

На правах рукописи

**Добровольская Анастасия Сергеевна**

**Использование неравновесной плазмы стримерного  
разряда для управления горением углеводородо-воздушной  
смеси в компрессионном двигателе**

Специальность 1.3.9 —  
«Физика плазмы»

**Автореферат**  
диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Москва — 2023

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

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор  
**Битюрин Валентин Анатольевич**

Официальные оппоненты: **Тупикин Андрей Викторович**,  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе Сибирского отделения Российской академии наук,  
старший научный сотрудник

**Кочетов Игорь Валерианович**,  
кандидат физико-математических наук, доцент,  
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации Троицкий институт инновационных и термоядерных исследований» (АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ»),  
ведущий научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)» Министерства науки и высшего образования Российской Федерации

Защита состоится «27» декабря 2023 г. в \_\_\_ ч. \_\_\_ мин на заседании диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) созданного на базе ОИВТ РАН по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, экспозал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ОИВТ РАН: [jih.ru/science/dissert-council/](http://jih.ru/science/dissert-council/).

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, ученому секретарю диссертационного совета 24.1.193.01 (Д 002.110.02) .

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2023 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
24.1.193.01 (Д 002.110.02) ,  
к. ф.-м.н

Тимофеев Алексей Владимирович

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Диссертация посвящена исследованию механизмов воздействия неравновесной плазмы импульсно-периодического наносекундного разряда на горение в компрессионном двигателе с однородной смесью, а также разработке способов управления данным процессом и оценке его эффективности.

Около 85% производимой в мире энергии [1] (как на электростанциях, так и во всевозможных двигателях) генерируется при сжигании различных ископаемых топлив: нефти, газа и угля. Около 70% добываемой нефти сжигается в двигателях внутреннего сгорания (ДВС) [2], и сейчас главными критериями для разработки новых двигателей и энергетических установок являются постоянно растущие требования и нормы по экологической чистоте двигателей и прежде всего по значительному снижению токсичности отработавших газов при высокой энергоэффективности и мощности.

В последние десятилетия активно разрабатываются двигатели, работающие в рамках стратегии низкотемпературного горения. Стратегия низкотемпературного горения подразумевает использование бедных смесей (то есть, таких, где топлива меньше, чем окислителя), что уменьшает температуру горения и увеличивает КПД за счёт более высокого показателя адиабаты, также при этом уменьшается концентрация вредных веществ в выхлопе. Среди разрабатываемых новых типов ДВС можно выделить компрессионный двигатель с воспламенением однородной смеси [3] (в зарубежной литературе — homogeneous charge compression ignition engine, HCCI), в котором задолго до верхней мёртвой точки впрыскивается топливо и подаётся воздух, и к моменту самовоспламенения от сжатия смесь является практически однородной. Идея такого двигателя и первые прототипы были созданы в 1960-х годах [4], но недостаточные знания о детальных механизмах горения привели к тому, что эффективных методов управления воспламенением разработать не удалось. Сейчас, с разработкой детальных механизмов горения углеводородов, в том числе и для ранних промежуточных стадий тепловыделения (т.н. холодные и голубые пламена), а также с развитием вычислительной техники, позволяющий использовать детальные кинетические схемы при решении практических задач, открылись новые возможности для работы с бедными смесями, и к исследованию таких типов двигателей вернулись вновь. Преимущества компрессионных двигателей делают их перспективным объектом исследования в современном двигателестроении: меньшее потребление топлива за счёт использования бедных смесей, меньшее количество  $\text{NO}_x$  и сажи в выхлопе, меньше потери тепла на стенки, выделение тепла на низкотемпературных стадиях горения. Тем не менее, у них есть и недостатки, затрудняющие их внедрение: сложность приготовления однородной смеси, резкий рост давления при самовоспламенении, затруднённый холодный старт, и самое

основное — невозможность эффективно управлять воспламенением и режимами горения. На устранение последнего недостатка направлена разработка компрессионных двигателей с переменной реактивностью, и гибридных двигателей, при высоких нагрузках работающих с искровым зажиганием [5].

В последние годы в рамках стратегии низкотемпературного горения в качестве воспламенителя для бедных смесей в двигателях вместо искры предлагается использовать неравновесную плазму объемного наносекундного импульсно-периодического разряда, например [6, 7, 8]. Использование наносекундных импульсных разрядов в качестве воспламенителя позволяет вкладывать часть энергии не только через нагрев топливо-воздушной смеси, а также при помощи создания химической неравновесности — появления активных радикалов, которые участвуют в начальных стадиях конверсии углеводородов, что оказывается более эффективным. В недавней работе [9] проведено экспериментальное сравнение с искровым зажиганием, и показано, что неравновесная плазма приводит к более быстрому развитию пламени и большей полноте сгорания. Такие системы зажигания активно разрабатываются и исследуются, вместе с тем, не все физические аспекты механизма влияния неравновесной плазмы на горение в двигателях прояснены в достаточной степени, также неясны возможности использования её для управления горением. В работе [10] установлен кинетический механизм влияния разряда на детальную кинетику горения углеводородов и предложена идея, которая дальше развивается в данной диссертации: импульсно-периодический разряд предлагается использовать как активатор горения за некоторое время до верхней мёртвой точки, а не непосредственно перед ней. При этом в [10] используется нульмерная модель химического реактора сжатия, имитирующая камеру сгорания двигателя, что соответствует однородным условиям по всему объёму камеры. В реальном же двигателе разряд обрабатывает только часть объёма, и процесс горения может включать в себя не только воспламенение, но и пространственные явления и процессы переноса, в частности, распространение волны горения, волны давления и самовоспламенения. В этой связи, для установления деталей механизма влияния неравновесной плазмы на процессы в камере сгорания, а не только на кинетику горения, и поиска способов управления этими процессами, необходимо рассмотрение, учитывающее происходящее в различных частях объёма, чему и посвящена данная диссертация.

**Целью** данной работы является исследование механизмов влияния неравновесной плазмы наносекундного импульсно-периодического стримерного разряда на процесс горения пропано-воздушной смеси, не воспламеняющейся без разряда, в компрессионном двигателе, а также поиск способов управления режимами горения при помощи изменения параметров разряда.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие **задачи**:

1. С помощью моделирования развития импульсно-периодического разряда мегагерцовой частоты в конфигурации «острие-острие» в воздухе, получить временные зависимости образования активных частиц, в концентрации, достаточной для ускорения воспламенения в камере сгорания ДВС.
2. На основе детальной химической кинетики провести расчеты для определения оптимального способа воздействия разряда на развитие горения с точки зрения энергетических характеристик самого разряда. Предварительно провести тестирование используемой кинетической схемы горения.
3. Разработать численную модель камеры сгорания, позволяющую рассматривать процесс горения в одномерной постановке с учетом изменения давления за счет сжатия поршнем и активации разрядом части объема. Реализовать эту модель в программном комплексе PlasmAero и выполнить тестовые расчеты.
4. Исследовать развитие горения топливо-воздушной смеси в камере сгорания, варьируя параметры разряда, с целью определить механизм влияния разряда на различные стадии горения: воспламенение активированной разрядом зоны, продвижение фронта волны горения, самовоспламенение газа перед фронтом.

#### Научная новизна:

1. Предложена оригинальная модификация системы уравнений Навье-Стокса для учета изменения давления за счет сжатия поршнем и начальной активации части смеси неравновесной плазмой разряда в квазиодномерном приближении. Показана важность учёта изменения объема камеры сгорания при моделировании горения.
2. Установлены два основных способа воздействия на газ перед фронтом для возникновения самовоспламенения в необработанной части смеси: сжатие поршнем и распространение волны горения. Впервые показано, что волны давления, возникшие при воспламенении активированной разрядом зоны, взаимодействуют с фронтом волны горения, ускоряя их распространение, тем самым влияя на самовоспламенение газа перед фронтом. Степень влияния волн давления снижается с уменьшением коэффициента избытка топлива.
3. Установлена зависимость между воспламенением активированной разрядом зоны и самовоспламенением газа перед фронтом волны горения. На её основе предложен новый способ управления горением обедненной топливо-воздушной смеси в камере сгорания компрессионного двигателя при помощи высокочастотного коронного разряда.
4. Впервые показано, что изменением в широком диапазоне параметров разряда, таких как удельный энерговыдел в стример, доля объема, занятая стримерами и момент включения разряда относительно

верхней мёртвой точки (ВМТ), можно обеспечить самовоспламенение в узком диапазоне углов поворота коленвала вблизи ВМТ. Продемонстрировано, что влияние разряда снижается с уменьшением коэффициента избытка топлива.

5. Показано, что для достижения желаемого момента воспламенения топливо-воздушной смеси, требуется оптимальное сочетание интегрального энерговыклада (например, сжатия поршнем) и управляющего электроразрядного импульса.

**Практическая значимость** Результаты исследования могут быть использованы в качестве практических рекомендаций по организации горения при разработке современных двигателей внутреннего сгорания на обеднённых топливных смесях с разрядом стримерного типа в качестве инициатора горения. Результаты расчётов воздействия разряда на топливо-воздушную смесь могут использоваться в фундаментальных и практических исследованиях стимулированного плазмой горения в различных установках. Механизм управления переходом к самовоспламенению газа перед волной горения может применяться при разработке компрессионного двигателя с переменной реактивностью. Такие разработки находятся в русле приоритетных направлений стратегии научно-технического развития России (указ Президента от 01.12.2016 № 624, пункт 20б) "переход к экологически чистой и ресурсосберегающей энергетике и пр.").

**Методология и методы исследования.** В работе использованы апробированные численные и аналитические методы исследования. Используемый программный код PlasmAero [11] более 20 лет используется для расчёта разрядов в газе и газодинамики химически активных потоков. Схемы химической кинетики протестированы и позволяют получать результаты, совпадающие с референсными экспериментальными и теоретическими значениями.

### **Основные положения, выносимые на защиту:**

1. **Механизм** быстрого продвижения волны горения за счёт взаимодействия с волнами давления при активации воспламенения неравновесной плазмой стримерного разряда.
2. **Способ** управления самовоспламенением обеднённой топливо-воздушной смеси в компрессионном двигателе на основе найденной зависимости между самовоспламенением и моментом воспламенения активированной разрядом зоны.
3. **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 ДВС.

4. **Результаты** расчетов разрядного воздействия и нагрева на воспламенение углеводородо-воздушной смеси, иллюстрирующие преимущества создания химической неравновесности.
5. 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 ДВС.

**Достоверность** полученных результатов обеспечивается использованием проверенных методов моделирования — численного решения системы уравнений Навье-Стокса для химически реактивного газа с детальной схемой химической кинетики. Результаты работы опубликованы в различных рецензируемых российских и зарубежных журналах, в том числе высокорейтинговых, и находятся в соответствии с расчётными и экспериментальными результатами, полученными другими авторами.

**Апробация работы.** Основные результаты работы докладывались на следующих конференциях: 15th International Conference of Numerical Analysis and Applied Mathematics, Thessaloniki, Greece, 2017; Международная Звенигородская конференция по физике плазмы и УТС, 2018 и 2019 гг; XXXIII International Conference on Equations of State for Matter, Elbrus, Russia, 2018; 8th International Symposium on Nonequilibrium Processes, Plasma, Combustion and Atmospheric Phenomena, October 1-5, 2018, Sochi, Russia; 11th International Symposium on Non-Thermal/Thermal Plasma Pollution Control Technology & Sustainable Energy, 2018; International Workshop on Magneto-Plasma Aerodynamics, Москва, Россия, 2018, 2019, 2020, 2021 и 2023 гг; XXXIV International Conference on Interaction of Intense Energy Flux with Matter, March 1–6, 2019, Elbrus, Russia; XXXIV ICPIG & ICRP-10 ( XXXIV International Conference on Phenomena in Ionized Gases and the 10th International Conference on Reactive Plasmas), Sapporo, Japan, July 14–19, 2019; 24th International Symposium on Plasma Chemistry, Naples, Italy, June 9-14, 2019; XV Всероссийский симпозиум по горению и взрыву, Москва, Россия, 29 ноября – 4 декабря 2020; 74th Annual Gaseous Electronics Conference, USA, October 4-8, 2021; XVI Симпозиум по горению, 2022, 5—9 сентября, Суздаль, 2022 г;

**Личный вклад.** Личный вклад автора 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 прояснить личный вклад в эту работу Добровольской Анастасии Сергеевны и необходимость 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.



**Публикации.** Основные результаты по теме диссертации изложены в 7 статьях, 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. V.A. Bityurin, A.S. Dobrovolskaya, A.N. Bocharov, A.A. Firsov — «Atomic Oxygen Generation by Longitudinal–Transverse Discharge». — в: *Plasma Phys. Rep.* 49.5 (2023), с. 587–94.

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. Е.А. Филимонова, А.С. Добровольская, А.Н. Бохаров, V.A. Bityurin, G.V. Naidis, — «Formation of combustion wave in lean propane-air mixture with a non-uniform chemical reactivity initiated by nanosecond streamer discharges in the HCCI engine». — в: *Comb. Flame* 215 (2020), с. 401–16.

## Содержание работы

Во **Введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, формулируется цель, ставятся задачи работы, излагается научная новизна и практическая значимость представляемой работы.

**Первая глава** посвящена обзору литературы. Приведены основные понятия из химической кинетики и физики горения углеводородов, описана стратегия низкотемпературного горения в ДВС, перечислены проблемы, затрудняющие управление самовоспламенением в компрессионном двигателе и обоснован выбор неравновесной плазмы для управления воспламенением и горением в таком типе ДВС.

В разделе 1.1 приведены основные понятия из химической кинетики горения углеводородов, важные для решаемых в диссертации задач. Так как влияние неравновесной плазмы на воспламенение углеводородов с воздухом осуществляется как через нагрев, так и через изменение путей химических реакций за счет присутствия активных частиц, наработанных разрядом., то

для понимания механизмов такого влияния необходимо представлять важные особенности воспламенения углеводородов без присутствия разрядов. Приведены основные понятия из теории цепных реакций, описано многостадийное воспламенение, характерное для некоторых углеводородов, когда часть энергии, запасенной в химических связях молекул углеводородов, выделяется до наступления самовоспламенения с образованием промежуточных продуктов горения: при разложении органического гидропероксида на стадии холодного пламени и перекиси водорода на стадии голубого пламени [12]. Корректное описание многостадийного воспламенения важно для учёта тепловыделения на предпламенной стадии, в том числе и в двигателях, так как дополнительное тепловыделение облегчает холодный старт. Описано явление отрицательного низкотемпературного коэффициента, то есть, увеличение времени задержки воспламенения с повышением начальной температуры смеси в некоторой области температур. Было показано [13], что образующиеся в неравновесной плазме радикалы могут заметно уменьшать эту стадию.

В разделе 1.2 описано современное состояние исследований в области разработки двигателей внутреннего сгорания. Разработка современных ДВС направлена на улучшение экологических характеристик (понижение концентрации вредных веществ в выхлопе, увеличение полноты сгорания) и оптимизацию эффективности работы. Это приводит к разработке стратегий низкотемпературного горения, подразумевающих использование бедных смесей, при этом уменьшается температура горения и увеличивается извлечение полезной работы за счёт более высокого показателя адиабаты [2]. Стратегии низкотемпературного горения включают в себя компрессионное воспламенение однородной смеси, сочетающее в себе особенности как бензиновых, так и дизельных двигателей. В бензиновых двигателях используется предварительно перемешанная смесь воздуха и топлива с высоким октановым числом, которая сначала сжимается, а затем воспламеняется при помощи искрового разряда. В дизельном двигателе в камере сгорания сжимается только воздух до 30–50 атмосфер, а топливо распыляется перед верхней мертвой точкой, после чего гетерогенная смесь топлива с воздухом воспламеняется, горение происходит в небольшой области диффузного пламени. По своему принципу работы компрессионный двигатель, как и дизель, относится к двигателям с воспламенением от сжатия, но при этом, в нём используется однородно перемешанная топливо-воздушная смесь, как в бензиновом и к моменту воспламенения достигается значительная однородность смеси. При этом, так как в отличие от дизеля, топливо начинает реагировать с воздухом при более низких температурах, в компрессионном двигателе высвобождается тепло в том числе на стадиях холодного и голубого пламени, а это, во-первых, позволяет высокотемпературному воспламенению наступать быстрее, а во-вторых, использовать смесь с более низкой начальной температурой. Воспламенение происходит практически одновременно по

всему объему, без выраженного продвижения фронта пламени и при этом процесс горения в компрессионном двигателе слабо управляемый, так как регулируется процессами химической кинетики, которые зависят от эволюции давления, температуры и состава смеси. С этой особенностью связан один из основных недостатков компрессионного двигателя — слабая управляемость воспламенением и работа в ограниченном диапазоне нагрузок [5].

В разделе 1.3 приведён обзор использования неравновесной плазмы для ускорения воспламенения. По важным для стимулированного горения свойствам плазму можно разделить на два типа — равновесную и неравновесную [14]. В равновесной плазме электронная, вращательная и колебательная температура плазмы находятся в равновесии с температурой нейтрального газа и электронная плотность очень высока, к такой плазме относятся, например, дуговой и искровой разряды. Неравновесная плазма — та, в которой электронная, колебательная, вращательная температуры могут сильно отличаться, а температура нейтрального газа и электронная плотность сравнительно низкие. Электронная температура и плотность зависят от приведенного электрического поля ( $E/N$ , отношение напряженности электрического поля к концентрации нейтрального газа). Разряды, генерирующие равновесную плазму обычно используются для нагрева, а в неравновесной выше электронная температура и она более реакционно способная активная, пределы влияния неравновесной плазмы на горение определяются свойствами плазмы, а именно электронными температурой и плотностью. Нагрев газа в неравновесной плазме также происходит, но на это идёт меньшая доля энергии, чем в равновесной [15]. Существует два варианта использования неравновесной плазмы в ДВС: разряд может заменять обычную свечу зажигания (например, в [8]), или неравновесный разряд, инициируемый задолго до ВМТ, не зажигает смесь, а только способствует возникновению самовоспламенения в результате сжатия, изменяя историю развития физико-химических процессов в цилиндре двигателя [10]. Замена обычной свечи зажигания на объемный неравновесный разряд позволяет использовать бедные смеси в соответствии с современной тенденцией к сохранению окружающей среды и экономии топлива, поскольку в бедных смесях необходимо создавать большое ядро воспламенения для стабильного горения. По своему принципу организации горения компрессионный двигатель с неравновесной плазмой в качестве воспламенителя будет представлять из себя вариант двигателя с переменной реактивностью [5].

В разделе 1.4 описаны проблемы управления воспламенением в компрессионном двигателе. Неконтролируемое самовоспламенение может привести к быстрому выделению тепла и резкому повышению давления, что может привести к механическому повреждению двигателя. В ДВС с искровым зажиганием управление осуществляется через момент зажигания искры, а в дизельном двигателе — через момент подачи топлива, однако прямого способа управления началом сгорания в компрессионном двигателе не

существует, а это — ключ к достижению оптимальных характеристик работы. Чтобы ограничить резкое увеличение скорости тепловыделения, предложен режим, сочетающий в себе воспламенение части топливоздушнoй смеси волной горения и воспламенение оставшегося несгоревшего газа с помощью волн самовоспламенения, вызванных распространением пламени. Например, в гибридном компрессионном двигателе используют свечу зажигания для инициации волн горения [16]. В рамках стратегии низкотемпературного горения, которая предполагает использование обедненных смесей, вместо свечи зажигания предлагается использовать электрический разряд, создающий неравновесную плазму. Импульсно-периодический наносекундный разряд подходит для воспламенения слабореактивных обеднённых смесей, что было продемонстрировано во многих работах, в том числе в условиях, соответствующих камере сгорания двигателя [8, 6, 17, 9].

В разделе 1.5 описаны методы моделирования процессов в камере сгорания. Показано, что для решения задачи о воспламенении и формировании волны горения в газодинамическом приближении необходимо выработать подходы к созданию активированной разрядом области, так как совместное газодинамическое моделирование воздействия импульсного разряда и более медленного развития горения требует большого времени счета из-за разницы характерных времен.

**Во второй главе** формулируется математическая модель, позволяющая упрощенно рассматривать процессы в камере сгорания в цилиндре компрессионного двигателя с однородной смесью и наносекундным импульсно-периодическим разрядом в качестве воспламенителя. Также описана используемая кинетическая схема горения углеводородов с воздухом и приведены результаты расчёта скорости ламинарного пламени пропановоздушной и этилен-воздушной смеси с разным содержанием топлива.

В разделе 2.1 формулируется решаемая задача и описываются особенности модели, важные для корректного физического описания процессов в камере сгорания компрессионного двигателя с воспламенением неравновесной плазмой импульсно-периодического коронного разряда. Из-за разницы в несколько порядков у характерных времён разрядной кинетики и газодинамики горения, согласованное моделирование всех процессов — слишком затратная вычислительная задача, поэтому используются физически обоснованные упрощения. В качестве основы для построения численной модели компрессионного двигателя выбран химический реактор сжатия, использованный в установке СинТоп-1 ОИВТ РАН [18], для которого хорошо известны зависимости давления и температуры от угла поворота коленвала (УПК) и другие параметры, а также были выполнены работы по получению синтез газа и исследования конверсии углеводородов.

В разделе 2.2.1 описана однозонная модель компрессионного двигателя, с помощью которой был проведен расчёт цикла работы двигателя в режиме

пропуска воспламенения, а также рассмотрено влияние разряда на воспламенение в нульмерной постановке [10]. Она включает в себя законы сохранения массы смеси, массы отдельных компонент и энтальпии смеси в камере сгорания, а также кинематическую модель поршня, модель потерь тепла через стенку и источниковый член, моделирующий влияние разряда. Оценена роль тепловых потерь в данном двигателе.

В разделе 2.2.2 представлена одномерная газодинамическая модель, описывающая воспламенение активированной разрядом зоны в двигателе и распространение волны горения вдоль радиуса, с использованием которой выполнена большая часть расчётов распространения волны горения в диссертации. Для описания сжатия вдоль оси цилиндра камеры сгорания введены дополнительные члены в уравнение непрерывности и в уравнение баланса энергии:

$$S_{compr} = -\frac{\rho}{V} \frac{dV}{dt}, \dot{Q}_{compr} = \frac{\partial(\rho e)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial t} \left( \frac{H - PV}{V} \right) = hS_{compr}.$$

В разделе 2.2.3 описана используемая детальная кинетическая схема, состоящая из 700 реакций для 103 компонент, подробно описывающая горение первых четырёх предельных углеводородов с воздухом, и включающая как низкотемпературные стадии холодного и голубого пламени, так и высокотемпературное самовоспламенение [13]. Приведены результаты валидации данной схемы при помощи расчёта скорости ламинарного пламени в смесях пропана с воздухом и этилена с воздухом в зависимости от коэффициента избытка топлива.

В разделе 2.3 приведено тестирование внесённых в программный код [11] изменений, связанных с членами, отвечающими за сжатие. Получено хорошее совпадение с аналитическим решением для адиабатического сжатия, и с нульмерным расчётом режима пропуска воспламенения полученного при помощи однозонной модели.

**В третьей главе** рассмотрены различные подходы к моделированию разрядной стадии с целью выявления способов влияния на топливную смесь. По современным представлениям о плазменно-стимулированном горении, влияние разряда осуществляется в том числе через нагрев и появление активных частиц — атомов и радикалов. При этом, за счёт активных частиц возможно более эффективное использование энергии разряда, благодаря их участию в промежуточных реакциях горения, приводящее к увеличению полноты сгорания и уменьшению времени индукции [19]. Тем не менее, открытым остаётся вопрос, насколько более эффективен вклад энергии через канал образования химически активных частиц, а не через тепловой.

В разделе 3.1 приводятся результаты исследования влияния импульсно-периодического разряда на воспламенение и состав продуктов в камере сгорания компрессионного двигателя в однозонной постановке [20]. При этом была использована модель камеры сгорания двигателя, описанная в

разделе 2.2.1. Влияние разряда на смесь в камере сгорания учтено в осреднённой по пространству и времени постановке, при помощи введения внешнего источника активных частиц и нагрева. Изменение состава и нагрев в разряде рассчитаны с использованием метода G-факторов [21] — способа учёта влияния разряда на состав смеси в осреднённой по пространству и времени постановке, в котором энерговыход пересчитывается в нагрев и концентрации активных частиц. Более оптимальным является обработка смеси прямо перед началом стадии холодного пламени, так как в этом случае выделяется больше тепла на этой стадии. Рассмотрено изменение концентраций CO и несгоревших углеводородов для разных режимов обработки разрядом, показано, что для смеси с  $\phi = 0.5$  концентрация CO в продуктах горения значительно падает по сравнению с режимом пропуска воспламенения даже при небольших энерговыкладах (от 16400 до 10 ppm), а для смеси с  $\phi = 0.33$  при небольших и средних энерговыкладах конверсия происходит, но она не переходит в горение, и в выхлопе остаётся много промежуточных продуктов горения. Показано, что для уменьшения наработки NO<sub>x</sub> в разряде, следует проводить инициацию задолго до ВМТ, стадий холодного и голубого пламени, при этом, количество NO, образующееся во время работы разряда растёт с увеличением энерговыклада. Полученные результаты учитываются в дальнейшем рассмотрении влияния разряда на процессы в камере сгорания в диссертации.

В разделе 3.2 представлены результаты первых расчётов в газодинамической постановке, сделанных с рядом физических упрощений. При этом учитывалось, что диапазон, в котором должно произойти последующее самовоспламенение с точки зрения оптимальных тепловых характеристик двигателя составляет 20 градусов УПК в окрестности ВМТ, или 2.2 мс, поэтому, если влияние на время самовоспламенения много меньше этой величины — им можно пренебрегать, а если сравнимо — то его стоит учитывать. Показано, что без учёта сжатия для воспламенения активированной смеси в камере сгорания не происходит воспламенения при энерговыкладах, выбранных в качестве рабочих по результатам исследований в предыдущем разделе. Показано, что учёт предыстории химических реакций до момента включения разряда важен для более точного моделирования процессов горения, и что роль атомов кислорода — ключевая по сравнению с остальными радикалами. Это позволяет использовать для достижения целей диссертации в том числе и результаты, полученные для разрядов в воздухе, которые обсуждаются в следующих разделах.

В разделе 3.3 представлены результаты газодинамического моделирования импульсно-периодического разряда в конфигурации «острие-острие» в воздухе с целью оценить временные и энергетические характеристики образования атомов кислорода, как наиболее важного для стимулированного горения радикала. Показано, что рост концентрации атомарного кислорода прекращается в первые три нс, и дальнейший энерговыход идёт в нагрев,

а концентрация меняется слабо. Выполненный расчет 5 импульсов (около 800 нс) показывает важность учёта формирования значительной неоднородности концентраций и температуры вдоль оси разрядного промежутка даже вдали от вершин конических электродов. Неоднородности весьма консервативны (Рисунок 1) и по этой причине оказывают влияние на прохождение последующих импульсов. Этот результат даёт основания учитывать многоимпульсность в расчётах обработки топливно-воздушной смеси разрядом.

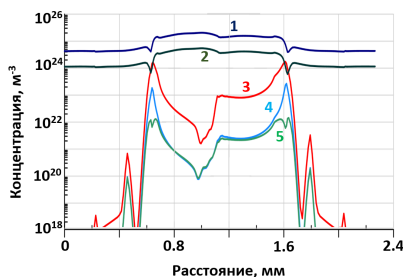


Рис. 1 — Продольное распределение нейтральных компонент в момент времени 200 нс, непосредственно перед вторым импульсом. 1 —  $N_2$ , 2 —  $O_2$ , 3 —  $O$ , 4 —  $N$ , 5 —  $NO$

В разделе 3.4 представлены результаты моделирования перезамыкания продольно-поперечного разряда в воздухе, в котором получены данные об образовании кислорода в разряде. Напрямую эта задача не относится к моделированию воспламенения в камере сгорания ДВС, а относится к исследованию плазменно-стимулированного горения топлива в скоростном воздушном потоке. При перезамыкании разряда такого типа в момент образования перемычки приведенное поле в ней достаточно сильное для эффективного образования атомарного кислорода электронным ударом (Рисунок 2, перемычка образуется в области максимума поля в момент 800 мкс). Продемонстрировано, что до момента разогрева перемычки в ней уже есть заметное число электронов, и в поле происходит диссоциация кислорода электронным ударом, концентрация атомарного кислорода за это время успевает достичь  $1-3 \cdot 10^{-3}$  мольных долей, или 1000—3000 ppm, что совпадает с оценками концентраций в камере сгорания из первого раздела настоящей главы. Тем не менее, в последующем расчёте кинетики горения показано, что в потоке без дополнительных источников теплоподвода, каким, например, является сжатие в двигателе, смесь с добавкой в 1000 ppm атомов  $O$  не воспламеняется за времена порядка десятков мс.

Раздел 3.5 посвящен анализу детально разрешенного во времени процесса эволюции химического состава топливно-воздушной смеси от момента подвода энергии различными способами до воспламенения. Рассматривается

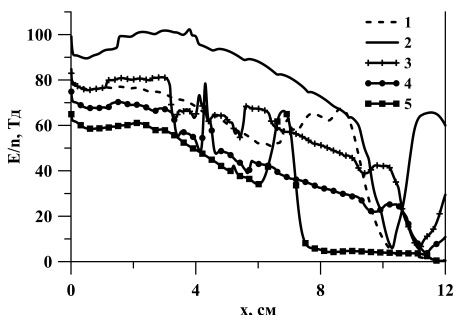


Рис. 2 — Распределение приведенного поля вдоль по потоку между разрядными слоями. Моменты времени обозначены цифрами: 1 – 700 мкс, 2 – 800 мкс, 3 – 830 мкс, 4 – 840 мкс, 5 – 912 мкс

метано-воздушная смесь, расчёт ведётся в «нульмерной» постановке, в адиабатической ячейке, чтобы исключить влияние пространственных процессов. В качестве способов активации рассматриваются три типа воздействия: во-первых, обработка однородным треугольным импульсом тока, во-вторых, создание частичной сверхравновесной диссоциации кислорода и/или азота, и в третьих, предварительный нагрев. Основным результатом настоящего раздела представлен на Рисунке 3, где приведено сравнение времен индукции в зависимости от величины и механизма энерговклада в адиабатической ячейке постоянного объема. Несмотря на упрощённую постановку, полученные результаты, во-первых, качественно близки к полученным в экспериментах представлениях о воздействии импульсных наносекундных разрядов на газ, а во-вторых, дают дополнительное физическое обоснование использованию осредненных методов, при которых непосредственного моделирования разряда не происходит, и меньшая часть интегрального энерговклада пересчитывается в образование активных частиц, а большая — в нагрев, что позволяет значительно упростить моделирование горения после обработки разрядом части камеры сгорания в двигателе, но при этом сохранить его физически достоверным.

В разделе 3.7 описан способ построения активированной разрядом зоны в газодинамическом расчёте. При этом учитывалась многоимпульсность разряда и то, что активированная зона неравномерно занята стримерами. Энерговклад в стримеры пересчитывался в концентрации активных радикалов и нагрев. Для оценки концентрации химически активных частиц, образующихся при распространении стримера, моделировалась динамика положительных стримеров в смеси  $N_2:O_2:C_3H_8 = 0.7671:0.2043:0.0286$  с использованием двумерной аксиально-симметричной жидкостной модели [22, 23]. В следующей главе построенная таким образом зона использовалась в качестве начальных условий в газодинамическом моделировании в камере сгорания.



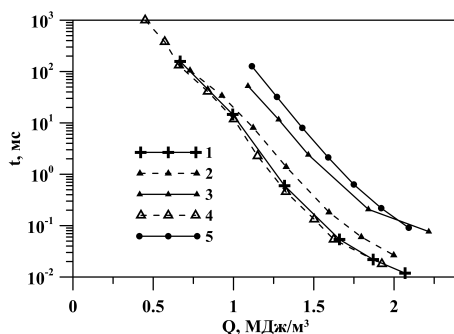


Рис. 3 — Изменение времени индукции в зависимости от энерговклада при различных способах воздействия. 1 – 10-нс импульс, 2 – 50-нс импульс, 3 – 50-мкс импульс, 4 – диссоциация, 5 – нагрев

**В четвертой главе** представлены результаты исследования влияния различных параметров разряда на режимы горения в камере сгорания компрессионного двигателя после обработки части смеси импульсно-периодическим стримерным наносекундным разрядом. Чтобы установить, можно ли при помощи такого разряда управлять воспламенением и горением обедненной смеси в компрессионном двигателе, было проведено параметрическое исследование возникновения и распространения волны горения после обработки части смеси разрядом.

В разделе 4.1 приведены варьируемые в исследовании внешние параметры. В главе обсуждаются результаты серии расчётов возникновения и распространения волны горения в двигателе после воздействия разряда, в которой менялись внешние параметры — состав пропан-воздушной смеси (коэффициент избытка топлива  $\phi$  брался 0.5 и 0.7) и разрядные характеристики, а именно: удельный энерговклад в стример  $Q_d$  (0.01–0.1 эВ/молекула), моменты включения разряда  $\alpha_{dis}$  (310, 325, 338 и 355 градусов УПК), доля объема активированной зоны, обработанная стримерами за всё время включения разряда  $\delta$ . Анализ полученных результатов проводился с целью установить влияние перечисленных параметров на время задержки воспламенения и характер распространения волны горения. Оптимальные характеристики двигателя задают условия для оптимизации: начальное воспламенение должно произойти в интервале от 15 градусов УПК перед верхней мертвой точкой (ВМТ) до 5 градусов за ней, самовоспламенение — до 10 градусов за ВМТ, максимально допустимое поднятие давления для реальных двигателей с близкой степенью сжатия при высоких нагрузках — 130 атмосфер [3].

В разделе 4.2 разобрано влияние разряда на начало воспламенения в двигателе. Приведена типичная картина горения в оптимальном интервале углов поворота коленвала; у процесса горения в двигателе можно выделить две определяющие временные характеристики — начало горения, т.е. время

воспламенения области, активируемой разрядом  $t_1$ , и время самовоспламенения газа перед волной горения  $t_2$ , см. Рисунок 4. Уменьшение времени задержки воспламенения активированной зоны связано с ускорением наступления реакций холодного и голубого пламени за счёт наличия активных радикалов и дополнительным тепловыделением на этих стадиях. При этом, на это время можно влиять, изменяя три параметра: момент включения разряда относительно верхней мёртвой точки, геометрию разрядной области и удельный энергоклад в стримерный канал. Увеличение удельного энергоклада в стримерный канал и доли объёма, занятой стримерами, а также сдвиг момента включения разряда дальше от верхней мертвой точки приводят к более раннему воспламенению, при этом, показано, что за счёт различного сочетания этих факторов возможно гибкое управление воспламенением активированной зоны.

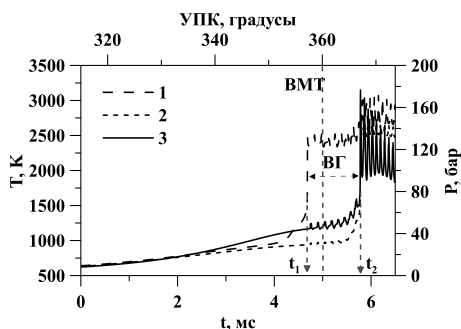


Рис. 4 — Характерные зависимости от времени температуры и давления при воспламенении. 1 - эволюция температуры в активированной зоне ( $r = 0.5$  см), 2 и 3 — температура и давление в газе перед фронтом волны горения ( $r = 4.5$  см)  $t_1$  обозначает момент воспламенения активированной зоны, «ВГ» — распространение волны горения,  $t_2$  — самовоспламенение газа перед ней. Расчёты выполнены для  $\delta = 0.55$  и  $R_{az} = 0.5$  см,  $\phi = 0.7$ ,  $\alpha_{dis} = 310^\circ$  УПК,  $P = 6.8$  бар,  $T = 601$  К,  $Q_d = 0.016$  эВ/молекулу.

В разделе 4.3 рассмотрен процесс распространения дефлаграционной волны горения, образовавшейся после воспламенения активированной зоны. При воспламенении активированной зоны возникает волна давления, которая переотражается от стенок камеры сгорания и взаимодействует с волной горения, колебания фронта которой хорошо заметны на графиках на Рисунке 4. При этом средняя скорость продвижения волны горения в момент прохождения волны давления через фронт составляет около 60 м/с, а когда волна давления идёт по необработанной области, волна горения движется со скоростью 1–2 м/с. Таким образом, одновременное наличие волны давления от воспламенения активированной зоны и волны горения в цилиндре камеры

сгорания и их взаимодействие позволяет достичь самовоспламенения вскоре за верхней мёртвой точкой и не только растянуть выделение тепла во времени, но и уложиться в необходимый диапазон углов (при рассматриваемых в данной работе ограничениях максимальное время между началом горения и самовоспламенением газа перед волной горения — 15 градусов УПК, или 1.7 мс). Также рассмотрено увеличение реактивности газа перед волной горения за счёт прохождения по нему волн давления, и получено, что непосредственный вклад в нагрев газа перед волной давления от волн давления, образовавшихся при воспламенении активированной зоны значительно меньше, чем нагрев за счёт сжатия поршнем и фронтом волны горения.

В разделе 4.4 рассмотрен переход от дефлаграционного горения к самовоспламенению несгоревшего газа перед волной горения. Такой переход происходит за счёт повышения давления и температуры в камере сгорания, при этом постепенно растёт концентрация перекиси водорода, пока температура не достигает нужной для взрывного разложения перекиси. Можно разделить источники энерговклада в газ перед волной горения: сжатие поршнем, сжатие разогретыми продуктами сгорания за фронтом волны горения и нагрев от прохождения волн давления. Показано, что для смеси с коэффициентом избытка топлива 0.7 основной вклад в подъём давления и температуры — от сжатия поршнем и от сжатия горячими продуктами за фронтом волны горения. Показано, что волна самовоспламенения — это быстрая волна реакции, т.е. фазовая волна, см. Рисунок 5.

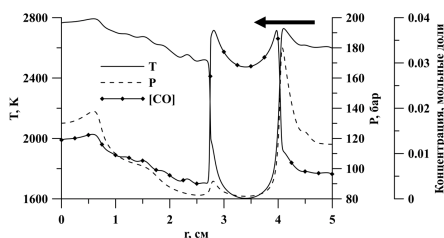


Рис. 5 — Движение волны самовоспламенения в несгоревшем газе, идущей от стенки в направлении основной волны горения ( $\alpha_{dis} = 325$  УПК,  $\delta = 0.24$ ,  $R_{az} = 0.75$  см,  $Q_d = 0.025$ ). Стрелкой обозначено направление движения волны самовоспламенения

В разделе 4.5 на основе серии расчётов установлена взаимосвязь между  $t_1$  и  $t_2$ , Рисунок 6. Установлено, что при фиксированной степени сжатия и геометрии разряда, наступление момента самовоспламенения газа перед волной горения зависит только от времени самовоспламенения области, активированной разрядом, и фактически разряд может влиять на переход к самовоспламенению только опосредовано, через повышение давления. При этом показано, что возможности управления временем самовоспламенения для смеси с  $\phi = 0.7$  довольно гибкие, так как разрядные параметры можно

менять в широком диапазоне значений, оставаясь одновременно как в области оптимальных моментов воспламенения активированной зоны, так и оптимальных моментов самовоспламенения газа перед волной горения. Тем не менее, эти возможности ограничены коэффициентом избытка топлива, чем более бедная смесь – тем меньше разряд влияет на самовоспламенение газа перед волной горения, а значит, тем менее эффективным становится управление самовоспламенением. Это связано с тем, что в более бедной смеси меньше тепловыделение при воспламенении разрядной зоны, а значит и меньше амплитуда у волн сжатия. Также показано, что в более богатой смеси возникают волны самовоспламенения в несгоревшем газе, а в более бедной смеси наблюдается воспламенение всего объема, сжатого волной горения, одномоментно.

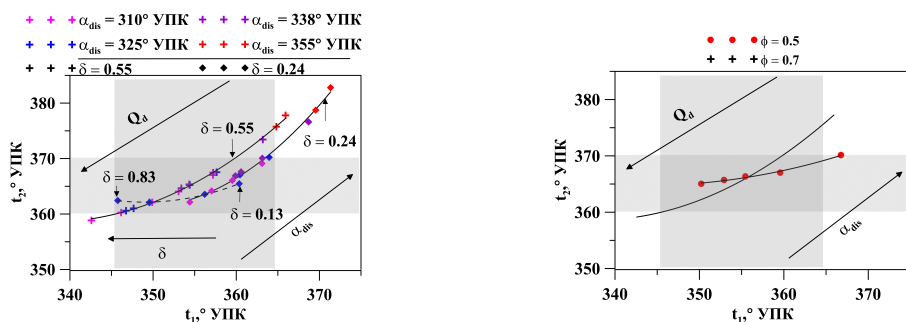


Рис. 6 — Зависимость времени самовоспламенения газа перед волной горения от времени воспламенения активированной зоны, на всех графиках варьировались  $Q_d$  и  $\alpha_{dis}$ . Пересечения двух серых полос — оптимальные условия работы. Слева  $\phi = 0.7$  и различные  $\delta$ , пунктир — вариация  $\delta$  в расчёте; Справа  $\delta=0.55$  и различные  $\phi$

В **Заключении** приведены основные результаты работы, которые заключаются в следующем:

1. Для достижения поставленных в диссертации целей построена математическая модель камеры сгорания компрессионного двигателя с импульсно-периодическим наносекундным разрядом в качестве воспламенителя. Она включает в себя одномерную газодинамическую модель на основе системы уравнений Навье-Стокса для химически активной среды, дополненную специальными членами для учёта сжатия поршнем, детальную схему химической кинетики горения углеводородов с воздухом и модель разрядной зоны. Начальные условия (давление, температура и состав) берутся из расчёта цикла работы камеры сгорания.

Одномерная газодинамическая модель была реализована в программном коде PlasmAero — были внесены изменения, отвечающие

за сжатие и проведены необходимые тесты. Важность учёта сжатия подтверждена результатами дальнейших расчётов. Для проверки кинетической схемы был выполнен расчёт скорости ламинарного пламени в зависимости от коэффициента избытка топлива для пропано-воздушной и этилено-воздушной смеси, получено хорошее совпадение с референсными значениями.

2. Численные исследования влияния импульсно-периодического наносекундного разряда на топливо-воздушную смесь показали, что:
  - основное количество активных частиц нарабатывается на наносекундных временах, а вложенная за остальное время импульса энергия идёт на нагрев газа;
  - при равной вложенной удельной энергии, чем короче разрядный импульс, тем больше его воздействие на топливо-воздушную смесь похоже на идеализированный случай диссоциации части молекул, а чем длиннее — на нагрев. Этот результат даёт физическое обоснование использования упрощённых моделей оценки концентрации активных частиц в разрядной области через вложенную энергию.
  - несмотря на продемонстрированную разницу времён индукции топливно-воздушной смеси приблизительно в полтора порядка, чтобы воспламенение после воздействия разряда происходило за оптимальные для двигателя времена (несколько мс в рассматриваемых условиях), необходимо вложить энергию около  $1 \text{ Мдж/м}^3$ ; в двигателе заметная доля этой энергии вкладывается за счёт сжатия поршнем, и таким образом, объемный разряд с заметно меньшей удельной энергией может успешно использоваться для воспламенения и управления процессами горения в камере сгорания.
3. Установлены механизмы влияния разряда на все режимы горения в камере сгорания компрессионного двигателя: продвижение волны горения осуществляется за счёт взаимодействия с волнами давления, возникающими при воспламенении активированной зоны, а переход к самовоспламенению — за счёт дополнительного сжатия продуктами сгорания. Быстрое продвижение волны горения позволяет реализовывать режим, при котором выделение тепла на стадии горячего пламени распределено во времени, что благоприятно для двигателя: часть объема воспламеняется дефлаграционной волной горения, а часть — самовоспламенением.
4. Показано, что инициация высокочастотным коронным разрядом может быть эффективным способом для реализации оптимальных тепловых и мощностных характеристик двигателя и состава продуктов сгорания. При этом, напрямую разряд влияет только на

воспламенение активированной зоны, которое можно изменять, варьируя момент включения разряда, удельный энергозатрат и долю объема активированной зоны, обработанную стримерами. Установлено, что при фиксированной степени сжатия и геометрии разряда, наступление момента самовоспламенения газа перед волной горения зависит только от времени воспламенения области, активированной разрядом, и фактически разряд может влиять на переход к самовоспламенению только опосредовано, через повышение давления. При этом показано, что возможности управления временем самовоспламенения довольно гибкие, так как разрядные параметры можно менять в широком диапазоне значений, оставаясь одновременно как в области оптимальных моментов воспламенения активированной зоны, так и оптимальных моментов самовоспламенения газа перед волной горения.

5. Установлена разница в возникновении самовоспламенения для бедных смесей с различными коэффициентами избытка топлива. Показано, что в более богатой смеси возникают волны самовоспламенения в несгоревшем газе, а в более бедной смеси наблюдается воспламенение всего объема, сжатого волной горения, одновременно. Показано, что для предсказания самовоспламенения в камере сгорания компрессионного двигателя с импульсно-периодическим наносекундным разрядом необходимо учитывать изменение давления при помощи движения поршня, исследования при постоянном объеме будут менее достоверными.

## Список литературы

- [1] C. Zou и др. — «Energy revolution: From a fossil energy era to a new energy era». — в: *Natural Gas Industry B* (3 2016), с. 1—11.
- [2] R.D. Reitz. — «Directions in internal combustion engine research». — в: *Comb. Flame* 160 (2013), с. 1—8.
- [3] S. Saxena и I.D. Bedoya. — «Fundamental phenomena affecting low temperature combustion and HCCI engines, high load limits and strategies for extending these limits». — в: *Prog. Energy Combust. Sci.* 39 (2013), с. 457—488.
- [4] S. Onishi и др. — «Active Thermo-Atmosphere Combustion (ATAC) - A New Combustion Process for Internal Combustion Engines». — в: *SAE Technical Paper* (1979), с. 790501.
- [5] X. Duan и др. — «A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine». — в: *Fuel* 285 (2021), с. 119142.

- [6] C. Hampe и др. — «Influence of high frequency ignition on the combustion and emission behaviour of small two-stroke spark ignition engines». — в: *SAE Technical Paper*, — с. 2013-32—9144.
- [7] L. Merotto и др. — «Comparison of ignition and early flame propagation in methane/air mixtures using nanosecond repetitively pulsed discharge and inductive ignition in a pre-chamber setup under engine relevant conditions». — в: *Combustion and Flame* 237 (2022), с. 111851.
- [8] A. Schenk, G. Rixecker и S. Bohne. — «Results from gasoline and CNG engine tests with the corona ignition system EcoFlash». — в: *3rd Laser ignition conference, Argonne, US*. — 2015, — paper W4A.4.
- [9] V. Cruccolini и др. — «Lean combustion analysis using a corona discharge igniter in an optical engine fueled with methane and a hydrogen-methane blend». — в: *Fuel* 259 (2020), с. 116290.
- [10] E. Filimonova, A. Vocharov и V. Bityurin. — «Influence of a non-equilibrium discharge impact on the low temperature combustion stage in the HCCI engine». — в: *Fuel* 228 (2018), с. 309—22.
- [11] V. A. Bityurin и Vocharov A. N. — «Магнитогидродинамическое взаимодействие при обтекании затупленного тела гиперзвуковым воздушным потоком». — в: *МЖГ* 5 (2006), с. 188—203.
- [12] А.С. Соколик. — «Самовоспламенение и сгорание в газах». — в: *Успехи физических наук* XXIII (1940), с. 209—50.
- [13] E. A. Filimonova. — «Discharge effect on the negative temperature coefficient behaviour and multistage ignition in  $C_3H_8$ -air mixture». — в: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 48 (2015), с. 015201.
- [14] Yong Hyun Choi и Joonsik Hwang. — «Review on Plasma-Assisted Ignition Systems for Internal Combustion Engine Application». — в: *Energies* 16.4 (2023). — DOI: 10.3390/en16041604.
- [15] A. Starikovskiy и N. Aleksandrov. — «Plasma-assisted ignition and combustion». — в: *Prog. Energy Combust. Sci.* 39.1 (2013), с. 61—110.
- [16] R. Dahms и др. — «Detailed chemistry flamelet modeling of mixed-mode combustion in spark-assisted HCCI engines». — в: *Proceedings of the Combustion Institute* 33.2 (2011), с. 3023—3030.
- [17] A. Mariani и F. Foucher. — «Radio frequency spark plug: an ignition system for modern internal combustion engines». — в: *Appl. Energy* 122 (2014), с. 151—161.
- [18] V.M. Batenin и др. — «Computational model for chemical compression reactor with gaseous working body». — в: *13th Intl conf on MHD electrical power generation and high temperature technologies, Beijing, China*. — 1999, — с. 855—8.

- [19] Y. Ju и W. Sun. — «Plasma assisted combustion: Dynamics and chemistry». — в: *Prog Energy Comb Sci* 48 (2015), с. 21—83.
- [20] Е.А. Filimonova и др. — «Influence of Nanoseconds Pulsed Discharges on the Composition of Intermediate and Final Combustion Products in the HCCI Engine». — в: *Plasma Chem. Plasma Proc.* 39.3 (2019), с. 683—694.
- [21] Е.А. Filimonova и др. — «Comparative modelling of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> removal from pollutant gases by using pulsed corona and silent discharges». — в: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 33 (2000), с. 1716—27.
- [22] N. Yu. Babaeva и G. V. Naidis. — «Two-dimensional modelling of positive streamer dynamics in non-uniform electric fields in air». — в: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 29 (1996), с. 2423—31.
- [23] G. V. Naidis. — «Modelling of transient plasma discharges in atmospheric-pressure methane–air mixtures». — в: *J. Phys. D: Appl. Phys.* 40 (2007), с. 4525—31.

*Добровольская Анастасия Сергеевна*

Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе

Автореф. дис. на соискание ученой степени канд. физ.-мат. наук

Подписано в печать \_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_.\_\_\_\_\_. Заказ № \_\_\_\_\_

Формат 60×90/16. Усл. печ. л. 1.5. Тираж 100 экз.

Типография ОИВТ РАН. 125412, Москва, Ижорская ул., 13, стр. 2