

**ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ
ОБЪЕДИНЕННЫЙ ИНСТИТУТ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01) на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки
Объединенного института высоких температур Российской академии наук
(125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2)
от 29 сентября 2021 г. (протокол № 13)

Защита диссертации **Филимоновой Елены Александровны**
на соискание ученой степени доктора физико-математических наук
**«Кинетика процессов горения, конверсии оксидов азота и углеводородов,
стимулированных наносекундными разрядами»**

Специальность 01.04.08 (1.3.9) – физика плазмы

СТЕНОГРАММА

заседания диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01) на базе
Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного
института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, ул.
Ижорская, д. 13, стр. 2)

Протокол № 13 от 29 сентября 2021 г.

Диссертационный совет Д 002.110.02 (24.1.193.01) утвержден Приказом Министерства образования и науки РФ от 11.04.2012 г. № 105/нк в составе 31 человека. На заседании присутствуют 21 человек, из них 10 докторов наук по специальности 1.04.08 (1.3.9) – физика плазмы и 11 докторов наук по специальности 01.04.14 (1.3.14) – теплофизика и теоретическая теплотехника. Дополнительно введены на разовую защиту 0 человек. Кворум имеется.

Председатель – зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01) д.ф.-м.н., профессор Андреев Н.Е.

Ученый секретарь – ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01) д.ф.-м.н. Васильев М.М.

1	Фортов В.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
2	Андреев Н.Е.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
3	Канель Г.И.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
4	Васильев М.М.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
5	Агранат М.Б.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.14	Подключен
6	Амиров Р.Х.	Д.ф.-м.н., с.н.с.	1.3.9	Присутствует
7	Баженова Т.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
8	Вараксин А.Ю.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
9	Васильев М.Н.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
10	Василяк Л.М.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
11	Воробьев В.С.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
12	Гавриков А.В.	Д.ф.-м.н., доцент	1.3.14	Присутствует
13	Голуб В.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
14	Грязнов В.К.	Д.ф.-м.н.	1.3.14	Подключен
15	Дьячков Л.Г.	Д.ф.-м.н.	1.3.9	Присутствует
16	Еремин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Присутствует
17	Зейгарник Ю.А.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.14	Присутствует
18	Иосилевский И.Л.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
19	Кириллин А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
20	Лагарьков А.Н.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
21	Ломоносов И.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
22	Медин С.А.	Д.т.н., профессор	1.3.14	Подключен
23	Норман Г.Э.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Подключен
24	Петров О.Ф.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Подключен
25	Полежаев Ю.В.	Чл.-корр. РАН, д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
26	Савватимский А.И.	Чл.-корр. РАН, д.т.н., профессор	1.3.14	Присутствует
27	Сон Э.Е.	Академик, д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
28	Старостин А.Н.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Отсутствует
29	Филиппов А.В.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.9	Присутствует
30	Храпак А.Г.	Д.ф.-м.н., профессор	1.3.14	Отсутствует
31	Яньков Г.Г.	Д.т.н., с.н.с.	1.3.9	Отсутствует

ПОВЕСТКА ДНЯ

На повестке дня защита диссертации старшего научного сотрудника лаборатории № 21.1. – численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН) **Филимоновой Елены Александровны** на тему «Кинетика процессов горения, конверсии оксидов азота и углеводородов, стимулированных наносекундными разрядами». Диссертация впервые представлена на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 (1.3.9) – физика плазмы. Диссертация выполнена в лаборатории 21.1 - численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики ОИВТ РАН (125412, г. Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2, jiht.ru).

Официальные оппоненты:

Акишев Юрий Семенович – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор, начальник лаборатории кинетики слабоионизированной плазмы Акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (ТРИНИТИ). (108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, тел.: +7 (495) 841-53-08, e-mail – liner@triniti.ru; akishev@triniti.ru)

Александров Николай Леонидович – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой прикладной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)" (МФТИ). (141701, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский переулок, д.9., тел.: +7 (495) 408-45-54, факс: +7 (495) 408-42-54, e-mail: info@mipt.ru; aleksandrov.nl@mipt.ru)

Лебедев Юрий Анатольевич – гражданин РФ, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией "Плазмохимии и физикохимии импульсных процессов" Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХС РАН). (119991, город Москва, Ленинский проспект, 29, тел.: +7 (495) 954-59-27, факс: +7 (495) 633-85-20, e-mail: tips@ips.ac.ru; lebedev@ips.ac.ru)

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский Центр химической физики им. Н. Н. Семенова РАН (ИХФ РАН) (119991, Москва, ул. Косыгина, 4, тел.: +7 (499) 137-29-51, факс: +7 (495) 651-21-91. kadry@chph.ras.ru, e-mail: nadtochenko@chph.ras.ru – директор, mlarichev@chph.ras.ru – Ученый секретарь)

На заседании присутствуют официальные оппоненты д.ф.-м.н., профессор Н. Л. Александров – очно, д.ф.-м.н. Ю. А. Лебедев – очно, д.ф.-м.н., профессор Ю. С. Акишев – дистанционно.

СТЕНОГРАММА

Председатель

Добрый день уважаемые коллеги, мы начинаем наше сегодняшнее заседание, которое по повестке состоит в защите докторской диссертации. Давайте по порядку, Михаил Михайлович, пожалуйста ознакомьте нас с имеющимися документами.

Ученый секретарь

(Зачитывает данные о соискателе по материалам личного дела и сообщает о соответствии представленных документов требованиям ВАК Министерства образования и науки РФ).

Председатель

Спасибо, Михаил Михайлович! Если есть вопросы – пожалуйста. Если нет – тогда мы переходим к основному вопросу нашего заседания. Елена Александровна, пожалуйста, вам слово.

Е. А. Филимонова

Выступает с докладом по диссертационной работе (выступление не стенографируется, доклад Е. А. Филимоновой прилагается).

Председатель

Спасибо, Елена Александровна. Пожалуйста, вопросы какие по работе?

А. В. Еремин

Вы сделали такой ценный доклад по результатам такой огромной работы. Вот я на что хотел обратить внимание. Конечно, в вашем теоретическом исследовании львиную долю занимают кинетические модели, кинетические модели чрезвычайно сложны и, конечно, стоит подчеркнуть, что вы сами ни одной константы не получали, и, что хорошо, и не пытались дергать константы чужие, даже не пытались это делать в таких сложных механизмах, нефизичным путем вы этого, к счастью, не делали. Но вот на что я хочу обратить внимание – вы совсем не упомянули в докладе о том, собственно, сейчас в литературе уже существует довольно большой набор таких полновесных хорошо цитируемых кинетических моделей горения. Десять лет назад все ссылались на стэнфордскую модель Gri_Mech и модели Коннова, у нас в стране ЦИАМовская модель Старика развивалась, и сейчас наиболее популярной используемой моделью является миланская модель POLIMI. Пытались ли вы как-то оценивать расхождения между этими моделями – это первая часть вопроса, насколько вы их использовали в своей работе. Вторая часть вопроса касается тестирования ваших результатов, потому что, ну, вот, например, я как кинетик знаю, как известно, что наиболее точные результаты обычно получаются в ударных трубах, где используются очень разбавленные смеси, а все эти модели, в общем-то, плохо настроены на неразбавленные смеси. Конечно, если вы берете другие результаты экспериментов, по скорости пламени, по концентрации, по

температуре и т.п., в реальных устройствах, это более надежное тестирование, значит, вот, собственно, суть моего вопроса именно в том, какой критерий отбора современных кинетических моделей, которые упомянуты в литературе, и как вы их тестировали?

Е. А. Филимонова

Что касается миланской группы, я про эту группу знаю, но, поскольку, многие работы, которые здесь представлены, были сделаны еще до момента возникновения этой группы, специально мы не сравнивали кинетику, которая была создана в нашей группе, и их кинетику. Дело в том, что все смеси, которые они используют, не соответствуют тем смесям, которые используем мы. Поэтому тут сравнения не было. Теперь, что касается тестирования. Мы тестировали смеси богатые, бедные и сильно разбавленные, тестировали на экспериментах, сделанных на ударных трубах, в бомбах, которые помещаются в печь, которая нагревает эту бомбу, и, как правило, получали хорошее согласие. Специально я потом остановлюсь на сравнении и тестировании пропано-воздушной смеси при 10 атм, когда я буду еще отвечать на вопросы оппонентов. Я просто покажу тогда график, и вы увидите, что даже ведущая организация, а это Химфизика, которая, конечно, обратила на это внимание, также как и вы, насчет правильности тестирования и использования тех экспериментов, которые предлагаются в литературе.

М. М. Васильев

Продолжение того вопроса, который был задан. Смотрите, у вас, насколько я понял, на двадцать втором слайде, где вы показываете зависимости озона нарабатываемого, NO, NO₂, это все результаты расчетов, и, казалось бы, для верификации моделей, и эти, т.е., это все легко получается экспериментально с помощью простейших химических газоанализаторов, и вот верификация модели, вот от этой точки, казалось бы, очень простой, сделана?

Е. А. Филимонова

Она сделана. Это были эксперименты, проведенные в группе Асиновского. Они получили концентрацию озона, формальдегида, и наша модель прекрасно их описывает, только они не вошли, они были использованы, но не вошли в диссертацию.

М. М. Васильев

Прекрасно, я просто не услышал этого в докладе. И второй момент, он, может быть такой, немножко, что называется, на бытовом уровне, значит, в одиннадцатом слайде вы говорили про добавление гептана в горючую смесь. Были ли учтены токсические свойства гептана и его воздействие на человека? Какая доля гептана остается несгоревшей после выхода из газовой трубы, условно говоря, после камеры сгорания? Гептан обладает наркотическим действием, как вообще можно ли его использовать?

Е. А. Филимонова

Вы про этот слайд? Дело в том, что вот то, что здесь показано, это взято из работы Sjöberg. Это не я считала. Поэтому я не могу вам сказать. Но, по всей видимости, вот это добавление гептана - это двадцать процентов от всей массы, остальное это был изооктан.

Поскольку здесь все сгорало, это видно, что скорость выделения тепла, скорость довольно большая, то, каков был выхлоп, я не могу вам сказать, поскольку в этой статье об этом не пишут. Меня интересовало именно то, что в этом непосредственно проявляется многостадийность, т.е. в качестве примера.

Председатель

Еще вопросы есть?

В. В. Голуб

Вы упомянули о резонансном подстройке к плотности вначале. Я не очень понимаю, как это реализуется?

Е. А. Филимонова

Резонансная подстройка к плотности газа реализуется тем, что там есть датчик, который определяет давление в цилиндре. По нему определяется концентрация плотности газа в цилиндре. И в зависимости от этого будет подаваться импульс, либо с большей удельной энергией, либо с меньшей удельной энергией. Это позволяет создавать внутри самого цилиндра область приблизительно одинаковую, т.е., они подают более мощный импульс. Допустим, было 10 киловольт, стало двадцать киловольт, если им надо получить одинаковый объем. Они меняют параметры внешней цепи таким образом, чтобы создать один и тот же объем, который занимают стримеры.

В. В. Голуб

Слово «резонансный» как-то?

Е. А. Филимонова

А резонанс - потому, что он напрямую связан с плотностью газа, которая у них определяется.

В. В. Голуб

Понятно. Спасибо.

Н. Е. Андреев

Еще вопросы есть? Если нет, то можно я задам такой школьно-образовательный вопрос: вы начали с того, что это все крайне важно из-за того, что там девяносто процентов загрязнений связано с автомобилями, которые очень активно используются. Ну, наверное, это относится, конечно, к мегаполисам, потому что если станция стоит там где-то в лесу, то там, конечно, машин вообще нет. Но мой вопрос практический. Адепты, значит, двигателей электрических, они говорят, что через десять лет вообще не будут выпускать двигатели внутреннего сгорания. Я специально поэтому говорю, я не отношу себя к таким адептам. Но, тем не менее, значит, как далеко вам до создания двигателя, который бы имел лучшие показатели по коэффициенту полезного действия и минимизации выхлопа? Вы показывали установки, которые еще далеки от практики, насколько я понимаю.

Е. А. Филимонова

Вы знаете, вы напрасно так думаете. Дело в том, что есть реальные двигатели, которые работают вот с таким типом разряда. Если вы не возражаете, я могу вам показать, есть уже конкретный прибор, который ставится на машину, есть уже не первая его версия, который предлагается на сайте вот этой компании. Такая организация горения позволяет им работать с бедными смесями, очень сильно снижать выбросы, у них большие исследования, которые представлены в различных журналах, в том числе и в журнале для сообщества автомобилистов, которые показывают, что есть режимы, в которых все получается достаточно хорошо.

Н. Е. Андреев

И КПД растет?

Е. А. Филимонова

А КПД значительно выше. А знаете, за счет чего КПД растет? За счет того, что бедная смесь позволяет ее сильно сжать. И вот за счет дополнительного сжатия мы не теряем в КПД.

Председатель

Спасибо. Если больше вопросов нет, тогда мы, наверное, должны заслушать письменные отзывы, которые поступили. И начнем с ведущей организации.

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги, на работу Елены Александровны Филимоновой поступили отзывы, на диссертационную работу и на разосланный автореферат, а также отзыв ведущей организации. Начнем с отзыва ведущей организации, в качестве которой выступал **Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н. Н. Семенова Российской академии наук**. С вашего позволения весь отзыв зачитывать не буду, он содержит упоминание об актуальности работы, структуру и объем диссертации, с расшифровкой по результатам в каждом разделе, это все мы с вами заслушали сейчас в докладе соискателя. Вместе с этим в отзыве имеются замечания и на них я остановлюсь.

Первое замечание: отсутствует сравнение эффективности предлагаемого автором способа воспламенения бедных горючих смесей за счет их активации стримерным разрядом с форкамерно-факельным зажиганием, которое может быть альтернативным решением для двигателей с воспламенением бедной горючей смеси от сжатия.

Второе: теоретическое исследование характеристик процесса горения в двигателях с воспламенением о сжатия бедной гомогенной воздушной смеси приведены только для одного скоростного режима (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 компрессионного двигателя» не могут быть в полной мере использованы для создания такого двигателя без проведения дополнительных исследований на различных скоростных режимах работы.

Третье: в голубых и горячих пламенах концентрация радикала ОН должна быть существенно выше, чем в холодных пламенах. 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 на 95 странице показана обратная ситуация.

Четвертое: на рисунке 2.2.9а приведены экспериментальные данные по зависимости «времени воспламенения смеси пропан-воздух от обратной начальной температуры», полученные для одних и тех же начальных условий (давление десять атмосфер, ϕ равно 0,5) в работах Herzler и Cadman (ссылки [293, 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, цитата «в работе [294] определение времени задержки воспламенения было весьма субъективным, оно было измерено в начале повышения давления». При этом в расчете в качестве критерия, без дополнительных пояснений, был выбран рост давления на семь процентов, против двадцати в работе [294]. В связи с этим возникает вопрос о надежности данных, полученных в работах [293, 294], и целесообразности их использования для проверки разработанной диссертантом кинетической схемы.

Пятое: в предложенной в Главе три модели физико-химических процессов в рабочем объеме цилиндра компрессионного двигателя с инициацией неравновесной плазмой для вычисления массовых доле активных частиц, подаваемых в цилиндр, используется методика, описанная в Главе 7, при этом схема процесса 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.

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

Седьмое: в главе четыре предложена модель процесса удаления оксида азота NO_x , в том числе из продуктов сгорания метана. На рисунке 4.1.7 приведен пример расчета по конверсии оксидов азота в азотсодержащие соединения. Однако в диссертационной работе не представлены результаты проверки чувствительности предложенной модели к начальным условиям.

Восьмое: в главе четыре, графики 4.1.8, приведено сопоставление расчетов с экспериментальными данными по удалению NO из продуктов сгорания метана при различных начальных условиях по начальной концентрации NO и температуре. Однако на графике не указаны погрешности измерения концентрации NO, что затрудняет оценку вывода об удовлетворительном согласии расчета и эксперимента.

Девятое: в главе семь «для моделирования рабочего цикла двигателя HCCI 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 разряда учесть нельзя и для решения этой проблемы в рамках нульмерного подхода предлагается подавать в цилиндр уже активированную разрядом смесь через специальный порт, полагая, что он полностью перемешивается с горючей смесью до воспламенения. Однако в работе отсутствуют данные по времени смешивания, что затрудняет оценку применимости такого подхода.

Вместе с этим делается вывод, что отмеченные замечания не снижают важность и достоверность полученных результатов, и отмечается, что проделана большая работа, результатом которого выделяются основные научные результаты, представленные претендентом, и, отмечая теоретическую и практическую значимость работы, делается вывод, что диссертационная работа является законченной квалификационной работой, соответствует Положению о порядке присуждения степени, и Елена Александровна заслуживает присуждения искомой степени.

Кроме этого, на разосланный автореферат диссертации Елены Александровны поступили отзывы. Поступило пять отзывов, все отзывы положительные, ряд из них имеет замечания.

Первый отзыв поступил из Казахского национального университета имени аль-Фараби, подписан Владимиром Ефремовичем Мессерле, отзыв положительный, без замечаний.

Второй отзыв поступил из Института теоретической и прикладной механики им. С.А.Христиановича Сибирского отделения академии наук, отзыв подписан Ириной Вячеславовной Швейгерт, доктором наук, отзыв положительный, без замечаний.

Третий отзыв - из Института химии растворов РАН, отзыв от доктора физ.-мат. наук Титова Валерия Александровича, отзыв положительный, сделаны следующие замечания:

при описании в автореферате модели многостадийного воспламенения во второй главе автором не указано, учитывался ли теплообмен со стенками и потери радикалов на стенках сосуда. Эти процессы могут быть важны, особенно при низких давлениях, и они могут влиять на время задержки воспламенения.

Четвертый отзыв. Также поступил отзыв из МГУ, отзыв составил и подписал доктор физ.-мат. наук, профессор химического факультета Валерий Михайлович Шибков, отзыв положительный, имеется ряд замечаний.

Первое: в тексте автореферата несколько раз, например, страница 2, страница 3, автор использует выражение «ширина импульса». Правильно использовать общепринятое выражение «длительность импульса».

Второе: на странице 16 автором вводится понятие доля объема, занятого всеми стримерами, возникающими за один импульс, к объему реактора. Стримерный разряд представляет собой объемное плазменное образование. Стримеры имеют различные диаметры и различную длину. Они могут возникать с различными временными задержками. При регистрации они могут затенять друг друга. Для правильного расчета необходимо проводить томографические исследования. В тексте автореферата необходимо кратко пояснить метод подсчета объема всех стримеров, применяемый автором.

Третье: На странице 27 вводится величина W , которая делится на две части: одна часть расходуется на нагрев газа (VT-релаксация и быстрый нагрев [54]), а другая на производство активных частиц. Ссылка [54] относится к работе 2016 г., хотя автору хорошо известно, что понятие быстрого нагрева молекулярных газов в условиях низкотемпературной плазмы было введено и подробно исследовано еще в конце прошлого века. В этом случае надо ссылаться не только на работу [54], но и на пионерские теоретические и экспериментальные работы, в которых был подробно исследован быстрый нагрев молекулярного азота и воздуха в условиях неравновесной низкотемпературной газоразрядной плазмы.

И, наконец, **пятый отзыв** поступил из Научно-исследовательского института ядерной физики НИИЯФ МГУ, отзыв составил и подписал доктор физ.-мат. наук Александр Фридрихович Паль, и в отзыве есть следующие замечания.

Не понятна формула вычисления рейтинга реакций на рисунке 6. В тексте указано, что рейтинг от 1 до 9 и меньше, при этом на самом рисунке есть рейтинг только до 7. Также в пояснении к этому рисунку в тексте автореферата указано, что значок «звездочка» между символьными названиями компонентов означает «плюс», хотя в таблице вообще нет знака «звездочка».

Это все отзывы на автореферат.

Председатель

Спасибо, Михаил Михайлович.

Елена Александровна, пожалуйста, вам слово для ответа, и я думаю, что замечания о том, что надо было бы сослаться, комментировать не нужно.

Е. А. Филимонова

По поводу замечания Шибкова. В диссертации, на самом деле, есть больше ссылок, но, в любом случае, я хочу подчеркнуть, что в этой области очень много сделано группой В.М. Шибкова, они начали заниматься этой проблемой быстрого нагрева в своих экспериментальных работах еще в конце 90-х годов.

Что касается замечаний ведущей организации.

Первый вопрос - почему не было сравнения с форкамерно-факельным зажиганием. Тут следует отметить, что ранее такое сравнение было сделано. Форкамерное зажигание предполагает, что есть две камеры. Одна небольшая предкамера, с помощью свечи поджигается очень богатая смесь, не всегда, но, как правило, очень богатая. В другой камере находится очень бедная смесь. Воспламенение более богатой смеси приводит к быстрому воспламенению, и это пламя, факел, попадает в область, где находится очень бедная смесь и там происходит воспламенение. Однако, этот способ воспламенения в двигателе перестали исследовать уже давно, поскольку это было очень неэффективно. В маленькой камере, где у нас очень богатая смесь, может образовываться сажа или может образовываться, если это стехиометрическая смесь, вследствие высокой температуры, очень много NO. В результате выхлоп такой форкамерно-факельной системы может быть очень вредным. Поэтому, хотя этим занимался когда-то Горьковский автомобильный завод, они прекратили этим заниматься еще в 1982 г., и сейчас это может использоваться

только на грузовиках или даже в «Формуле 1», т.е., ученые из Химфизики сами сказали, что это не эффективный метод.

Второй вопрос связан с тем, что мы не варьировали скорость вращения коленвала. Это не так, и об этом было сказано в тексте диссертации, частота вращения коленвала менялась, мы делали, как правило, при одной частоте, это тысяча пятьсот оборотов в минуту. Но, в результате дополнительные исследования провели и для других скоростей, от тысячи двухсот до тысячи восьмисот оборотов в минуту, и показали, что эффект разряда сохраняется, если мы используем 1) Такую же невоспламеняющуюся смесь, и 2) расположение стадий холодного и голубого пламени будет такое же, как и у нашей пропано-воздушной смеси. Тогда сохраняются те рекомендации, которые основаны на рекомендациях для образования NO,CO. Однако следует сказать, что в двигателях НССИ, чтобы избежать резких колебаний давления диапазон скоростей вращения коленвала ограничен. Почему ограничен? Потому, что в этом случае могут возникать большие скачки давления, поэтому для данного двигателя скорость не превышает, как правило, двух тысяч оборотов в минуту. Исследования показали, что топлива, которые проявляют свойства многостадийного воспламенения, не очень чувствительны к скорости двигателя.

Теперь **третий вопрос** – тут совершенно простой ответ. Речь идет вот обо этом рисунке, спрашивается, почему здесь очень маленькая концентрация ОН, в то время как в тексте написано, что «на третьей стадии (горячее пламя) с ростом температуры создаются условия для быстрого разветвления цепи и увеличения концентрации ОН с образованием конечных продуктов». А это связано с тем, что то утверждение было сделано для стехиометрической смеси, в данном случае это была очень богатая смесь, здесь ϕ равняется семь с половиной, т.е., очень богатая смесь, очень много топлива, поэтому к моменту, когда подходит третья стадия, фактически весь кислород уже использован, и образование ОН не происходит. Надо было в тексте сделать ссылку, что в случае богатой смеси это будет несколько не так, это недочет.

Теперь **четвертое замечание**. Речь идет об этом графике, где идет речь о задержке воспламенения в зависимости от обратной температуры. Работы были сделаны Cadman и Herzler. Я хочу сказать, у Herzler все было четко, как только давление повышается на 20%, значит, начинается воспламенение. В работе Cadman говорят, что лучшей мерой начала основного сгорания есть изменение давления с повышением температуры, которое связано с тепловыделением. Поэтому надо задержку воспламенения определять в момент повышения давления. Количественного критерия не было. И если посмотреть на приведенные в статье экспериментальные кривые записи давления от времени, то они сильно осциллируют и трудно определить начала подъема давления. В расчетах время задержки воспламенения определялось при увеличении давления на 7%. Эта величина, в некоторой степени, визуально отвечала началу подъема давления. Рост давления на 20% - это стандартный критерий времени задержки воспламенения. Однако для обеих работ видно, что, несмотря на разные критерии определения времени индукции (20% и 7% рост давления), экспериментальные данные находятся в одном диапазоне времен. Однако, специалисты из Химфизики правы, что для сравнения вообще не надо было брать эксперименты Cadman.

Замечание пятое, о схемах процессов наработки активных центров и об образовании первичных электронов. В Главе 3 приведено только описание модели

химического реактора сжатия с внешним источником химически активных частиц, которые создает разряд, без описания метода расчета состава химически активных частиц. Как определялись массовые доли радикалов, которые создаются разрядным воздействием, вынесено в Главу 7, где решается задача об управлении воспламенением в химическом реакторе сжатия для конкретных условий. Поскольку в Главе 7 использовалась та же топливная смесь, что и в Главе 6, то специально реакции диссоциации и возбуждения в Главе 7 не выписывались. Глава 6 посвящена целиком воздействию разряда на многостадийное воспламенение, т.е. в ней представлены фундаментальные основы для дальнейшего использования такого воздействия в реальном двигателе. Но предложение специалистов Химфизики было реализовано в презентации доклада.

Что касается первичных электронов. Состав химически активных частиц, наработанных разрядом, находился с использованием стандартной программы для общего пользования Больциг+. Один из параметров программы, который задается, концентрация электронов. Концентрация электронов в стримере наносекундного разряда порядка $(2-4)10^{14}$ электронов на кубический см. Такая концентрация была получена при моделировании динамики распространения стримера, которую получали разные авторы, проводившие такое моделирование. В том числе Найдис и Бабаева. Мы не решали систему уравнений для нахождения концентраций химически активных частиц в стримере, но опирались на расчеты других авторов и задавали этот параметр в программе Больциг+, где решается уравнение Больцмана. Действительно, в тексте на этом не было заострено внимание. Замечание справедливо.

Замечание шестое, о температурных зависимостях констант скоростей реакций. Константы скоростей реакций диссоциации, возбуждения и ионизации зависят от температуры электронов, или от приведенного электрического поля. От температуры газа для низкотемпературной плазмы они не зависят. Константы этих процессов в задачах, которые рассматривались в Главах 6 и 7 определялись при постоянном приведенном электрическом поле, которое входит в знаменатель формулы для G-факторов. Вопрос немного не корректный.

Замечание седьмое, о чувствительности модели к начальным условиям. На самом деле проверка на чувствительность модели к начальным условиям была проведена, и в диссертации есть отдельный раздел в этой же Главе 4, который называется «Влияние различных параметров на конечный результат конверсии». Дополнительные расчеты показали, что в указанных в диссертации интервалах изменения для таких параметров, как f , D , W_{dc} и r_{st} , степень удаления NO из продуктов сгорания зависит в основном от двух величин: от начальной концентрации NO и полного удельного энергозатрата в газ.

Замечание восьмое, о погрешности измерения NO. Речь идет о рисунке, который показан на слайде. Там нет указания погрешностей измерений. Точность прибора, измеряющего NO, хемолюминесцентный анализатор, при низких значениях NO будет в диапазоне 10-15%. Когда был задан в Химфизике, я также на него ответила.

Вопрос девятый, о времени смешивания. Вот тут я немного не соглашусь. Оценки были сделаны. В диссертации оценки времени смешивания полностью не приводятся, но дается ссылка на дополнительный материал к нашей статье, опубликованной в журнале «Fuel», где эти оценки сделаны. В модели считается, что, после впрыска активированной смеси, она быстро перемешивается с остальной частью смеси в цилиндре, приводя к

достаточно равномерному распределению температуры и концентраций компонентов (реактор идеального смешивания). Согласно нашим оценкам на основе уравнения о времени перемешивания с учетом всасывания топливно-воздушной смеси через клапаны, впрыскиваемая смесь, активируемая разрядом, смешивается с газом в цилиндре до начала воспламенения, что приводит к достаточно равномерному распределению температуры и концентрации компонентов. Надо подчеркнуть, что в активируемой смеси радикалы (особенно атом О) мгновенно образуют промежуточные долгоживущие компоненты (пероксиды и др.), и уже они смешиваются с основным газом в цилиндре. В результате мы показали, что если мы вводим химически активные частицы задолго до верхней мертвой точки, то она становится однородной.

Замечание Титова Валерия Александровича о важности учета стенок сосуда.

Действительно, в автореферате об этом не написано. Но об этом написано в диссертации. Потери полезных для воспламенения молекул перекиси водорода, на стенках становится важным, если процесс окисления происходит при низких давлениях. Тогда на стенке две молекулы перекиси превращаются в воду и молекулу кислорода. Если в расчетах учесть потери частиц на стенках, время индукции возрастает. При высоких давлениях, порядка атмосферы, более важными являются реакции в объеме. Учет или не учет теплообмена со стенками определяется условиями проведения эксперимента. Если это было необходимо, то этот процесс также учитывался.

Замечания Шибкова Валерия Михайловича.

О термине «ширина импульса», правильно – «длительность импульса», согласна, замечание справедливо.

О понятии доли объема, занятого всеми стримерами.

В автореферате действительно модель плазмохимического реактора для удаления токсичных примесей описана коротко. Мы создали математическую модель и ввели такое понятие, как доля объема, занятой стримерами, через уравнение сохранения энергии. Нам не важно, как эти стримеры считаются. У нас есть энерговклад в реактор и у нас есть энерговклад в стримеры, которые мы определяем из расчета Бабаева и Найдиса. Мы можем определить долю объема как отношение энерговкладов. По этой причине нам не надо считать эти стримеры, чтобы определить долю объема. У нас другой подход. Полная энергия, вложенная в газ за один импульс, с одной стороны, вкладывается во весь объем реактора, с другой стороны — в объем стримеров. Отношение объема всех стримеров к объему реактора равно отношению удельной энергии, вложенной во весь объем, к удельной вложенной энергии в объем стримера. Удельная вложенная энергия в объем реактора за один импульс определяется из экспериментальных данных, удельная вложенная энергия в объем стримера определяется из расчетов двумерного моделирования распространения стримера. Так что нам не нужно считать стримеры и определять их длину и радиус.

Замечание Паля Александра Фридриховича, о рейтингах реакций на рисунке 6 в автореферате.

Речь идет о диаграмме, которая представлена на слайде. Конкретно для этой диаграммы это описание не совсем корректно, что и отмечено в замечании. Описание общее для всех диаграмм, которые получаются во время счета. Но для некоторых журналов надо было знак «звездочка» в записи реакции заменить на знак «плюс». Для этой диаграммы нет таких реакций, рейтинг которых со временем падает до 9 и меньше (знак тоже «звездочка»). Но в других диаграммах так бывает. Там более общее пояснее, а тут более частное. Это надо было учесть.

Ну вот все, все замечания в отзывах.

Председатель

Спасибо. Тогда мы переходим к заслушиванию мнения оппонентов официальных. Будьте любезны, Николай Леонидович, пожалуйста, мы начнем с заслушивания вашего мнения. Если можно, я вас попрошу не пересказывать содержание диссертации, поскольку доклад, по-моему, был достаточно ясным, и перейти непосредственно к вашему мнению.

Н. Л. Александров

(Выступление оппонента не стенографируется, отзыв оппонента приложен в аттестационном деле.)

Председатель

Спасибо, Николай Леонидович. Если вы больше ничего не хотите сказать, тогда мы дадим сейчас слово на те замечания, которые вы указали, и дальше тогда уже перейдем к Юрию Семеновичу.

Е. А. Филимонова

Первый вопрос: как изменится результат, если мы от дискретного случая перейдем к однородному.

Были сделаны дополнительные расчеты для однородного распределения для случая удаления NO в продуктах сгорания метана. Результаты, которые представлены в диссертации, учитывают неоднородное распределение по пространству химически активных частиц, которые нарабатываются в стримере, и подачу энергии в газ в каждом импульсе в многоимпульсном режиме. Такой подход правильно отражает рассматриваемые эксперименты.

Если предположить, что вся энергия вводится однократно во весь объем, и полное число активных частиц такое же, как в дискретном случае, но они все распределены по пространству, и все активные частицы добавлены сразу, то тогда цена удаления одной молекулы NO возрастает, а эффективность падает. Значения приведены на слайде для условий эксперимента по очистке продуктов сгорания метана, сделанной в группе Асиновского. Из этих расчетов видно, что при однородном распределении частиц и однократном введении всей энергии результат удаления NO значительно отличается от дискретного подхода и экспериментальных значений NO. В однородном случае – эффективность удаления 67%, цена удаления – 370 эВ/молекула, в дискретном – эффективность удаления NO - 93%, цена удаления 265 эВ/молекула. С чем это связано? В экспериментах Асиновского газ находился в реакторе 46 с. Если мы сразу все активные

частицы введем и распределим по разрядной камере, мы имеем очень большую концентрацию химически активных частиц, они сразу провзаимодействуют как с компонентами примеси, так и между собой. В результате они быстро ушли, а то NO, которое осталось, уже больше не удастся удалить. Как получилось в какой-то момент 67%, так это и остается. Когда мы нарабатываем активные частицы от импульса к импульсу, мы учитываем то, что активные компоненты появляются в стримерах, где они взаимно уничтожаются при больших концентрациях, и эти же компоненты, N, OH, O, взаимодействуют с молекулами NO. Скорость убыли активных частиц в реакциях между собой, как указано на слайде, уменьшится квадратично (отмечено красным цветом), их вероятность прореагировать с молекулой NO линейно вырастет. Поэтому при больших концентрациях активные частицы быстро уходят, и начинают работать те реакции, где зависимость линейная. В стримерах при низких концентрациях NO взаимоуничтожение активных частиц значительно возрастает и в некоторых реакциях приводит к дополнительной наработке NO.

Поэтому подход с однородным распределением по пространству и времени даст результат, который может заметно отличаться от экспериментального.

Второй вопрос был связан с подгоночным параметром b . Параметр b возникает, когда определяется полная удельная энергия W_{st} , которая вкладывается в стример, как это записано на слайде. Величина W_{st} определяет долю объема, занятую стримерами, т.е. $F_0 = V_{dc}/V_{st} = W_{st}/W_{dc}$. Часть энергии W_{st} идет на образование химически активных частиц, часть – на нагрев, ветвление стримеров, которое зависит от приложенного напряжения и крутизны фронта. Множественность стримеров приводит к изменению поля перед головкой стримера, могут быть и другие причины.

Энергию, идущую на образование химически активных частиц w_{st} , мы берем из двумерных расчетов одиночного стримера Найдиса и Бабаевой. Эта величина считается заданной. Тогда $W_{st} = w_{st}/b$. Параметр b устанавливается таким, чтобы достичь согласия экспериментальных и расчетных результатов на основании тестовых расчетов для фиксированных условий и установки. Параметр b отражает реальную величину поля и зависит от условий организации разряда. И остается одним и тем же для всего набора экспериментальных данных.

При описании некоторых экспериментов он равнялся 1 по той причине, что это наилучшим образом описывало эксперименты. Такой случай был при моделировании удаления нафталина. Но там был более сложный эксперимент, в котором надо было учесть многократный проход смеси через циркуляционный контур, в который входила и разрядная камера.

Третье замечание. Что касается метастабильных состояний молекул азота. Выбор константы скорости основан на экспериментах, изложенных в статье Johnsen 1991 года. Согласно измерениям излучения второй положительной системы азота, в этой реакции продукты должны быть следующие (иллюстрация на слайде), образуется $N_2(C^3\Pi_u)$. Этот процесс авторами статьи считался доминирующим. В плотных газах (у нас – атмосфера) быстро (за наносекунды) следуют процессы высвечивания с переходом на более низкий уровень (иллюстрация на слайде). В нашей кинетике эти процессы были опущены, т.к. в конечном итоге они приводили к образованию $N_2(A^3\Sigma_u^+)$. Полная константа бралась

согласно измерениям. Эта дополнительная наработка по G-фактору значительно меньше основной наработки электронным ударом: 0.5 против 2.2.

Председатель

Спасибо. Теперь, если у нас есть возможность, давайте мы заслушаем мнение Юрия Семеновича.

Ю. С. Акишев (по видеосвязи)

(Выступление оппонента не стенографируется, отзыв оппонента приложен в аттестационном деле.)

Председатель

Спасибо Юрий Семенович. Пожалуйста, Елена Александровна.

Е. А. Филимонова

Первый вопрос снова связан с G факторами. Я хочу показать две формулы (иллюстрация на слайде). Первая формула, которую мы использовали, мы определяли G-факторы для постоянного приведенного электрического поля, которое зависело от конкретных условий задачи. Это был упрощенный подход. Если при решении задач участвовал Г. В. Найдис, то он находил G-факторы для переменного приведенного электрического поля, которое получалось при решении задачи распространения стримера в двумерной постановке. Поле в головке стримера имеет резко выраженный максимум, а потом падает к телу стримера. Он брал интеграл по полю и определял G- факторы химически активных частиц. Для задач воспламенения и горения в компрессионном двигателе отличие в G-факторах незначительно, как это видно из таблицы для пропано-воздушной (иллюстрация на слайде).

В задачах очистки при выборе поля мы ориентировались на двумерные расчеты Найдиса и Бабаевой о распространении стримера в воздухе и продуктах сгорания. В воздухе максимальное поле в головке стримера ниже, чем в продуктах сгорания. Поле выбиралось такое, чтобы значения G-факторов отличались незначительно от тех, что получались в двумерном расчете.

Второе замечание связано с отрицательными ионами. Это замечание справедливо. В диссертации роль отрицательных ионов обсуждалась мало. Но они присутствовали в начальном составе химически активных частиц, это видно из таблиц, а реакции с отрицательными ионами присутствовали в некоторых диаграммах ведущих реакций. Отрицательные ионы присутствуют в схеме реакций. Обсуждению роли отрицательных ионов посвящена работа по удалению оксидов серы, их влияние было значительно в связи образованием таких ионов, как отрицательные ионы озона O_3^- и оксида SO_3^- и являются важными компонентами в конверсии оксидов серы в кислоты. Этому посвящены две работы – одна – в Физике плазмы, другая – в журнале Japanese of Applied Physics. Но эти работы в диссертацию не вошли.

Теперь замечание про скорость выделения тепла в зависимости от угла поворота коленчатого вала. Это замечание справедливо. Это мое упущение. Речь идет о формуле скорости выделения тепла $dQ/d\Theta$, где Θ - угол поворота коленчатого вала и представлена

на этом слайде. Мы этот угол обозначили CAD, как это обычно обозначают в англоязычной литературе (Crank angle degree). Эта формула является обычной в физике горения, ее не всегда приводят в статьях. Выглядит она вот так и зависит от давления в цилиндре, текущего объема при движении поршня и величины γ – отношение теплоемкости при постоянном давлении к теплоемкости при постоянном объеме, которое тоже меняется из-за изменения состава смеси в результате нагрева, воспламенения и горения.

И следующее замечание – то, что в тексте диссертации нет списка сокращённых обозначений. Замечание справедливо. Это неудобство частично снимается тем, что по мере появления сокращений в скобках дается полное название.

Председатель

Спасибо. Мы можем перейти к третьему оппоненту, Юрий Анатольевич, пожалуйста.

Ю. А. Лебедев

(Выступление оппонента не стенографируется, отзыв оппонента приложен в аттестационном деле.)

Председатель

Спасибо Юрий Анатольевич. Елена Александровна, вам слово для ответа на все замечания.

Е. А. Филимонова

Я хочу поблагодарить Юрия Анатольевича, он задал такие вопросы, которые помогут продемонстрировать все то, что мне не удалось сделать в докладе.

Первый вопрос о том, почему не учитывается возбуждение электронами при свечении, которое возникает, а это свечение возбужденного формальдегида и формила. В диссертации есть тема, о механизме хеми-ионизации при воспламенении метан-кислородной смеси, инициированной лазерной искрой. Так вот, возникает оно вот в этом эксперименте (иллюстрация на слайде). Источники голубого свечения предпламенного состояния метано-кислородной смеси, активированной лазерной искрой, определялись для объяснения этого явления в экспериментах, которые проводились в отделе Юрия Антоновича Коссого, представленного на слайде. В трубке метано-кислородная смесь активировалась лазерной искрой и на временах меньше 1 мс появлялось голубое свечение газа в предпламенном состоянии. В этой работе мы находили концентрацию электронов, образованных в реакциях хеми-ионизации на фронте пламени. Расчетные и экспериментальные значения почти равны. Концентрация электронов достаточно высокая – $2.8 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$. Кроме того, надо было определить источники этого голубого свечения. Был сделан вывод, что за это отвечают CH_2O^* и HCO^* . На основе кинетического анализа был сделан вывод, что возбужденные состояния CH_2O^* и HCO^* не могут быть результатом термического возбуждения (измеренная температура смеси около 1500 К). Это экзотермические реакции, в которых часть выделяемой энергии идет на возбуждение продуктов реакций (иллюстрация на слайде). Формальдегид находится в большой концентрации до воспламенения.

Энергия возбуждения излучающего состояния формальдегида (энергия возбуждения $\text{CH}_2\text{O}(\tilde{A}1A_2)$) составляет 4.07 эВ, формила - 3-4.8 эВ, т.е. довольно низкие, поэтому эти состояния могут активно заселяться в экзотермических реакциях (иллюстрация на слайде). Высокая концентрация электронов, которые появляются в реакциях хеми-ионизации, имеют маленькую энергию - 0.3-0.5 эВ, которой не хватит, чтобы возбудить формальдегид или формил. Спектр излучения представлен на слайде. Голубая область соответствует излучению формальдегида и формила, а также возбужденному CH^* .

Как видно из спектра на слайде, линии Свана выходят за пределы области, которая дает голубое свечение. Кроме того, молекулы димеров углерода образуются, как правило, в богатых смесях, здесь же была стехиометрическая смесь, еще не сгоревшая. Источники голубого свечения определялись для волны неполного сгорания.

И, наконец, **последний вопрос**, вопрос очень любопытен, а именно вопрос, связанный с тем, какие есть эксперименты, которые показывают, что у нас разряд влияет на образование холодного пламени. Описание первых экспериментов по инициированию холодного и голубого пламени внешним источником можно найти в книгах наших академиков Соколика и Штерна. В одном из таких экспериментов холодное и голубое пламя появлялись в закрытой трубке под воздействием нагретой проволоки в смеси эфира или алканов с кислородом или воздухом. Эти пламена возникали при более низких температурах, чем в случае самовоспламенения. Первые эксперименты по воздействию разряда были сделаны давно.

Действие озона было связано с его разложением и образованием атомарного кислорода, а затем и образованием гидропероксидов ROOH . В последние 5 лет аналогичные эксперименты были проведены несколькими исследовательскими группами во Франции и США.

В 2015 г. была опубликована статья, указанная на слайде, с результатами экспериментов, в которых благодаря обработке смеси $\text{C}_1\text{-C}_7$ алканов с O_2 в Ar наносекундным разрядом в проточном реакторе в диапазоне температур 420-1250 К удалось увидеть уменьшение потребления топлива (пропан) в области ОТК при давлении 1 атм, т.е. проявление ОТК «спустилось» в более низкие давления (сравнивалось с поведением смеси при давлении 10 атм при одинаковых температурах). Без разряда при 1 атм эффект ОТК не проявляется вообще.

В этом году на конференции AIAA была представлена работа из США по воздействию добавок $\text{NO}=300$ ppm – на окисление додекана. На слайде показана зависимость доли топлива от начальной температуры смеси. Без NO – черная кривая, с NO – красная кривая. До $T = 600$ К, доля топлива уменьшалась с ростом температуры, в области ОТК – выше 600 К – увеличилась, т.е. скорость окисления упала. На рисунке явно видно, что в диапазоне $T = 600\text{-}900$ К, где проявляется отрицательный температурный коэффициент, топливо начинает быстрее окисляться (его меньше осталось) при добавлении NO – максимум уменьшился. Эта работа была недавно опубликована в журнале *Proceedings of Combustion institute*.

Результаты по воздействию разряда на ОТК, представленные в диссертации, тоже отражают изменение скорости окисления, что приводит к более быстрому воспламенению.

Председатель

Спасибо, Елена Александровна. Мы переходим к заключительной дискуссии по диссертации, пожалуйста, слово Амирову.

Р. Х. Амиров

В нашем институте проводилось первое тестирование, связанное с проверкой представленной модели очистки. Надо сказать, что эта область в девяностые годы была очень горячая. Дело в том, что в этот момент закончилась холодная война и мы, люди, которые занимались импульсной техникой, бросились на задачи экологии. В том числе и теоретики, ясно было, что именно надо решать. В эксперименте преимущество получили те, у кого была наносекундная техника. Это две страны, Советский Союз и США. И мы как раз до этого лет пятнадцать уже занимались наносекундными разрядами, это раз, а второе – у нас были наработаны исследования со всеми разработчиками наносекундной техники, поэтому мы быстро реализовали эксперимент, при чем при поддержке нашего института сразу вышли на реальные объекты, на продукты сгорания, на электростанции, в частности, вот такой провели эксперимент, когда полная длина проволоки, с которой стартовали стримеры, была сто сорок пять метров. И специальный генератор изготовили. И с чем я сразу столкнулся, анализируя наши данные, которые мы получили в этом эксперименте? Как переносить наши эксперименты на другие условия эксперимента, потому что каждый выброс – он уникален, меняется соотношение между кислородом, углекислым газом, водой, меняются кратные концентрации токсичных компонентов, в частности, токсичные компоненты присутствуют одновременно, как диоксид серы и окислы азота. В этот момент выяснилось, например, что нет теории стримерного разряда. Была книжка Лозанского и Фирсова, где излагались некие основы стримеров, но никаких данных, какой будет энергозатрат в стример, сколько там будет активных частиц, концентрация частиц, ничего не было. Писались модели по химической кинетике для однородного случая, проводил такие расчеты Пенетранте, но, самый продвинутый случай – то неоднородный. Явно это не годилось и все равно было видно, что надо учитывать достаточное число компонент, пятьсот реакций, причем реакции идут с совершенно разной скоростью: сначала у вас идут компоненты заряженные, это микросекунды, затем реагируют радикалы, следующий диапазон времен, до миллисекунд, а потом вступают другие реакции с участием озона и все прочее. Т.е., это жесткая система дифференциальных уравнений, сотни у вас уравнений, которую надо интегрировать, ясно что с переменным шагом, иначе никогда задачу не решить. Т.е., на самом деле, Елена Александровна об этом не рассказывала, следующим пунктом идет написание этих компьютерных кодов, интеграторов и т.д. Но в результате что получилось? В ИВТ АН оказались люди, которые смогли смоделировать стример. Это прежде всего Георгий Найдис, Наталья Юрьевна Бабаева, это Андрей Куликовский. У Андрея Куликовского – вся его докторская диссертация посвящена моделированию стримера, что бы вы понимали, какие сложности. И все равно было неясно, как учесть неоднородность разряда и дискретность. Пик исследования – это 1993 г., прошла конференция в Кембридже, посвященная использованию низкотемпературной плазмы для очистки газа. Там были обозначены все игры и нам удалось попасть в двухтомник, который был опубликован по результатам конференции и стал такой своеобразной энциклопедией. И нас стали

приглашать во многие места, а модели, адекватные неоднородному разряду, так и не было. И я даже был уверен, что она и не появится, потому что надо учитывать ионные потоки, даже воздействие разряда на течение газа, там возникают кое-какие эффекты, которые мы наблюдали, множественность стримеров, и т.д. И вот, к моему удивлению, в 1998 г. на конференции в Петрозаводске появилась работа, и я был просто поражен, как удалось разработать ту удочку, тот инструмент, вот этот подход, который позволил решать вот такого рода сложные задачи. И в результате Елена Александровна оказалась исключительно востребована. Своей удочкой она стала вылавливать очень системные вещи. Первое, она описала эксперименты, которые мы проделали, дальше были эксперименты с оксидами серы, которые были сделаны в Южной Корее, а затем взялась за очень интересную задачу, связанную с дизельными двигателями. Там более высокие требования по потреблению энергии. Появились какие-то разные эксперименты, что если добавить углеводороды, из бака просто с топливом вы можете взять часть углеводородов и пустить в выхлоп, и обработать разрядом. Елену Александровну пригласил Сеульский университет, и вот она должна была за год, там был поставлен эксперимент, и вместе с ними объяснить или предложить объяснение. Там она с этой задачей блестяще справилась. Следующий шаг - тоже было приглашение на международном уровне, она в Инчхонском университете провела работу по сравнению двух типов разрядов, барьерный и наносекундный стримерный разряд, и показала в каких случаях предпочтительно использовать тот или другой. Дальше она работала в Эндховенском университете связано с биотопливом. Т.е., она всегда находилась вот в центре всех событий, и вот в этой жесткой конкуренции просто побеждала, добивалась результатов, первой получала результаты, которые все знали, потому что она всегда выступала на всех ведущих конференциях, обо всем докладывала, сама выполняла гранты, которыми она руководила, в том числе и международные. Т.е., она исключительно востребована, и вот в качестве примера, последняя задача, наиболее характерная, связанная с компрессионным двигателем. Дело в том, что были достигнуты результаты, о них она не упомянула, в эти же годы, когда она получала основные результаты, наш институт выполнял очень большую работу с Газпромом по получению метанола, где использовались дизельные двигатели как химический реактор сжатия. И она, фактически, как вот Вячеслав Михайлович Батенин, когда был руководителем института, она спасла ситуацию, потому что нужно было некое обоснование теоретическое. Вот знание химического реактора сжатия и стримерного разряда позволило ей получить очень интересные результаты по компрессионным двигателям. В качестве примера ее востребованности я, зная ее огромные возможности и то, что, по мере выполнения всех этих работ, она создала большую библиотеку по константам реакций, по скоростям, и т.д., и, в частности, я ее пригласил для выполнения гранта, что занимается задачей синтеза графенов и углеродных нанотрубок в плазменных струях и выяснил, что очень важно знать газовые предшественники в области нуклеации состав плазмы. И мы вот с ней опубликовали две работы в ведущих журналах с высоким импакт фактором, где она очень точно посчитала нам вот эти газовые предшественники, оказалось, что совершенно ситуация меняется в зависимости от того, какой газ вы подаете плазмообразующий.

Сама диссертация очень большая, это фундаментальный труд, и тут это уже было произнесено, исключительно добросовестный. Я убедился, что некоторые задачи

тестирования, это могли быть отдельные задачи, которые можно выносить в отдельную главу. Для нашего института это очень хорошее достижение. Престиж института от этого только возрастет. Мне очевидно, Елена Александровна могла защитить диссертацию много лет назад, но она хотела довести последние задачи до полного идеала. У меня вопросов нет.

Председатель

Спасибо. Кто еще хочет подискутировать?

Л. М. Василяк

Я входил в экспертную группу, которая рекомендовала данную диссертацию на Совет, поэтому я внимательно ознакомился с данной диссертацией. Мне было очень интересно, потому что мы много лет занимались наносекундными разрядами в различных средах и рассматривали, естественно, различные применения. Мне было очень интересно читать эту работу. Должен сказать, что она хорошо, ясно написана, приятно читать, это не статьи, которые разрознены. Здесь все систематизировано, и мне работа очень понравилась и объемом, и полученными результатами. С моей точки зрения, очень хорошая диссертационная работа, я буду голосовать «за», и призываю коллег поддержать эту работу также.

Председатель

Спасибо, Леонид Михайлович. Еще есть желающие выступить? Да Генрих Эдгарович, слушаем вас.

Г. Э. Норман (по видеосвязи)

Дорогие коллеги, я хотел бы, чтобы на этой защите прозвучало имя Артема Хачатуровича Мнацаканяна. Артема нет с нами уже двадцать семь лет, но он сумел подготовить учеников, которые не растерялись после его безвременной кончины и стали работать самостоятельно. Первый выступил Гера Найдис, сегодня мы слушаем Елену Филимонову, которая получила плацдарм от Артема и смогла уже действовать совершенно самостоятельно. Я очень рад этому событию, но есть еще в запасе Наташа Бабаева, ну а сегодня я, конечно, буду голосовать «за» и желаю Елене Филимоновой дальнейшей успешной работы.

Председатель

Спасибо, Генрих Эдгарович. Если нет больше желающих выступить, заключительное слово вам, Елена Александровна.

Е. А. Филимонова

Что я хочу сказать. Когда я пришла в Институт, я делала кандидатскую диссертацию в отделе Мнацаканяна. Вместе с ним работал Марк Борисович Железняк. Они были моими научными наставниками, и руководителем диссертации был Марк Борисович Железняк. Поэтому я, прежде всего, хочу поблагодарить и выразить искреннюю благодарность Марку Борисовичу Железнику за те основы, которые были заложены при совместной

работе над задачами в области плазмохимии. А также я благодарю своих коллег и соавторов, Амирова Р.Х., Битюрин В.А, Бочарова А. Н., Добровольскую А.С, Найдиса Г. В., Попова Н.А. за плодотворное сотрудничество, полезные обсуждения, конструктивные советы, всестороннюю поддержку, постоянное внимание. Также я благодарю своих оппонентов, которые меня давно знают и согласились быть моими оппонентами. А также я благодарю членов Диссертационного Совета, которые меня выслушали. Я надеюсь, что диссертация вам понравилась. И, наконец, я хочу поблагодарить свою семью, которая на протяжении всего времени оказывала мне поддержку, и особенно технического характера, за это им большое спасибо.

Председатель

Спасибо, Елена Александровна. Мы переходим к заключительной процедуре, это голосование. Голосование у нас проходит без выбора счетной комиссии, Михаил Михайлович является человеком, который собирает как наши голоса, присутствующих здесь, так и голосующих удаленно членов Совета, и дальше огласит нам результат.

(Проводится процедура тайного голосования).

Ученый секретарь

Уважаемые коллеги! Все члены Диссертационного Совета, которые присутствовали у нас на заседании как очно, так и заочно, проголосовали, и, с вашего позволения, я готов огласить результаты. Итак, у нас на заседании сегодня присутствовал 21 член Диссертационного Совета, из них присутствовало на защите по очно 11, докторов наук по профилю 7, присутствовало онлайн 10, докторов наук по профилю 4. Проголосовало 21 человек, все «за».

Председатель

Прошу утвердить результаты голосования. Кто за?

(Протокол счетной комиссии утвержден единогласно).

Поздравляем вас, Елена Александровна! Продолжения и больших успехов!

Теперь нам проект Заключения надо рассмотреть.

(Члены диссертационного совета обсуждают проект заключения).

Председатель

Предлагаю принять заключение с теми поправками, которые здесь предложены.

(Проект заключения принят единогласно).

Спасибо! Мы исчерпали повестку.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОГО СОВЕТА Д 002.110.02(24.1.193.01),
СОЗДАННОГО НА БАЗЕ ФЕДЕРАЛЬНОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО БЮДЖЕТНОГО
УЧРЕЖДЕНИЯ НАУКИ ОБЪЕДИНЕННОГО ИНСТИТУТА ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУР
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК, ПО ДИССЕРТАЦИИ НА СОИСКАНИЕ УЧЕНОЙ
СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 29.09.2021г. № 13

О присуждении Филимоновой Елене Александровне, гражданке Российской Федерации ученой степени доктора физико-математических наук.

Диссертация «Кинетика процессов горения, конверсии оксидов азота и углеводородов, стимулированных наносекундными разрядами» по специальности 01.04.08 (1.3.9) – физика плазмы принята к защите 10.06.2021г., (протокол заседания № 8) диссертационным советом Д 002.110.02 (24.1.193.01), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук (125412, г. Москва, Ижорская ул., д. 13, стр. 2, (495) 485-8345, jiht.ru), утвержденного Приказом Министерства образования и науки Российской Федерации № 105/нк от 11.04.2012г.

Соискатель Филимонова Елена Александровна 1956 года рождения, в 1981 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (государственный университет)» (МФТИ).

В 1992 г. защитила диссертацию на тему "Теоретическое исследование кинетики и структуры интенсивно излучающих ударных волн в инертных газах" на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.08 – физика и химия плазмы.

Работает в должности старшего научного сотрудника лаборатории № 21.1. – численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в лаборатории 21.1 - численного моделирования магнитоплазменной аэродинамики Федерального государственного бюджетного

учреждения науки Объединенного института высоких температур Российской академии наук.

Официальные оппоненты:

- доктор физико-математических наук, профессор, начальник лаборатории кинетики слабоионизованной плазмы Акционерного общества "Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований" (ТРИНИТИ) Акишев Юрий Семенович.

- доктор физико-математических наук, профессор, заместитель заведующего кафедрой прикладной физики Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования "Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)" (МФТИ), Александров Николай Леонидович.

- доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, и.о. зав. лабораторией "Плазмохимии и физикохимии импульсных процессов" Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН (ИНХС РАН) Лебедев Юрий Анатольевич.

дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский Центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН) в своем положительном заключении, составленном сотрудником лаборатории окисления углеводородов д.ф.-м.н., профессором, Власовым П.А. и сотрудником лаборатории детонации к.т.н., доцентом, Авдеевым К.А. (утвержденном 02.07.2021г. директором, д.х.м., профессором Надточенко В.А.) указала, что теоретическая значимость проведенных исследований определяется результатами, которые позволяют объяснить полученные недавно экспериментальные данные о воздействии плазмы на многостадийное воспламенение и дают возможность их применять в разрабатываемых сейчас гибридных двигателях с воспламенением гомогенной смеси от сжатия для эффективной организации горения. Практическая значимость связана с возможностью управления процессом окисления и горения с помощью наносекундного разряда в различных приложениях. Например, для организации горения обедненной смеси через воздействие высокочастотным коронным разрядом на многостадийное воспламенение, для реформинга и получения новых веществ; для целей очистки от токсичных примесей совместное использование плазмы наносекундного разряда и различных катализаторов имеет хороший потенциал для индустриального применения.

Соискатель имеет 42 опубликованные работы в рецензируемых журналах, в том числе по теме диссертации 21 статья в журналах, индексируются в Web of Science, Scopus и рекомендованных ВАК. Также результаты диссертационных исследований представлены в главах 7 книг, включая Энциклопедию низкотемпературной плазмы, и в 80 тезисах докладов различных конференций.

Статьи в журналах, индексируемых в Web of Science, Scopus и рекомендованных ВАК, по теме диссертации:

1. Железняк М.Б., Филимонова Е.А. Моделирование газофазного химического реактора на основе импульсного стримерного разряда для удаления токсичных примесей. Часть I // Теплофизика высоких температур. 1998. Т.36. №.3. С.374-379.

2. Железняк М.Б., Филимонова Е.А. Моделирование газофазного химического реактора на основе импульсного стримерного разряда для удаления токсичных примесей // Теплофизика высоких температур. 1998. Т.36. №.4. С.557-564.

3. Filimonova E.A., Amirov R.H., Kim H.T. and Park I.H. Comparative modelling of NO_x and SO₂ removal from pollutant gases by using pulsed corona and silent discharges // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. V. 33. P.1716-1727.

4. Филимонова Е.А., Амиров Р.Х., Ким Х.Т., Парк И.Х. Моделирование конверсии оксидов азота в выхлопе дизельного двигателя, обработанного барьерным разрядом // Химическая физика. 2000. Т.19. №. 9. С.75-82.

5. Филимонова Е.А., Амиров Р.Х. Моделирование конверсии этилена, инициируемой стримерной короной в потоке воздуха // Физика плазмы. 2001. Т.27. №8. С.750-756.

6. Filimonova E.A., Kim Y., Hong S.H., and Song Y.H. Multiparametric investigation on NO_x removal from simulated diesel exhaust with hydrocarbons by pulsed corona discharge // J. Phys. D: Appl. Phys. 2002. V. 35. P.2795-2807.

7. Bocharov A.N., Bityurin V.A., Filimonova E.A., Klimov A.I. Numerical study of plasma assisted mixing and combustion in non- premixed flows // 42 AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. AIAA Paper. 2004. P. 12423-12434.

8. Bityurin V.A., Bocharov A.N., Filimonova E.A. Effects of nitrogen oxide on ignition of non-premixed system // Collection of Technical Papers - 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibition. AIAA Paper 2006-1218. 2006. P. 14807-14811.

9. Bityurin V.A., Filimonova E.A. and Naidis G.V. Mechanisms of conversion of heavy hydrocarbons in biogas initiated by pulsed corona discharges / In: Plasma Assisted

Decontamination of Biological and Chemical Agents, NATO ASI Series, Ed. by S.Gucery and V. Smirnov, Springer, 2008. P.135-142.

10. Bityurin V.A., Filimonova E.A., Naidis G.V. Simulation of naphthalene conversion in biogas initiated by pulsed corona discharges // IEEE Transactions on Plasma Science. 2009. V.37. № 6. Part 1. P. 911-919.

11. Filimonova E.A. and Naidis G.V. Effect of gas mixture composition on tar removal process in a pulsed corona discharge reactor // J. of Physics: Conference Series. 2010. V. 257. 012018.

12. Гордин К.А., Масленников В.М., Филимонова Е.А. Оценка уровня эмиссии оксидов азота при подаче пара с природным газом в камеру сгорания газотурбинной установки // Теплофизика высоких температур. 2013. Т. 51. №6. С. 937-944.

13. Artem'ev K.B., Kazantsev S.Yu., Kononov N.G., Kossyi I.A., Malykh N.I., Popov N.A., Tarasova N.M., Filimonova E.A., Firsov K.N. Nonequilibrium plasma accompanying the ignition of methane-oxygen mixtures // J. Phys. D: Appl. Phys. 2013. V.46. 055201.

14. Фирсов А.А., Исаенков Ю.И., Крупский М.Г., Рудаков В.Ю., Филимонова Е.А., Яранцев Д.А., Леонов С.Б. Неравновесная инициация объемного горения в двигателе внутреннего сгорания: моделирование и постановка эксперимента // Компьютерные исследования и моделирование. 2014. Т. 6. № 6. С. 911–922.

15. Filimonova E.A. Discharge effect on the negative temperature coefficient behaviour and multistage ignition in C₃H₈-air mixture // J. Phys. D: Appl. Phys. 2015. V. 48. 015201.

16. Artem'ev K.V., Berezhetskaya N.K., Kazantsev S.Yu., Kononov N.G., Kossyi I.A., Popov N.A., Tarasova N.M., Filimonova E.A., Firsov K.N. Fast combustion waves and chemi-ionization processes in a flame initiated by a powerful local plasma source in a closed reactor // Philosophical Transactions Royal Society A. 2015. V. 373. 20140334.

17. Filimonova E., Bocharov A. Bityurin V. Influence of a non-equilibrium discharge impact on the low temperature combustion stage in the HCCI engine // Fuel. 2018. V. 228. С.309-322.

18. Dobrovolskaya A., Filimonova E., Bityurin V., Bocharov A., Klyuchnikov N. Different numerical approaches for simulation of combustion wave initiation by electrical discharge // AIP Conference Proceedings. 2018. V. 1978(1).470074.

19. Dobrovolskaya A.S., Filimonova E.A., Bityurin V.A., Bocharov A.N. Numerical study of combustion-wave propagation initiated by non-equilibrium discharge // J. of Physics. Conference Series. 2019. V.1147. 012054.

20. Filimonova E.A., Bocharov A.N., Dobrovolskaya A.S., Bityurin V.A. Influence of nanoseconds pulsed discharges on the composition of intermediate and final combustion

products in the HCCI engine // Plasma Chemistry and Plasma Processing. 2019. V.39. № 3. P. 683-694.

21. Filimonova E.A., Dobrovolskaya A.S., Bocharov A.N., Bityurin V.A., Naidis G.V. Formation of combustion wave in lean propane-air mixture with a non-uniform chemical reactivity initiated by nanosecond streamer discharges in the HCCI engine // Combustion and Flame. 2020. V.215. P. 401-416.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Казахский Национальный университет имени аль-Фараби** (зам. Председателя Национального Научного Совета Республики Казахстан по приоритетному направлению «Энергетика и машиностроение», профессор кафедры теплофизики и технической физики физико-технического факультета, д.т.н., профессор Мессерле В.Е.), отзыв положительный, без замечаний.

2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук (ИТПМ СО РАН)** (в.н.с. лаборатории 7, д.ф.-м.н. Швейгерт И.В.), отзыв положительный, без замечаний.

3. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт химии растворов им. Г.А. Крестова** (г.н.с. лаборатории 3-6, д.ф.-м.н., доцент, Титов В.А.), отзыв положительный, сделано замечание:

- при описании в автореферате модели многостадийного воспламенения (Глава 2) автором не указано, учитывался ли теплообмен со стенками и потери радикалов на стенках сосуда. Эти процессы могут быть важны, особенно при низких давлениях, и они могут влиять на время задержки воспламенения.

4. **МГУ им. М.В. Ломоносова, Физический факультет** (д.ф.-м.н, профессор физического факультета В.М. Шибков), отзыв положительный, с замечаниями:

- В тексте автореферата несколько раз, например, на стр.2, стр. 30, автор использует выражение – «ширина импульса». Правильно использовать общепринятое выражение «длительность импульса».

- На стр. 16 автором вводится понятие доли объема, занятого всеми стримерами, возникающими за один импульс, к объему реактора. Стримерный разряд представляет собой объемное плазменное образование. Стримеры имеют различные диаметры и различную длину. Они могут возникать с различными временными задержками. При регистрации они могут затенять друг друга. Для правильного расчета необходимо

проводить томографические исследования. В тексте автореферата необходимо кратко пояснить метод подсчета объема всех стримеров, применяемый автором.

- На стр. 27 вводится величина W , которая делится на две части: одна часть расходуется на нагрев газа ΔT_h (VT-релаксация и быстрый нагрев [54]), а другая на производство активных частиц ΔT_{ac} . Ссылка [54] относится к работе 2016 г., хотя автору хорошо известно, что понятие быстрого нагрева молекулярных газов в условиях низкотемпературной плазмы было введено и подробно исследовано еще в конце прошлого века. В этом случае надо сослаться не только на работу [54], но и на пионерские теоретические и экспериментальные работы, в которых был подробно исследован быстрый нагрев молекулярного азота и воздуха в условиях неравновесной низкотемпературной газоразрядной плазмы.

5. Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ) (в.н.с. отдела Микроэлектроники НИИЯФ МГУ, д.ф.-м.н. Паль А.Ф.), отзыв положительный, с замечанием:

- Непонятна формула вычисления рейтинга реакции на рисунке 6. В тексте указано, что рейтинг от 1 до 9 и меньше (*), при этом на самом рисунке есть рейтинг только до 7. Также в пояснении к этому рисунку в тексте автореферата указано, что знак «*» между символьным названием компонентов означает «+», хотя в таблице вообще нет знака «*».

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается:

- д.ф.-м.н., профессор Акишев Ю.С. является ведущим ученым в области физики и химии газовых разрядов в плотных газах, применения неравновесной низкотемпературной плазмы для обработки газов, жидкостей и поверхностей.

1. Y. Akishev, V. Karalnik, M. Medvedev, A. Petryakov, T. Shao, Ch. Zhang, B. Huang. About the possible source of seed electrons initiating the very first breakdown in a DBD operating with the air at atmospheric pressure // Plasma Sources Science and Technology. 2021.V. 30. No 2. 025008.

2. Y. Akishev, B. Huang, Ch. Zhang, I. Adamovich, T. Shao. Surface ionization wave propagation in the nanosecond pulsed surface dielectric barrier discharge: the influence of dielectric material and pulse repetition rate // Plasma Sources Science and Technology. 2020. v.29. 044001.

3. Ю.С. Акишев. Низкотемпературная плазма при атмосферном давлении и ее возможности для приложений // Изв. вузов. Химия и хим. технология. 2019. т. 62. Вып. 8, с.26-60.

- д.ф.-м.н., профессор Александров Н.Л. является экспертом, известным ученым в области химической кинетики воздуха, углеводородов и плазмы, созданной наносекундными разрядами, а также ведущий специалист в области физики газового разряда.

1. Анохин Е.М., Киндышева С.В., Александров Н.Л. Воспламенение углеводород-кислородных смесей с помощью наносекундного поверхностного диэлектрического барьерного разряда // Физика плазмы. 2018. т. 44. № 11. с. 927–936.

2. I.N. Kosarev, A.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov. Development of high voltage nanosecond discharge in strongly nonuniform gas //Plasma Sources Science and Technology. 2019. v.28. 015005.

3. M.A. Popov, E.M. Anokhin, A.Yu. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov. Plasma decay in hydrocarbons and H₂O-containing mixtures excited by high-voltage nanosecond discharge at elevated gas temperatures // Combustion and Flame, 2020. v. 219. p.393-404.

- д.ф.-м.н. Лебедев Ю.А. является ведущим ученым в области физики и химии плазмы газовых разрядов, признанным специалистом в диагностике и моделировании неравновесной плазмы СВЧ разрядов.

1. Лебедев Ю. А., Татаринов А. В., Эпштейн И. Л. О роли электронного удара в СВЧ-разряде в жидком n-гептане при атмосферном давлении // Прикладная физика. 2016. № 3. с.11-14.

2. Epstein I.L., Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V. and Bilera I.V. 0D kinetic model for the microwave discharge in liquid n-heptane including carbonaceous particles production // J. Phys. D: Appl. Phys. 2018. V. 51 214007.

3. Lebedev Yu.A., Tatarinov A.V., Epstein I.L. Effect of charging solid particles on their growth process and parameters of microwave discharge in liquid n-heptane // Plasma Sources Science and Technology. 2020. v.29. No.6. 015005.

- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский Центр химической физики им. Н.Н. Семенова РАН (ИХФ РАН) является профильной организацией, специализирующейся на проведении исследований в области химической кинетики горения и газодинамики. В организации ведутся систематические экспериментальные и расчетно-теоретические исследования

динамических процессов в реагирующих газах в двигателях внутреннего сгорания и детонационных двигателях.

1. Сергеев С. С., Фролов С. М., Басевич В. Я., Басара Б., Пришинг П. Моделирование рабочего процесса дизеля с рециркуляцией отработавших газов на базе детального кинетического механизма горения топлива // Горение и взрыв. 2019. т. 12. № 2. с. 92-101.
2. Басевич В. Я., Беляев А. А., Медведев С. Н., Фролов С. М., Фролов Ф. С. Детальный кинетический механизм многостадийного окисления и горения октанов // Химическая физика. 2018. т. 37. № 6. с. 44–54.
3. Фролов С.М., Сметанюк В.А., Аксёнов В.С., Коваль А.С. Переход горения в детонацию в перекрёстных высокоскоростных струях топливных компонентов // Доклады академии наук. 2017. т. 476. № 1. с. 59–62.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненных соискателем исследований:

- Впервые показано, что наносекундный разряд: 1) не подавляет, а стимулирует развитие и увеличивает интенсивность холодного пламени; 2) уменьшает немонокотное окисление смеси с ростом начальной температуры, вплоть до подавления отрицательного температурного коэффициента скорости окисления. Эффект зависит от удельного энерговклада и связан с частичной заменой химического кинетического механизма в области отрицательного температурного коэффициента, а именно: включением низкотемпературного механизма разветвления цепи и активации реакций теплового механизма через простые разветвления за счет радикалов O, H, OH. Таким воздействием топливно-воздушная смесь переводится в диапазон температур, где высокотемпературный механизм окисления реализуется с более высокой скоростью.

- Разработана модель химического реактора сжатия (аналог компрессионного двигателя) с инициацией воспламенения неравновесной плазмой разряда. В рамках нульмерного подхода для описания воздействия разряда на массу газа в цилиндре двигателя был предложен оригинальный способ: в систему уравнений сохранения был включен дополнительный член в виде потока небольшой массы смеси, обработанной разрядом, через специальный порт. Состав химически активных частиц находился в предположении постоянного электрического поля с учетом реакций диссоциации топлива и окислителя электронным ударом, нагрев этой массы – в предположении постоянного давления, для фиксированного энерговклада. Модель химического реактора сжатия с включением системы физико-химических процессов, описывающих активацию топливно-воздушной

смеси внешним источником, важна для организации процесса горения таким образом, чтобы получить заданные характеристики (температура, давление, мощность) и состав продуктов сгорания.

- Предложен новый способ организации горения в компрессионном двигателе с помощью воздействия неравновесной плазмы разряда на бедную смесь с учетом стадии низкотемпературного выделения тепла (стадия холодного пламени) или выделения тепла при промежуточных температурах (стадия голубого пламени). Разряд непосредственно смесь не воспламеняет, а лишь подталкивает начало этих стадий и способствует более быстрому их протеканию. Смесь воспламеняется за счет сжатия. Выявлен кинетический механизм селективного воздействия разряда. Установлено, что оптимальным временем инициации разряда является время непосредственно перед началом разложения основного органического гидропероксида на стадии низкотемпературного выделения тепла. В результате удастся ликвидировать пропуски пламени в рабочем цикле и стабилизировать воспламенение.

- Предложены рекомендации организации горения бедной смеси с помощью наносекундного разряда для сокращения в выхлопе CO и несгоревших углеводородов и незначительного увеличения концентрации NO_x (за счет нетермических) по сравнению с термическими NO_x в компрессионном двигателе.

- Впервые показано, что значительное влияние высокочастотного коронного разряда на воспламенение и режим распространения волны горения (дефлаграционное распространение пламени и переход к самовоспламенению) в компрессионном двигателе объясняется стимуляцией кинетического механизма окисления при низких и промежуточных температурах и зависит от удельного энерговклада в стримерный канал и момента инициации разряда относительно верхней мертвой точки. Необходимо рассматривать влияние энерговклада с учетом структуры активированной зоны, созданной стримерными каналами. Показано, что высокочастотный коронный разряд инициирует горение в первоначально невоспламеняющейся вследствие сжатия смеси и позволяет преодолеть трудности воспламенения и распространения волны горения в бедной смеси, использование которой в двигателях внутреннего сгорания в настоящее время является приоритетным. Особенностью подхода к моделированию был учет внешнего сжатия в уравнениях Навье-Стокса (имитация реального изменения давления в цилиндре без разряда).

- Разработан метод учета дискретного по времени и пространству образования реагентов, связанного с многоканальной структурой наносекундного разряда. Метод применен для

создания модели реактора для удаления токсичных примесей, и расчета состава и нагрева области, активированной высокочастотным коронным разрядом в компрессионном двигателе.

- Построена кинетическая химическая модель конверсии NO_x в продуктах сгорания дизельного двигателя, содержащих в качестве добавок этилен и пропилен, при инициации процесса наносекундным разрядом. Выявлено, что при одной и той же температуре пропилен в большей степени способствует уменьшению концентрации оксидов азота в процессе очистки, чем этилен, благодаря дополнительному образованию различных радикалов углеводородов, которые реагируют с NO . Модель газофазного химического реактора позволяет проводить оптимизацию процессов в газовой фазе, то есть выбирать тип углеводородной добавки, величину ее концентрации в зависимости от состава газа и температуры, оптимизировать частотный режим и удельный энергозатрат за импульс.

- Впервые показана важная роль возбужденных молекул азота в разложении нафталина в биогазе разного состава при инициации наносекундным разрядом, а также необходимость учета ион-молекулярных, электрон-ионных реакций и диссоциативной рекомбинации в условиях высоких электрических полей как дополнительный источник важных нейтральных компонентов для разложения нафталина. Однако, достаточно приближенного подхода к учету реакций с участием заряженных частиц.

- Проведено сравнительное моделирование удаления NO_x и SO_x из воздуха и продуктов сгорания, иницированного коронным или диэлектрическим барьерным разрядом. Представлены различия процесса очистки в этих разрядных реакторах. Даны рекомендации, в каких смесях и для каких примесей лучше использовать каждый из исследованных разрядов.

- Создан комплекс, состоящий из базы данных химических реакций и программного комплекса, как инструмент для решения широкого круга задач для целей конверсии, окисления и горения с инициацией наносекундным стримерным разрядом. Возможности такого инструмента были продемонстрированы при решении задачи об эмиссии оксидов азота при подаче пара с природным газом в камеру сгорания газотурбинной установки (ГТУ), и в задаче о хеми-ионизации в пламени смеси $\text{CH}_4\text{-O}_2$ в условиях воспламенения, инициируемого мощным лазерным излучением. В первой задаче было показано, что оптимальный выбор условий работы камеры сгорания ГТУ позволяет получить содержание NO_x в продуктах сгорания на уровне нескольких ppm. Во второй задаче удалось объяснить экспериментальные данные по концентрации электронов на фронте

пламени и по частоте столкновения между электронами и нейтральными частицами в горячей зоне.

Научная и практическая значимость

Практическая значимость напрямую связана с пониманием того, что в наносекундном стримерном разряде эффективность воздействия плазмы обусловлена наработкой химически активных частиц электронным ударом, которая зависит от внешних характеристик электрической цепи. Это дает средство для управления процессом в различных приложениях. В зависимости от условий воздействия можно управлять конечным состоянием системы через изменение ее параметров на стадии разряда. Эта особенность используется для целей воспламенения в ДВС и очистки загрязненных газов в задачах диссертационного исследования.

Воздействие на многостадийное воспламенение дает ключ к управлению процессами окисления и горения в устройствах для практического применения. На этой основе предложен способ организации горения обедненной смеси в компрессионном двигателе путем изменении реакционного пути протекания низкотемпературной стадии горения за счет активации смеси высокочастотным коронным разрядом и стимулированием самовоспламенения от сжатия. Этот способ позволяет улучшить состав выхлопа. Даны рекомендации по выбору управляющих параметров. Разряд непосредственно смесь не воспламеняет из-за небольших удельных энергокладов. Эти результаты могут быть применимы для гибридных двигателей, которые в стабильных условиях могут работать как компрессионные с гомогенной смесью, а в нестабильных условиях инициатором горения являются высокочастотные коронные разряды.

В зависимости от условий воздействия разрядом, процесс образования долгоживущих промежуточных компонентов можно оборвать на стадии холодного пламени или стадии голубого пламени с учетом проявления отрицательного температурного коэффициента полной скорости окисления смеси, что важно для активирования смеси для дальнейшего использования (горение, реформинг, получение новых веществ).

Высокочастотные коронные разряды в качестве активатора воспламенения (а не замены свечи зажигания) потенциально устраняют необходимость использования дорогостоящих систем последующей обработки выхлопных газов (что сопоставимо с дополнительным использованием топлива на 2-4%).

В двух стадийной очистке (разряд и катализатор) основное энергопотребление будет в реакторе с разрядом, создающим неравновесную плазму. Полученные в диссертации результаты позволяют проводить оптимизацию конверсии в газовой фазе. Для целей очистки от оксидов азота, серы и ароматических углеводородов комбинированное использование плазмы наносекундных разрядов и различных катализаторов имеет хороший потенциал для промышленного применения.

Поскольку в настоящий момент нет возможности сравнить воспламенение в компрессионном двигателе с инициацией высокочастотным коронным разрядом напрямую, то предложенные подходы и модель химического реактора сжатия служат основой для прогнозирования результатов.

Представленные в диссертации инструменты и методы исследования могут быть использованы для решения широкого круга задач для целей конверсии, окисления и горения с возможной инициацией наносекундным разрядом, что позволит получить новые, значимые результаты.

Результаты диссертационной работы могут быть применены в следующих организациях: 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.

Оценка достоверности результатов

Для решения различных задач по очистке загрязненных газов от токсичных примесей, конверсии и горению проводилось предварительное тестирование кинетических схем на экспериментах, взятых из литературных источников. Результаты численных исследований по очистке и конверсии загрязненных газов, а также горению в закрытых объемах хорошо согласуются с экспериментальными данными.

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

Личный вклад автора

Задача о влиянии наносекундного разряда на многостадийное воспламенение была полностью решена автором. Идея организации горения в компрессионном двигателе с инициацией неравновесной плазмой принадлежит автору. Постановка задач, моделирование горения в химическом реакторе сжатия, анализ результатов с формулировкой выводов и рекомендаций по оптимальной организации горения сделаны автором. При решении задачи о распространении фронта пламени в компрессионном двигателе с инициацией высокочастотным коронным разрядом автором был предложен и реализован метод оценки состава и нагрева активированной разрядом зоны, рассчитан состав и нагрев в этой зоне для разных условий на стадии сжатия. Эти данные использовались в качестве начальных условий для расчета распространения фронта пламени. Анализ и обработка полученных результатов 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.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Филимонова Елена Александровна ответила на задаваемые в ходе заседания вопросы от членов совета, а также на замечания, поступившие на автореферат и ведущей организации, и привела собственную аргументацию по ним.

Диссертационным советом сделан вывод о том, что диссертация представляет собой научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям пункта 9, установленным Положением о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г.

На заседании от 21.03.2018г. диссертационный совет принял решение за разработку теоретических положений, совокупность которых можно квалифицировать как научное достижение, либо решение научной проблемы, имеющей важное политическое, социально-экономическое, культурное или хозяйственное значение, либо новые научно обоснованные технические, технологические или иные решения, внедрение которых вносит значительный вклад в развитие страны, присудить Филимоновой Елене

Александровне ученую степень доктора физико-математических наук по специальности 01.04.08 (1.3.9) – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет в количестве 21 человека, из них очно: 11 докторов наук (по специальности 01.04.08 – физика плазмы - 7, и по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника – 4), дистанционно: 10 докторов наук (по специальности 01.04.08 – физика плазмы – 4, и докторов наук по специальности 01.04.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника – 6), участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за - 21, против - 0, недействительных бюллетеней - 0.

Зам. председателя диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)

д.ф.-м.н., профессор

 Андреев Н.Е.

Ученый секретарь диссертационного совета Д 002.110.02 (24.1.193.01)

д.ф.-м.н.



Васильев М.М.

 29.09.2021г.