приблизительном равенстве характерных времен испарения и химического реагирования.

В третьей главе выполнено моделирование плоского метановоздушного пламени в продольном электрическом поле. Специальным образом модифицирован решатель для учёта действия 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 вольтамперной характеристикой, но требует на порядок меньший временной шаг для достижения стабильного решения.

В четвертой главе представлено совместное экспериментальное и численное исследование влияния слабого поперечного электрического поля на ламинарное пламя Бунзена метановоздушной смеси на основе разработанной модели эффективной диффузии. Описаны натурные эксперименты с PIV и OH PLIF. Описана методика расчёта. Обнаружено формирование положительного объёмного заряда за фронтом пламени в области максимальной кривизны и описано его влияние на деформацию вершины конуса. Показано, что движение зарядов в продуктах сгорания создаёт поток зарядов к обоим электродам, что расширяет зону горения. Двойное по величине различие необходимой напряженности электрического поля в расчете, необходимой для аналогичной деформации пламени в эксперименте, наиболее вероятно объясняется ограничениями модели эффективной диффузии и различие геометрии.

В заключении сформулированы основные результаты и выводы, которые полностью соответствуют поставленным задачам и согласуются с текстом диссертации.

По работе имеются следующие **замечания и вопросы**:

1. Название работы не в полной мере отражает содержании исследований, выполненных во второй главе, посвященной влиянию дисперсных частиц на фронт ламинарного пламени. Название диссертации, следовало сделать более общим. В связи с этим логичным бы выглядело наличие главы или раздела по влиянию электрического поля на ламинарное пламя с присутствием капель.

2. Общее по диссертации замечание относится к скудному описанию экспериментальных и численных методик используемых автором. Много важных деталей при описании постановки эксперимента и математических моделей было упущено.

3. Так в частности ключевым вопросом является вопрос о концентрации и распределении капель по размеру в экспериментальном исследовании. Судя по описанию, автор может лишь очень приближенно оценить реальную концентрацию капель в эксперименте. Тоже самое относится и к их размеру. Утверждение о монодисперсности капель вызывает сомнения.

4. Неясно, почему автор не рассматривает в качестве одного из возможных механизмов увеличения скорости пламени, влияние капель на турбулентные пульсации потока?

5. Огорчает отсутствие или поверхностное описание многих важных для численного моделирования методических деталей (шаг по времени, численные решатели, схемы аппроксимации, граничные условия, моделей химической кинетики и др.) и результатов исследования их влияния на результаты моделирования в целом.

6. Не описана модель радиационного теплообмена. Насколько большое влияние он играет в рассматриваемых задачах?

7. Переход от уравнения Нернста — Планка к уравнению (24) нуждается в обосновании. Почему исчез нестационарный член и конвективный поток?

8. Второе слагаемое в уравнении (24) является электромиграционным потоком, но никак не “поправкой к классической диффузии”.

9. Детальное описание редуцированного механизма химической кинетики горения метана в электрическом поле отсутствует. Учитывает ли используемый механизм/механизмы влияние напряженности электрического поля на кинетические параметры скоростей реакций?

10. Нет объяснения, почему для моделирования горения метана в продольном поле использовался механизм из работы [217], а для моделирования горения в поперечном поле из работы [261]. В чем их принципиальная разница?

Заключение

Диссертационная работа Пономарева Андрея Артемьевича является завершенной научно-квалификационной работой, в которой решена актуальная задача — установлены закономерности влияния дисперсной фазы топлива в виде монодисперсных капель и слабого электрического поля на структуру и скорость распространения ламинарного пламени. Полученные результаты расширяют фундаментальные представления о процессах горения в условиях воздействия капель топлива и электрического поля и создают основу для разработки новых методов управления горением в энергетических установках. **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 физико-математических наук (1.1.9. Механика жидкости, газа и плазмы), профессор Минаков Андрей Викторович, Профессор кафедры теплофизики, директор института инженерной физики и радиоэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Сибирский федеральный университет.
Электронная почта: tov-andrey@yandex.ru

_____/ Минаков А.В.
«26»октября 2026г.

Подпись, ученую степень и должность Минакова А.В. _____/ФИО
заверяю: «___» _____ 2026г.

Институт инженерной физики и радиоэлектроники Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования Сибирский федеральный университет, 660041, г. Красноярск, ул. Академика Киренского, д. 28, +7 (391) 206-45-87, e-mail: tov-andrey@yandex.ru, сайт организации: https://efir.sfu-kras.ru/.

Я, Минаков Андрей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой Пономарева Андрея Артемьевича, и их дальнейшую обработку.

ФГАОУ ВО СФУ
Подпись заверяю
Делопроизводитель
«26» 10 2026