

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Федерального
государственного бюджетного
учреждения науки Федеральный
исследовательский центр
химической физики
им. Н.Н. Семенова РАН
И.Н., профессор Надточенко В.А.
» 2021г.



ОТЗЫВ

ведущей организации о диссертации Филимоновой Елены Александровны на тему «Кинетика процессов горения, конверсии оксидов азота и углеводов, стимулированных наносекундными разрядами», представленной на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы

Актуальность работы. Диссертационная работа Филимоновой Е.А. посвящена решению экологических проблем, связанных с загрязнением окружающей среды автомобильным транспортом, теплостанциями, производством биогаза, промышленным получением синтез газа и различных углеводов, в том числе, ароматических. Для уменьшения вредных выбросов в атмосферу предлагается использовать плазму наносекундного импульсно-периодического разряда. Преимущество такого разряда перед другими типами разряда состоит в том, что в неравновесной плазме нарабатываются разнообразные химически активные частицы с высокой концентрацией, которые способны окислить, удалить или разложить токсичный компонент в выбросных газах. Наличие плазменных процессов меняет обычную химическую кинетику удаления ароматических углеводов (например, пиролизом), или NO_x в присутствии углеводов. Для решения этой задачи требуются новые подходы, как к химической кинетике, так и к учету неоднородного распределения реагентов в конкретном реакторе из-за наличия стримерных каналов. Однако есть другой подход: уменьшить образование вредных примесей непосредственно в камере сгорания или реакторе. В диссертации Филимоновой Е.А. предлагается новый метод организации горения в двигателе внутреннего сгорания с использованием импульсно-периодического стримерного разряда. Сначала этот метод обосновывается решением фундаментальной проблемы горения: влияние наносекундного разряда на многостадийное воспламенение углеводородо-воздушной смеси, а затем эти результаты используются для обоснования организации горения в камере сгорания, в которой наносекундный разряд типа высокочастотной короны активирует смесь в строго определенный момент за короткое время. С точки зрения экологии важной задачей является улучшение работы двигателя внутреннего сгорания с целью уменьшения токсичности выхлопа. Предложенный способ описания является оригинальным, он охватывает такие научные направления исследования как химическая кинетика горения, плазмохимия в разряде, газовая динамика и применение результатов для прикладных задач.

Структура и содержание диссертации. Диссертация состоит из Введения, 8 глав, Заключение, двух Приложений, Списка работ, опубликованных по теме диссертации и Списка использованных источников. Объем диссертации: - 337 стр., она содержит 35 таблиц и 185 рисунков, список литературы включает 415 работ.

Во **Введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируются цель и необходимые для ее достижения задачи, указывается новизна полученных результатов, перечисляются положения, выносимые на защиту, отмечается практическая значимость результатов, их достоверность, а также личный вклад автора.

В **Главе 1** приводится аналитический обзор литературы, где особенно подчеркивается селективное воздействие плазмы на процессы окисления и горения. В начале Главы указывается на необходимость очистки воздуха и продуктов сгорания от оксидов азота, серы и летучих органических соединений. Дается подробное описание различных плазменных способов очистки, и делается вывод, что совместное использование неравновесной плазмы разряда и последующего использования катализатора является очень эффективным способом. Рассматриваются особенности плазменных газоразрядных устройств для удаления токсичных компонентов. Анализируются подходы к моделированию физико-химических процессов для целей газофазной очистки. Приводится сравнение экспериментальных данных с результатами моделирования конверсии NO в NO₂ в присутствии углеводородов в низкотемпературном плазменном реакторе, подчеркивается в этом случае существенное уменьшение цены удаления NO. Большой раздел посвящен очень актуальной сегодня теме: особенностям удаления летучих органических соединений с помощью плазмы. Основная задача использования плазмы состоит в уменьшении цены удаления примесей ароматических углеводородов в различных газах при промежуточных температурах.

Далее в этой **Главе** обсуждаются актуальные проблемы организации горения углеводородных топлив в реальных устройствах с учетом современных требований к экономии топлива и уменьшению токсичности выхлопа, описывается современная стратегия низкотемпературного горения. Один из развиваемых сейчас методов для улучшения состава выхлопа двигателя внутреннего сгорания и управления горением – это применение газовых неравновесных разрядов для инициации воспламенения. Дается перечень исследуемых для этой цели типов разряда и их характеристики. Делается обзор численных методов исследования горения в компрессионном двигателе, в том числе с использованием электрического разряда. Обсуждается химическая кинетика горения в двигателе внутреннего сгорания с акцентом на многостадийное воспламенение. На основе подробного обзора литературы делаются основные выводы для формулировки задач.

В **Главе 2** представлена модель химической кинетики окисления и горения углеводородо-воздушных смесей. Излагаются основные положения для создания модели химической кинетики, включая особенности химического кинетического механизма горения для смесей, проявляющих многостадийное воспламенение. Для достоверности этой модели демонстрируются тестовые расчеты времени задержки воспламенения, которые сравниваются с экспериментальными данными на ударных трубах и в закрытых объемах, а также ламинарной скорости волны горения в открытом пространстве. Приводится также сравнение с результатами расчетов других авторов, в том числе для времени индукции в смеси ацетальдегид-кислород, полученных в Федеральном исследовательском центре химической физики им. Н.Н. Семёнова РАН. Описанная в этой Главе модель химической кинетики успешно применена для решения конкретных задач:

эмиссии оксидов азота при подаче пара с природным газом в камеру сгорания газотурбинной установки; и расчета электронной плотности во фронте пламени метано-кислородной смеси для экспериментов, где воспламенение было инициировано лазерным излучением в закрытом объеме.

В **Главе 3** дано описание моделей химических реакторов, которые были использованы для решения сформулированных во **Введении** задач. Для решения задач очистки создана приближенная математическая модель газофазного химического реактора для удаления токсичных примесей на основе периодического наносекундного разряда. В отличие от моделей, описанных в **Главе 1**, эта модель взаимодействующих каналов, в ней принимается во внимание неоднородное распределение компонентов из-за наличия стримерных каналов, а также из-за многоимпульсной обработки газа, учитывается диффузия компонентов из стримерного следа и из необработанного газа в стримерный след. Программной реализацией модели газофазного химического реактора является компьютерный код RADICAL. Его возможности, в том числе анализ ведущих реакций в процессе очистки, также описаны.

Для задач воспламенения и горения в двигателе с воспламенением гомогенной смеси от сжатия с инициацией неравновесной плазмы разряда создана модель химического реактора сжатия и ее программная реализация «ДИЗЕЛЬ». В этой модели предложен оригинальный способ описания воздействия на процессы в камере сгорания внешним источником – разрядом - через активацию потока небольшой массы газа, инжестируемую через специальный порт. Модель химического реактора сжатия ранее (без разрядной части) была успешно применена для описания конверсии природного газа в сингаз. Результаты сравнивались с экспериментальными данными, полученными на установке ОИВТ РАН.

Глава 4 посвящена окислению оксидов азота и серы в газофазном химическом реакторе. В первой части Главы результаты моделирования удаления оксидов азота из продуктов сгорания метана сравниваются с результатами экспериментов. Получено хорошее согласие по степени удаления NO в зависимости от вложенной удельной энергии. На основе анализа ведущих реакций отмечены особенности химической кинетики удаления NO_x в коронном разряде. Поскольку в модели много параметров, то было проведено специальное исследование, как изменение параметров влияет на конечный результат конверсии. Во второй части **Главы 4**, чтобы определить области наилучшего использования диэлектрического барьерного и коронного разрядов и оптимизировать процессы очистки, было проведено сравнительное моделирование удаления NO_x и SO_2 из загрязненных газов для разных реакторов при одинаковом газовом составе и температурных условиях. Реакторы имели ярко выраженные свойства указанных выше разрядов. В результате сравнительного анализа автор дает рекомендации, для каких токсичных примесей и в каких газах лучше использовать барьерный диэлектрический или коронный разряд.

В **Главе 5** обсуждается конверсия углеводородов и оксидов азота. В первой части Главы рассматривается влияние пропилена и этилена на конверсию NO_x в синтетическом дизельном выхлопе в диапазоне температур 293-493 К. Для этой задачи также используется модель химического реактора для удаления токсичных примесей. Внимание было сосредоточено на выявлении основных химических кинетических механизмов, которые влияют на снижение энергопотребления и образование конечных продуктов, таких как CO , CH_2O , CH_3CHO , CH_3ONO_2 , $\text{C}_2\text{H}_5\text{ONO}_2$, HNO_2 , HNO_3 и других, в процессе удаления NO_x . Показано, что модель дает хорошее согласие результатов моделирования и

экспериментальных данных. Явно продемонстрирована положительная роль наличия в смеси C_2H_4 и C_3H_6 . Поскольку кинетика окисления NO в присутствии C_2H_4 и C_3H_6 имела много неопределённостей в константах скоростей реакций и продуктах реакций, то достоинством работы было построение схемы окисления NO в NO_2 , где показана важность образования радикала HO_2 в результате взаимодействия C_2H_4 и C_3H_6 с OH.

Вторая часть **Главы 5** посвящена моделированию конверсии нафталина в биогазе. В настоящее время не хватает знаний о продуктах и каналах реакций с участием тяжелых углеводородов. Целью данной работы было выявить основные механизмы, которые управляют процессом очистки, инициированным импульсно-периодическим коронным разрядом. В разделе приведено описание эксперимента и особенностей моделирования, которое было начато с самого простого состава: с чистого азота. Добавление к азоту других компонентов, таких как CO_2 , CO, H_2 и CH_4 , позволило выявить ведущие процессы и вещества, которые влияют на разложение нафталина. Такой подход позволил показать ухудшение эффективности удаления нафталина в биогазе по сравнению с чистым азотом и причины этого ухудшения. Кинетический анализ выявил, что возбужденные молекулы азота играют главную роль в разрушении нафталина, но необходимо учитывать ионно-молекулярные реакции и электрон-ионную рекомбинацию. Результаты моделирования хорошо согласуются с экспериментами по степени удаления нафталина.

В **Главах 6-8** представлены результаты решения задач по горению. Каждая последующая Глава использует и развивает результаты предыдущей, что выглядит как законченное исследование влияния наносекундного разряда на воспламенение и горение в двигателе с воспламенением от сжатия.

В **Главе 6** показан эффект воздействия разряда на многостадийное воспламенение и отрицательный температурный коэффициент скорости окисления пропано-воздушной смеси. Решается фундаментальная задача о влиянии наносекундного разряда на свойство некоторых смесей углеводородов и окислителя проявлять многостадийное воспламенение. Актуальность этой задачи показана в **Главе 1**. Моделирование такого воздействия позволило дать ответ на важные вопросы, такие как: подавляет ли разряд интенсивность холодного пламени или способствует его развитию? Как изменяется химический кинетический механизм, описывающий проявление отрицательного температурного коэффициента, из-за воздействия разряда? В этой Главе представлен подход к моделированию воздействия разряда. Разрядная стадия дает нагрев и химически активные частицы. Автор показала, что созданная ею кинетическая схема многостадийного воспламенения хорошо описывает эксперименты по временам индукции в зависимости от начальной температуры нагрева газа, сделанные в закрытом объеме в случае самовоспламенения. Моделирование с разрядом показало, что на временах $\sim 10^{-7}$ сек происходит подъем температуры, рост числа активных центров (радикалов) и изменение реакционной цепи. В результате изотермическая стадия сокращается в десятки раз. Подробно описано изменение химического кинетического механизма под воздействием разряда. В результате заметно снижается выраженность отрицательного температурного коэффициента. При некотором удельном энергокладе немоноктонность времени индукции исчезает. Этот результат наглядно показан на графиках, что делает его убедительным и ярким. Такая работа сделана впервые, и ее результаты являются отправной точкой для применения их в конкретных двигателях с воспламенением от сжатия для организации горения с инициацией наносекундным разрядом в смесях, проявляющих многостадийное воспламенение.

Метод организации горения в двигателе с воспламенением гомогенной смеси от сжатия с помощью неравновесной плазмы наносекундного разряда представлен в **Главе 7**. Для решения задачи управления воспламенением в двигателе была использована модель химического реактора сжатия, которая описана в **Главе 3**, для пропано-воздушной смеси, которая не воспламенялась только от сжатия. Расчет нагрева и концентраций химически активных частиц при воздействии разряда на инжестируемую массу газа был сделан аналогично тому, как это сделано в **Главе 6**. Кинетический анализ различных режимов воспламенения помог сделать выбор оптимального момента (угол поворота коленвала) включения разряда. Этот момент соответствовал началу разложения пропилгидропероксида на стадии холодного пламени. Время воспламенения зависело от удельного энерговклада в стримерный канал. Эффект воздействия разряда прежде всего связан с тем, что он принуждает смесь к частичному выделению тепла на стадии низкотемпературного окисления задолго до верхней мертвой точки, что позволяет смеси воспламениться от сжатия и не погаснуть пламени при движении поршня к нижней мёртвой точке. Выделение тепла тем больше, чем больше образовалось гидропероксидов благодаря наносекундному разряду.

В этой же **Главе 7** подробно обсуждается химическая кинетика промежуточных и конечных продуктов горения. Изучено влияние удельного энерговклада на концентрацию CO, несгоревших углеводородов (C_xH_y) и NO_x . Разряд может как ухудшить состав выхлопа, так и улучшить. Даны рекомендации для выбора удельных энерговкладов, момента инициации разряда, чтобы получить низкие значения CO, C_xH_y и NO_x . Это исследование очень важно для практического применения наносекундного разряда.

Глава 8 продолжает и развивает тему **Главы 7**. В ней рассматривается задача о формировании волны горения в пропано-воздушной смеси с неоднородной химической реактивностью, инициируемой высокочастотным коронным разрядом. Задача ставится в одномерной осесимметричной постановке, волна горения движется вдоль радиуса цилиндра. Особенность моделирования была в том, что волна горения распространяется в условиях переменного давления за счет движения поршня в цилиндре двигателя. Обычно одномерные задачи решают при постоянном объеме. Также эту работу отличает от других учет в моделировании активированной на оси цилиндра области, созданной наносекундным разрядом. Способ, который был использован для расчета состава химически активных частиц и нагрева активированной разрядом области, полностью оригинальный. Были введены такие параметры, как доля объема, занятая стримерами, и радиус активированной области, значения которых связаны друг с другом.

Результаты моделирования представлены с учетом трех параметров: структура активированной зоны (доля объема и радиус), удельный энерговклад в стример и угол поворота коленвала, при котором инициируется разряд. В этой задаче так же, как и в **Главе 7**, показано влияние трех стадий окисления на инициированное разрядом воспламенение активированной зоны с детальным рассмотрением химической кинетики. С учетом условий для возникновения воспламенения в активированной зоне анализируются три режима распространения волны горения: дефлаграционное распространение пламени, последовательное распространение волн самовоспламенения в несгоревшем газе непосредственно перед фронтом, распространение волны самовоспламенения в несгоревшем газе, идущей от стенки в направлении основной волны горения. Показана важная роль повышения локального давления для изменения состава смеси перед фронтом волны горения, в результате чего меняется сценарий распространения волны горения.

Автором обоснованно подчеркивается важность такой организации горения в двигателе, когда при инициации разрядом часть смеси поджигается волной горения, а часть – за счет самовоспламенения, которое контролируется стадией выделения тепла при промежуточных температурах.

В **Заключении** представлены основные результаты.

В двух **Приложениях** даются кинетические схемы химических реакций для конверсии, окисления и горения, в том числе, для конверсии NO в присутствии этилена и пропилена.

В качестве **Замечаний** следует отметить следующее:

1. Отсутствует сравнение эффективности предлагаемого автором способа воспламенения бедных горючих смесей за счёт их активации стримерным разрядом с форкамерно-факельным зажиганием, которое может быть альтернативным решением для двигателей с воспламенением бедной гомогенной горючей смеси от сжатия.
2. Теоретические исследования характеристик процесса горения в двигателе с воспламенением от сжатия бедной гомогенной горючей смеси, активированной стримерным разрядом, проведены только для одного скоростного режима работы двигателя (постоянная частота вращения коленчатого вала). В реальных условиях двигатель работает на режимах с переменной частотой вращения коленчатого вала. Поэтому выносимые на защиту «Рекомендации по выбору режима воздействия неравновесной плазмы для получения низко эмиссионного выхлопа компрессорного двигателя» не могут быть в полной мере использованы для создания такого двигателя без проведения дополнительных исследований на различных скоростных режимах работы.
3. В голубых и горячих пламёнах концентрация радикала [ОН] должна быть существенно выше, чем в холодных пламёнах. В частности, на стр. 96 отмечено, что с ростом температуры на стадии горячего пламени «...создаются условия для быстрого разветвления цепи и увеличения концентрации ОН с образованием конечных продуктов». Однако на рисунке 2.2.6 (см. стр. 95) показана обратная ситуация.
4. На рисунке 2.2.9а приведены экспериментальные данные по «зависимости времени воспламенения в смеси «пропан-воздух» от обратной начальной температуры», полученные для одних и тех же начальных условий (давление 10 атм, $\phi=0.5$) в работах Herzler (см. ссылку [293]) и Cadman (см. ссылку [294]). Задержки воспламенения в этих двух экспериментах имеют удовлетворительное согласие. Однако в работе диссертанта отмечено, что в них выбраны различные критерии воспламенения. В тексте диссертационной работы этот критерий не конкретизируется: «В работе [294] определение времени задержки воспламенения было весьма субъективным. Оно было измерено в начале повышения давления...». При этом в расчёте в качестве критерия без дополнительных пояснений был выбран рост давления на 7% (против 20 % в работе Herzler). В связи с этим возникает вопрос о надёжности данных, полученных в работе Cadman и целесообразности их использования для проверки разработанной диссертантом кинетической схемы.
5. В предложенной в главе 3 модели «физико-химических процессов в рабочем объеме цилиндра компрессионного двигателя с инициацией неравновесной плазмой» для вычисления массовых долей активных частиц, подаваемых в цилиндр, используется методика, описанная 7, при этом схема процессов наработки активных центров и методика нахождения констант скоростей реакций возбуждения или диссоциации прямым электронным ударом приведены в главе 6. Подобное изложение затрудняет оценку работы.

Следует также отметить, что в схеме (6.4) - (6.6) нет реакций образования первичных электронов, а из текста диссертации не ясно их происхождение.

6. Известно, что константы реакций имеют сильную температурную зависимость, поэтому при вычислении G-фактора (см. стр. 235 диссертационной работы) необходимо их переопределение на каждом шаге по времени. Однако, как следует из описания методики вычисления массовых долей активных частиц (главы 6 и 7), константы реакций не переопределялись.

7. В главе 4 предложена модель процесса удаления оксидов азота NO_x в том числе из продуктов сгорания метана. На рисунке 4.1.7 приведён пример расчёта по конверсии оксидов азота в азотосодержащие соединения. Однако в диссертационной работе не представлены результаты проверки чувствительности предложенной модели к начальным условиям.

8. В главе 4 на графике 4.1.8 приведено сопоставление расчётов с экспериментальными данными по удалению NO из продуктов сгорания метана при различных начальных условиях по начальной концентрации NO и температуре. Однако на графике не указано погрешность измерений концентрации NO , что затрудняет оценку вывода об удовлетворительном согласии расчёта и эксперимента.

9. В главе 7 «для моделирования рабочего цикла двигателя НСЦИ с внешним воздействием импульсно-периодическим наносекундным разрядом» использована нульмерная модель химического реактора сжатия (см. раздел 3.2). В диссертации отмечено, что в нульмерном приближении филаментацию заряда учесть нельзя и для решения этой проблемы в рамках нульмерного подхода предлагается подавать в цилиндр уже активированный заряд смеси через специальный порт полагая, что он полностью перемешивается с горючей смесью в цилиндре до воспламенения. Однако в работе отсутствуют данные по времени смешения, что затрудняет оценку применимости такого подхода.

Отмеченные замечания не снижают важности и достоверности полученных результатов. Прделана большая работа, результатом которой стала разработанная многофункциональная кинетическая модель и ее численная реализация в моделях газофазных реакторов, которая позволила решить широкий круг задач по низкотемпературному окислению NO_x , конверсии различных токсичных веществ (оксидов серы, формальдегида, этилена, пропилена, нафталина и др.) и горению обедненных топливных смесей, проявляющих многостадийное воспламенение. Связующим звеном для всех рассмотренных задач была неравновесная плазма. Использование активации рабочей среды импульсно-периодическим наносекундным разрядом обеспечивало энергетическую эффективность процесса.

Можно выделить **основные научные результаты**:

1. Показано, что наносекундный разряд не подавляет, а стимулирует развитие и увеличивает интенсивность холодного пламени, а также уменьшает немонотонное окисление смеси с ростом начальной температуры, вплоть до подавления отрицательного температурного коэффициента скорости окисления.
2. Предложен способ организации горения обедненной смеси в двигателе с воспламенением гомогенной смеси от сжатия путем изменения реакционного пути протекания низкотемпературной стадии горения и стимулирования самовоспламенения от сжатия. Выявлен кинетический механизм селективного воздействия разряда.
3. Показано, что при определенной организации горения с активацией бедной смеси импульсным наносекундным коронным разрядом можно значительно сократить

количество CO и несгоревших углеводородов в выхлопе и незначительно увеличить концентрацию NO_x (за счет нетермических NO_x, наработанных разрядом) по сравнению с термическими NO_x.

4. Показано значительное влияние высокочастотного коронного разряда на воспламенение и режим распространения волны горения в двигателе с воспламенением гомогенной смеси от сжатия. Это влияние объясняется стимуляцией кинетического механизма окисления при низких и промежуточных температурах.

5. Разработанный метод учета дискретного по времени и пространству образования реагентов, связанного с многоканальной структурой наносекундного разряда позволил успешно описать большое количество экспериментов по удалению токсичных примесей, выявить основные реакции и построить кинетические схемы.

Теоретическая значимость проведенных исследований определяется результатами, которые позволяют объяснить полученные недавно экспериментальные данные о воздействиях неравновесной плазмы на многостадийное воспламенение и дают возможность их применить в разрабатываемых сейчас гибридных двигателях с воспламенением гомогенной смеси от сжатия для эффективной организации горения. Можно сказать, что в большой степени восполнен пробел в изучении влияния плазмы на различные стадии выделения тепла в таком двигателе, связанные со свойством углеводородо-воздушной смеси проявлять многостадийное воспламенение.

Практическая значимость. Наносекундный разряд является эффективным средством для управления процессом окисления и горения в различных приложениях. В зависимости от условий воздействия можно управлять конечным состоянием системы через изменение ее параметров на стадии разряда. Предложенный способ организации горения обедненной смеси через воздействие высокочастотного коронного разряда на многостадийное воспламенение дает ключ к управлению процессами в двигателе с воспламенением гомогенной смеси от сжатия. Он также позволяет улучшить состав выхлопа, что может устранить необходимость использования дорогостоящих систем последующей обработки выхлопных газов. Активированная разрядом смесь может быть использована для реформинга и получения новых веществ.

Для целей очистки от оксидов азота, серы и ароматических углеводородов совместное использование плазмы наносекундных разрядов и различных катализаторов имеет хороший потенциал для промышленного применения. Полученные в работе результаты позволяют проводить оптимизацию конверсии в газовой фазе.

Результаты диссертационной работы могут быть применены специалистами следующих организаций: Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН, Объединенный институт высоких температур РАН, Физический факультет МГУ, Химический факультет МГУ, Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований (ТРИНИТИ), Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет) (МФТИ), Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Институт нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХС РАН), Центральный институт авиационного моторостроения (ЦИАМ), Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет, Московский государственный технический университет им. Н. Э. Баумана.

Апробация работы. Результаты диссертационной работы докладывались на многочисленных всероссийских и международных конференциях, а также на московских семинарах и семинарах в Южной Корее, Германии, Франции и Нидерландах.

Автором лично или совместно с соавторами опубликована 21 статья в журналах, которые относятся непосредственно к теме диссертации, индексируются в Web of Science, Scopus и рекомендованы ВАК. Также результаты исследований представлены в главах 7 книг, включая Энциклопедию низкотемпературной плазмы, и в тезисах докладов различных конференций.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Личный вклад автора. Задача о влиянии наносекундного разряда на многостадийное воспламенение была полностью решена автором. Идея организации горения в двигателе с воспламенением гомогенной смеси от сжатия с инициацией неравновесной плазмой принадлежит автору. Постановка задач, моделирование горения в химическом реакторе сжатия, анализ результатов сделаны автором. Автором был предложен и реализован метод оценки состава и нагрева активированной разрядом зоны. Анализ и обработка полученных результатов расчета распространения фронта пламени проводились при определяющем участии автора. Статьи по горению в большей своей части были написаны автором.

Автор участвовала в создании базы данных по химической кинетике, в написании программ по расчету состава смеси. Является соавтором программных комплексов РАДИКАЛ и ДИЗЕЛЬ. Автор полностью отвечала за создание схем, в том числе редуцированных, химических реакций для разных задач и проводила тестирование этих схем. Автором было проведено моделирование по удалению токсичных примесей из различных смесей, с последующим анализом и обработкой полученных результатов, с формулировкой выводов. Отдельные статьи или большие разделы в статьях по конверсии оксидов азота, серы и углеводородов написаны автором.

Можно сделать вывод, что диссертационная работа представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой разработаны теоретические положения кинетических механизмов в процессах конверсии токсичных примесей, воспламенения и горения в топливных смесях и продуктах сгорания, активированных неравновесной плазмой наносекундных разрядов. Результаты имеют фундаментальное значение с возможностью их практического применения. Диссертация соответствует всем критериям для докторской диссертации, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а ее автор Филимонова Елена Александровна заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика плазмы.

Диссертационная работа «Кинетика процессов горения, конверсии оксидов азота и углеводородов, стимулированных наносекундными разрядами» была заслушана на семинаре Федерального исследовательского центра химической физики им. Н.Н. Семенова РАН 25.06.2021.

д.ф.-м.н., проф., лаборатория
окисления углеводородов
119991, Москва, ул. Косыгина, 4,
+7(495)939-73-96,
iz@center.chph.ras.ru

Власов Павел Александрович

к.т.н., доц., лаборатория детонации
119991, Москва, ул. Косыгина, 4,
+7(495)939-71-31,
kaavdeev@center.chph.ras.ru

Авдеев Константин Алексеевич

Учёный секретарь ФИЦ ХФ РАН
к.ф.-м.н., лаборатория химической
физики энергоаккумулирующих
гетерогенных систем
119991, Москва, ул. Косыгина, 4,
+7(495)939-72-09,
mlarichev@chph.ras.ru

Ларичев Михаил Николаевич

