

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Филимоновой Елены Александровны

«Кинетика процессов горения, конверсии оксидов азота и углеводов, стимулированных наносекундными разрядами»

представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – «Физика плазмы»

На протяжении нескольких десятилетий вопросы экологии остаются на повестке дня мирового сообщества. Более того, в связи с глобальным потеплением и изменением климата эти вопросы приобретают все большую актуальность. Среди них важную роль играют такие задачи, как снижение загрязнения атмосферы выбросами промышленных производств и двигателей внутреннего сгорания, а также уменьшение энергетических потерь за счет оптимизации процессов воспламенения и горения. Диссертация Е.А. Филимоновой посвящена теоретическому исследованию кинетических процессов, лежащих в основе конверсии токсичных примесей в воздухе и продуктах сгорания, а также воспламенения и горения в топливных смесях при их обработке наносекундными разрядами. Поэтому актуальность работы не вызывает сомнений. Выбор именно наносекундных газовых разрядов связан с тем, что они являются не только эффективными источниками сильнонеравновесной плазмы, но и позволяют создавать ее в контролируемых условиях, когда можно управлять вводом энергии в определенные степени свободы.

Диссертация состоит из введения, восьми глав, заключения, двух приложений, списка работ, опубликованных по теме диссертации, и списка использованных источников. Во введении обосновывается актуальность темы диссертационной работы, формулируются цель и задачи исследования, показывается новизна результатов, а также приводятся выносимые на защиту положения, научная и практическая ценность результатов, объясняется личный вклад автора и обсуждается структура диссертации.

В первой главе диссертации приводится обзор существующих работ по плазменным методам очистки воздуха и продуктов сгорания от токсичных газов и примесей. Значительное внимание уделяется проблемам стимулированного плазмой воспламенения и горения. Описываются существующие методы численного моделирования взаимодействия наносекундных (в основном – стримерных) разрядов с химически

активными газовыми средами. Обсуждаются различные плазмохимические реакторы для конверсии NO_x и органических соединений на основе различных газовых разрядов атмосферного давления.

Во второй главе рассматривается модель химической кинетики, описывающая окисление и горение в газовых смесях углеводородов с воздухом. При этом не только используются существующие базы данных, но и создана собственная модель, позволяющая описывать плазменную очистку газов от вредных примесей. Исходная база данных содержит примерно 2500 реакций и 250 компонентов, куда входят нейтральные и заряженные частицы, в том числе – возбужденные молекулы и радикалы. Представленная кинетическая модель позволяет описывать горение метана, ацетилена, этана, пропана, бутана и ацетальдегида. Описываются различные тесты кинетической модели при сравнении расчетов с экспериментальными данными. Тесты касаются многостадийного воспламенения ряда смесей с появлением отрицательного температурного коэффициента, времени задержки воспламенения в широком диапазоне температур при воспламенении в ударных трубах и ламинарной скорости волны горения для различных коэффициентов избытка топлива. Проведенные тестовые расчеты демонстрируют работоспособность используемой кинетической модели для широкого набора углеводородов и газовых параметров.

В третьей главе описываются модели химических реакторов – плазмохимического реактора для очистки газов от вредных примесей под действием импульсно-периодического стримерного разряда и химического реактора сжатия, который является аналогом компрессионного двигателя с гомогенной смесью. В последнем случае предполагается воздействие на топливо-воздушную смесь с помощью электрического разряда, создающего в объеме химически активные частицы. Подчеркивается, что предлагаемые модели позволяют описывать воздействие стримерной короны на плазмохимические процессы с учетом его дискретности по времени и пространству. Это одно из серьезных отличий предлагаемых в диссертации моделей от развитых ранее.

В четвертой главе модели, описанные в предыдущих разделах, используются для изучения плазменных методов окисления оксидов азота и серы. Рассматриваются два варианта разрядов – стримерный коронный разряд и диэлектрический барьерный разряд, в котором развиваются стримероподобные каналы. Результаты конверсии оксидов азота и серы с помощью этих разрядов сравниваются между собой. Определяются реакции, дающие основной вклад в окисление оксидов азота и серы и даются рекомендации

относительно того, в каких смесях и когда предпочтительно использовать каждый из рассмотренных разрядов.

Пятая глава диссертации посвящена моделированию конверсии углеводородов и оксидов азота под действием неравновесной разрядной плазмы. Сначала рассматривается конверсия оксидов азота в синтетическом дизельном выхлопе при воздействии импульсной короны и добавлении в газовую смесь этилена и пропилена. Демонстрируется перспективность этих добавок для конверсии окислов азота и вскрываются основные механизмы, ответственные за влияние этих углеводородов на рассматриваемые процессы. Также исследуются возможности импульсной стримерной короны в отношении очистки от тяжелых углеводородов (нафталина). Исследуется роль не только нейтральной химии в этом процессе, но и ионно-молекулярных реакций. Демонстрируется важный вклад электронно-возбужденных метастабильных состояний $N_2(A)$ в удаление нафталина в смесях на основе азота, в том числе – в биогазе.

В шестой главе изучается многостадийное воспламенение и отрицательный температурный коэффициент в пропано-воздушной смеси под действием активных частиц, нарабатываемых в неравновесной плазме наносекундного разряда. Объясняется природа появления отрицательного температурного коэффициента и механизм воздействия разрядной плазмы на это явление. Впервые показывается, что с помощью плазмы можно снизить этот эффект и даже полностью убрать его вредное влияние на работу реальных энергетических устройств.

В седьмой главе исследуется возможность управлять с помощью разрядной плазмы воспламенением в компрессионном двигателе с гомогенной смесью. В качестве источника плазмы используется высокочастотный коронный разряд, который может зажигаться при самых высоких давлениях, реализуемых в двигателе. Приводятся результаты расчета нагрева и концентраций химически активных частиц для различных режимов воспламенения и выбираются наиболее оптимальные условия (прежде всего – момент включения разряда), в которых надо создавать плазму. Особое внимание уделяется вопросам предотвращения большой наработки окислов азота в разряде и в процессе воспламенения.

В восьмой главе рассматривается распространение волны горения в компрессионном двигателе под воздействием филаментированного импульсно-периодического наносекундного разряда. Изучается бедная пропано-воздушная смесь для условий, обсуждавшихся в предыдущем разделе. Демонстрируется, что, в зависимости от условий, возможны различные сценарии горения. Это могут быть дефлаграционное

распространение пламени, переход этой волны в волны автовоспламенения, развивающиеся от фронта волны горения, а также волны воспламенения, развивающиеся от стенки в направлении главной волны горения.

В заключении приводятся основные результаты и выводы диссертационной работы.

По диссертационной работе Филимоновой Е.А. имеются следующие замечания и вопросы.

1. Моделирование очистки газов с помощью стримерного разряда проводилось и ранее. Новизна данного исследования, прежде всего, состоит в том, что здесь впервые последовательно учтена дискретность создания активных частиц в пространстве и во времени. Хотелось бы сравнить результаты такого подхода с результатами на основе прежних подходов, когда при образовании активных частиц дискретностью процесса пренебрегалось, понять знак и примерную величину эффекта дискретности и объяснить его механизмы.

2. При моделировании очистки газов с помощью стримерного разряда вводится подгоночный параметр b , чтобы учесть «множественность и ветвление стримеров». Однако он используется не всегда; в некоторых решенных задачах его нет. Почему?

3. При очистке газов от нафталина в модели автора оказываются важными молекулы азота в первом метастабильном состоянии $N_2(A)$. Одним из главных каналов их образования считается диссоциативная рекомбинация электронов с ионами N_4^+ . В модели полагается, что в каждом акте такой рекомбинации рождается молекула $N_2(A)$. На самом деле вероятность рождения таких частиц в данном процессе неизвестна, и модель в таких условиях может давать лишь оценку сверху на концентрацию метастабильных молекул азота.

Указанные замечания не снижают общей высокой оценки полученных в диссертации результатов. Диссертация Е.А. Филимоновой является завершенным научным исследованием, в котором на основании выполненных автором работ разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение. Научная новизна представленных в диссертации результатов исследований связана со следующим. Впервые показано, что наносекундный разряд увеличивает интенсивность холодного пламени и уменьшает явление отрицательного температурного коэффициента вплоть до его исчезновения. Впервые предложено использовать наносекундный разряд в компрессионном двигателе для воздействия на бедную смесь в стадиях холодного или голубого пламени. Также разработан новый подход для учета дискретной (во времени и пространстве) генерации химически активных частиц при

моделировании воспламенения под действием многоканального импульсно-периодического стримерного разряда.

Теоретическая значимость работы состоит в большом количестве новых расчетно-теоретических данных в области плазмохимии при активации газовых смесей высоковольтными наносекундными разрядами. Это, прежде всего, влияние дискретности (в пространстве и времени) наносекундных стримерных разрядов на процессы очистки газов от вредных примесей, влияние наносекундных разрядов на различные стадии многостадийного воспламенения достаточно сложных углеводородов и на явление отрицательного температурного коэффициента, когда в определенной области параметров рост температуры газовой смеси сопровождается замедлением воспламенения.

Практическая значимость работы определяется многочисленными результатами диссертационной работы в отношении очистки газов от окислов азота и серы, а также от некоторых углеводородов, а также в отношении активации наносекундными разрядами газовых смесей в компрессионных двигателях внутреннего сгорания. В первом случае создана математическая и численная модель газофазного химического реактора для конверсии вредных примесей в другие соединения, что позволяет оптимизировать очистку газов в различных производствах. В случае двигателей использование полученных результатов может позволить уменьшить эмиссию вредных компонентов для конкретных двигателей внутреннего сгорания, улучшить показатели их рабочего цикла и увеличить их эффективность.

Результаты диссертационной работы хорошо известны специалистам, представлялись и докладывались на многих российских и международных конференциях. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 21 научной статье в ведущих высокорейтинговых отечественных и зарубежных журналах. Автореферат и опубликованные работы полно отражают содержание диссертации. Личный вклад Филимоновой Е.А. в представленную работу является определяющим. Все основные результаты диссертации получены лично ею или при ее непосредственном участии. Выносимые на защиту научные положения хорошо обоснованы и достоверны.

В диссертационной работе на основе выполненных автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение в области физики плазмы и неравновесной плазмохимии. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор, Филимонова Е.А., заслуживает

присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – Физика плазмы.

Отзыв составил доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой прикладной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Александров Николай Леонидович



09.09.2021

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Тел. +7(903)7736319 e-mail: nick_aleksandrov@mail.ru aleksandrov.nl@mipt.ru

Ученый секретарь Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ)

к.ф.-м.н.



Е.Г. Евсеев

141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)»

Тел. 8(495)5764177 e-mail: evseev.eg@mipt.ru