

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

аттестационное дело № _____

решение диссертационного совета от 27.12.2023г. № 19

О присуждении Добровольской Анастасии Сергеевны, гражданке Российской Федерации, ученой степени кандидата физико-математических наук.

Диссертация «Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе» по специальности 1.3.9 – физика плазмы принята к защите 26.10.2023г., (протокол заседания № 14) диссертационным советом 24.1.193.01 (Д 002.110.02), созданным на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт 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 Добровольская Анастасия Сергеевна 1987 года рождения, в 2010 году окончила Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)».

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

В 2013 году окончила очную аспирантуру Федерального

государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук.

Диссертация выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН).

Научный руководитель доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник ОИВТ РАН Битюрин Валентин Анатольевич

Официальные оппоненты:

– доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник лаборатории физических основ энергетических технологий Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института теплофизики имени С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук Тупикин Андрей Викторович;

– кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории физики плазмы отделения теоретической физики, вычислительной математики и прикладных разработок Акционерного общества «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» Кочетов Игорь Валерианович дали положительные отзывы на диссертацию.

Ведущая организация Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» (г. Долгопрудный) в своем положительном заключении, составленном заместителем заведующего кафедрой прикладной физики, профессором, д.ф.-м.н. Александровым Николаем Леонидовичем указала, что научная значимость работы определяется в первую очередь новизной полученных результатов практически по всем направлениям работы. Например, установлены механизмы влияния разряда на все режимы горения в цилиндре камеры сгорания двигателя, возникающие после обработки части топливно-воздушной смеси разрядом. Интересны также результаты исследования

влияния параметров разряда на воспламенение, варьируемые в широком диапазоне значений, которые демонстрируют возможность управлять временными характеристиками процессов горения в двигателе, для реализации оптимальных тепловых и мощностных характеристик двигателя.

Рассматриваемые в диссертации разрядные системы воспламенения не только активно изучаются в экспериментальных работах, но и используются на практике, что демонстрирует актуальность представленной работы.

Соискатель имеет 15 опубликованных работ, в том числе по теме диссертации опубликовано 7 статей, изданных в рецензируемых периодических изданиях, входящих в базы данных Web of Science и Scopus и рекомендованных ВАК:

1. A.S. Dobrovolskaya, E.A. Filimonova, A.N. Bocharov, — «Numerical study of controlling a lean mixture autoignition in the hybrid HCCI engine using high frequency corona discharges». — в: Fuel 354 (2023), 129349
2. Е.А. Филимонова и А.С. Добровольская. — «Влияние момента инициации высокочастотного коронного разряда на развитие горения в компрессионном двигателе». — в: Теплофизика высоких температур 61.3 (2023), с. 1–10.
3. В.А. Битюрин, А.С. Добровольская, А.Н. Бочаров, А.А. Фирсов— «Образование атомарного кислорода в продольно-поперечном разряде» — в: Физика плазмы 49.5 (2023), с. 438–46.
4. Е.А. Филимонова, А.С. Добровольская — «Адаптация кинетической схемы к условиям горения этилена при температурах выше 1200 К» — в: Химическая физика 42.12 (2023), с. 1–9.
5. V.A. Bityurin, A.N. Bocharov, A.S. Dobrovolskaya, T.N. Kuznetsova, N.A. Popov, E.A. Filimonova — «Numerical Modeling of Pulse-Periodic Nanosecond Discharges». — в: J. Phys.: Conf. Series 2100 (2021), 012032.
6. A.S. Dobrovolskaya, E.A. Filimonova, V.A. Bityurin, A.N. Bocharov, — «Role of pressure waves in the heating of the end-gas in HCCI engine with activation by pulsed corona discharge» – в: J. Phys.: Conf. Series 2100 (2021), 012016

7. E.A. Filimonova, A.S. Dobrovolskaya, A.N. Bocharov, V.A. Bityurin, G.V. Naidis, — «Formation of combustion wave in lean propane-air mixture with a nonuniform chemical reactivity initiated by nanosecond streamer discharges in the HCCI engine». — в: Comb. Flame 215 (2020), с. 401–16.

На диссертацию и автореферат поступили отзывы:

1. **Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова»** (Кафедра молекулярных процессов и экстремальных состояний вещества физического факультета, д.ф.-м.н., профессор Знаменская И. А. и к.ф.-м.н., доцент Мурсенкова И.В.) – отзыв положительный, с замечанием:

– следовало бы проанализировать различия в применении плазмы наносекундных стримерных разрядов и пространственно-однородных разрядов на горение углеводородо-воздушных смесей с точки зрения кинетических и газодинамических процессов в камере сгорания.

2. **Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Институт теоретической и прикладной механики имени С.А. Христиановича» СО РАН** (ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н. Зудов В. Н.) – отзыв положительный, без замечаний.

3. **Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»** (Заместитель руководителя Отделения Плазменных Технологий Курчатовского комплекса ядерных транспортных энергетических технологий, к.ф.-м.н. Потапкин Б.В.) – отзыв положительный, без замечаний.

Выбор официальных оппонентов и ведущей организации обосновывается тем, что:

– д.ф.-м.н. Тупикин Андрей Викторович является крупным ученым в области исследования взаимодействия разрядов с химически реактивным потоком, в том числе с пламенами.

1. Зудов В.Н., Тупикин А.В., Инициирование гомогенного горения в высокоскоростной струе совместным воздействием оптического и электрического разрядов // Физика горения и взрыва. Т.58, №1. Р. 25-31, 2023 г.;
2. Arbuzov V.A., Arbuzov E.V., Dubnishchev Yu.N., Zolotukhina O.S., Lukashov V.V. and Tupikin A.V. Hilbert-optic diagnostics of hydrogen-oxygen inverse diffusion flame // Energies. V.15, Iss.24. P.9566, 2022;
3. Зудов В.Н., Тупикин А.В. Влияние внешнего электрического поля на оптический разряд в скоростном потоке // Журнал технической физики. Т.92, вып. 2. С. 209-215, 2022 г.;
4. Тупикин А.В., Замашиков В.В. Растяжение ламинарного пламени в слабом электрическом поле // Физика горения и взрыва. Т.56, No.2. С. 3-9, 2020 г.

– к.ф.-м.н., Кочетов Игорь Валерианович является признанным специалистом в области физики плазмы, чьи исследования касаются в том числе плазмохимии и влияния электрических разрядов на горение.

1. A.P. Torbin, A.V. Demyanov, I.V. Kochetov, P.A. Mikheyev and A.M. Mebel. Ozone production in a dielectric barrier discharge in air- and oxygen–methane mixtures. Experiment and modeling // Plasma Sources Science and Technology, V. 31, 035017, 2022;
2. N.A. Dyatko, I.V. Kochetov and V.N. Ochkin. Influence of the ionization process on characteristics of spatial relaxation of the average electron energy in inert gases in a uniform electric field // Physical Review E, V. 104, 065204, 2021;
3. Бернацкий А.В., Кочетов И.В., Очкин В.Н. Спектральные методы контроля примесей, их потоков и локализации в неравновесной низкотемпературной плазме пониженного давления // Физика Плазмы, Т. 41, No 9, С. 783-829, 2020 г.;
4. P.A. Mikheyev, A.V. Demyanov, I.V. Kochetov, A.A. Sludnova, A.P. Torbin, A.M. Mebel and V.N. Azyazov. Ozone and oxygen atoms production in a dielectric barrier discharge in pure oxygen and O₂/CH₄ mixtures. Modeling and experiment

// Plasma Sources Science and Technology. V. 29, 015012, 2020 г.

– Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» является профильной организацией, специализирующейся в том числе на проведении исследований в области физики плазмы, включая физику низкотемпературной плазмы, наносекундных разрядов, а также плазменно-стимулированного горения.

1. A.A. Ponomarev; N.L. Aleksandrov. Monte Carlo simulation of ion kinetics in nitrogen and oxygen plasmas under non-uniform electric field conditions// Phys. Plasmas 30, 053505, 2023;

2. M.A. Попов, I.V. Kochetov, A.Y. Starikovskiy, N.L. Aleksandrov. Repetitively pulsed nanosecond discharge plasma decay in propane–oxygen gas mixture in the presence of a heating electric field // Combustion and Flame, v. 233, 111611, 2021;

3. М.А. Попов, Е.М. Анохин, И.В. Кочетов, А.Ю. Стариковский, Н.Л. Александров. Влияние нагрева газа на распад плазмы с гидратированными ионами после высоковольтного наносекундного разряда // М.А. Попов, Е.М. Анохин, И.В. Кочетов, А.Ю. Стариковский, Н.Л. Александров;

4. Э.М. Базелян, Н.Л. Александров, Электрическое поле в положительном стримере в длинных воздушных промежутках // Физика плазмы, 2022, Т. 48, № 7, стр. 639-647.

Диссертационный совет отмечает, что на основании выполненного соискателем исследования:

– установлен механизм быстрого продвижения волны горения за счёт взаимодействия с волнами давления при активации воспламенения неравновесной плазмой стримерного разряда;

– предложен способ управления самовоспламенением обеднённой топливно-воздушной смеси в компрессионном двигателе на основе

найденной зависимости между самовоспламенением и моментом воспламенения активированной разрядом зоны;

– получены результаты газодинамического моделирования развития импульсно-периодического разряда в конфигурации «острие-острие» в воздухе, демонстрирующие, что в импульсно-периодическом разряде мегагерцовой частоты за наносекундные времена образуются активные частицы, в концентрации, достаточной для ускорения воспламенения в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания;

– получены результаты расчетов разрядного воздействия и нагрева на воспламенение углеводородо-воздушной смеси, иллюстрирующие преимущества создания химической неравновесности;

– разработана газодинамическая квазиодномерная (физическая и численная) модель, позволяющая эффективно учитывать сжатие без изменения геометрии расчёта, и полученные с её помощью результаты, показывающие важность учёта изменения внешнего давления при моделировании плазменно-стимулированного горения в камере сгорания двигателя внутреннего сгорания.

Теоретическая значимость исследования обоснована тем, что:

– установлены механизмы влияния неравновесной плазмы стримерного разряда на все стадии процесса горения в камере сгорания компрессионного двигателя, от воспламенения обработанной разрядом зоны до возникновения самовоспламенения перед фронтом волны горения;

– полученные данные о влиянии разряда на топливовоздушную смесь представляют важны с точки зрения исследования фундаментальных характеристик плазменно-стимулированного горения.

Значение полученных соискателем результатов **исследования для практики подтверждается** тем, что:

– показано, что инициация высокочастотным коронным разрядом является способом для достижения оптимальных тепловых и мощностных характеристик двигателя и состава продуктов сгорания;

– предложенный способ управления переходом к самовоспламенению в компрессионном двигателе важен для разработки двигателей внутреннего сгорания на обедненных смесях;

– полученные знания о возможности и ограничения управления процессами горения при помощи воспламенителей на основе коронных разрядов необходимы для конструирования современных систем воспламенения в энергетических установках, в том числе двигательных.

Результаты работы могут быть использованы в научных и научно-образовательных центрах, а также в организациях, в которых исследуются фундаментальные и прикладные аспекты плазменно-стимулированного горения и разрабатываются новые энергетические установки, в частности, в Федеральном исследовательском центре химической физики имени Н.Н. Семёнова РАН, Московском физико-техническом институте (национальном исследовательском университете), Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана, НИИ ядерной физики им. Щ.В. Скобельцина Московского государственного университета, Государственном научном центре Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований, Институте Теплофизики СО РАН, Государственном научном центре Российской Федерации ФГУП «НАМИ», Центральном институте авиационного моторостроения им. П.И. Баранова.

Оценка достоверности результатов исследования выявила, что достоверность полученных результатов подтверждается квалифицированным применением проверенных теоретических и расчётных методов; а также сравнительным анализом полученных данных с экспериментальными и расчетно-теоретическими результатами, полученными другими авторами.

Личный вклад соискателя в представленные в настоящей диссертации исследования является ведущим. Автор принимала активное участие в планировании исследований и анализе результатов. Все результаты расчётов, выносимые на защиту, получены лично автором.

Часть результатов, выносимых на защиту (в положении №5) в данной диссертации опубликованы в статье №7 из списка публикаций автора, в которой также были опубликованы результаты, вынесенные на защиту в докторской диссертации Филимоновой Елены Александровны (глава 8), поэтому необходимо более подробно остановиться на личном вкладе в эту работу Добровольской Анастасии Сергеевны и необходимости учёта этой статьи в диссертации.

Используемые в статье №7 схемы и модели изложены в разделе 2 «Numerical method» («Численный метод») и разделе 3 «Evaluation of temperature and concentrations of chemically active particles in the area activated by a high-frequency corona discharge» («Оценка температуры и концентраций химически активных частиц в области, активированной высокочастотным коронным разрядом»), и занимают всего 0.65 авторского листа (а.л.). Подраздел 2.1 – постановка задачи. Подраздел 2.2 (0.12 а.л.) написан Добровольской А.С., так как описываемая в нём модель была разработана и реализована в программном коде лаборатории 21.1 ей лично, и именно эти результаты (газодинамическая квазиодномерная модель) входят в положение №5 в представляемой к защите диссертации. Раздел 3 (0.46 а.л.) в публикации написан Филимоновой Е.А., в нём описывается модель разрядной зоны, при помощи которой задаются начальные условия в дальнейших расчётах по модели из раздела 2. Раздел 4 «Results and discussion» («Результаты и обсуждение», 0.53 а.л.) состоит из обсуждения и анализа результатов расчётов выполненных Добровольской А.С., но с использованием обеих моделей из раздела 2 и 3, анализ распространения волны горения проводился совместно, анализ кинетических механизмов влияния неравновесной плазмы на воспламенение активированной зоны выполнен Филимоновой Е.А. Текст раздела 4 написан Филимоновой Е.А. с некоторыми корректировками от Добровольской А.С., рисунки в этом разделе получены Добровольской А.С. Результаты, приведённые в разделе 4, упоминаются в диссертации, но на защиту не выносятся. Если обобщить, то

Филимонова~Е.А. и Добровольская~А.С. несколько лет совместно и плодотворно работали над исследованием влияния неравновесной плазмы на процессы в камере сгорания, при этом, Филимоновой~Е.А. выполнена разработка всех кинетических механизмов, как горения, так и плазмохимических реакций, а также модели активированной зоны, учитывающей многоимпульсность и многоканальность стримерного разряда в камере сгорания, также ей выполнены все расчёты с помощью нульмерной модели камеры сгорания (в её диссертации она называется «химический реактор сжатия»). Добровольская~А.С. выполнила разработку газодинамической квазиодномерной модели, постановку и реализацию параметрического исследования влияния стримерного разряда на процесс горения в двигателе, установила механизмы, влияющие на распространение волны горения и переход к самовоспламенению. Необходимость включать публикацию №7 в список публикаций Добровольской~А.С. в данной диссертации вызвана тем, что опубликованная в ней в разделе~2.2 газодинамическая квазиодномерная модель используется для получения результатов Главы~4 и соответствующих положений, выносимых на защиту.

Апробация результатов исследования проводилась на 12 российских и международных конференциях и симпозиумах. Основные публикации по выполненной работе подготовлены при определяющем участии автора.

В ходе защиты диссертации критических замечаний высказано не было.

Соискатель Добровольская Анастасия Сергеевна ответила на задаваемые ей в ходе заседания вопросы, согласилась с замечаниями и привела собственную аргументацию.

На заседании от 27.12.2023г. диссертационный совет принял решение за установление механизмов влияния неравновесной плазмы наносекундного стримерного разряда на процессы горения в камере сгорания компрессионного двигателя, а также исследование возможностей управления этими процессами при помощи вариации параметров разряда присудить

Добровольской Анастасии Сергеевне ученую степень кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

При проведении тайного голосования Диссертационный совет 24.1.193.01 (Д 002.110.02) в количестве 27 человек, из них очно: 10 докторов наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 7 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, дистанционно: 2 доктора наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы и 5 докторов наук по специальности 1.3.14 – теплофизика и теоретическая теплотехника, участвовавших в заседании, из 31 человека, входящих в состав совета, дополнительно введены на разовую защиту 0 человек, проголосовали: за 27, против 0, недействительных бюллетеней - 0.

Председатель диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

д.ф.-м.н., академик

Петров О.Ф.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02)

к.ф.-м.н.

Тимофеев А.В.

27.12.2023г.