

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по научной работе



Баган Виталий
Анатольевич

2023 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию **Добровольской Анастасии Сергеевны** «Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - Физика плазмы.

Диссертация Добровольской А.С. представляет собой расчётно-теоретическую работу, посвящённую исследованию воздействия неравновесной плазмы стримерного разряда на процессы в камере сгорания компрессионного двигателя и поиску способов управления таким воздействием. Представленные в работе исследования и анализ полученных результатов позволили выделить механизмы влияния на все этапы горения однородной смеси, а также продемонстрировать возможности управления этим процессом при помощи вариации параметров разряда.

Актуальность работы. Как отмечается в обзоре литературы, экономические и экологические причины приводят к необходимости разработки новых энергетических систем, в том числе и двигателей внутреннего сгорания, в которых используются обеднённые топливовоздушные смеси. При этом в таких установках остро встают задачи поиска способов инициации и управления режимами горения. Среди различных методов активного управления горением можно выделить обработку топливовоздушной смеси неравновесной плазмой, использование которой выглядит особенно перспективным при работе с обеднёнными смесями. Но, несмотря на то, что кинетические механизмы влияния неравновесной плазмы на воспламенение изучены в значительной степени, исследование влияния на остальные процессы в камере сгорания остаётся актуальной задачей. При этом, рассматриваемые в диссертации разрядные системы воспламенения не только активно изучаются в экспериментальных работах, но и используются на практике, что является существенным стимулом для проведения исследования.

Диссертация Добровольской А.С. объёмом 136 страниц текста состоит из введения, четырёх глав, первая из которых – обзор литературы, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка используемой литературы и приложения; список литературы состоит из 125 наименований. Ознакомление с диссертацией позволяет утверждать, что сформулированные Добровольской А.С. положения, выносимые на защиту, раскрыты и обоснованы в 3-х главах диссертации из 4-х. Ниже, по ходу анализа их основного содержания выделены наиболее значимые результаты диссертанта.

Обзор литературы состоит из 5 разделов. В первом разделе приводятся основные понятия химической кинетики и особенности горения углеводородов, важные для понимания исследования. Во втором разделе приводятся преимущества и недостатки современных типов двигателей, и описывается стратегия низкотемпературного горения. Там же описывается принцип работы компрессионного двигателя, его преимущества (в т.ч. привлекательные экологические характеристики выхлопа и возможность работать с бедными смесями) и недостатки, основным из которых является сложность управления процессами в камере сгорания. В третьем разделе приводятся важные для горения различия в равновесной и неравновесной плазме, приводятся основные способы воздействия плазмы на горение – тепловой, кинетический и транспортный. В разделе обсуждаются способы использования разряда для создания стратифицированной по реакционной способности среды, аргументируется выбор рассматриваемого в диссертации высокочастотного коронного разряда в качестве источника воспламенения. В четвёртом разделе обсуждаются сложности управления воспламенением в компрессионном двигателе, в котором время воспламенения определяется химической кинетикой и предлагаемые модификации двигателя, позволяющие поджечь часть смеси при помощи дефлаграционной волны горения до наступления самовоспламенения. В пятом разделе описываются особенности численного моделирования совместных процессов в разряде и горения в двигателе.

В Главе 2 формулируется математическая модель, позволяющая рассмотреть процессы, происходящие в камере сгорания двигателя после обработки части смеси разрядом. В разделе 2.1 описывается физическая постановка задачи и приведены параметры камеры сгорания, на основе которых строится численная модель. В разделе 2.2 описана однозонная модель, используемая дальше для получения начальных условий для газодинамического расчёта. В разделе 2.3. получена газодинамическая квазиодномерная модель, в которой все движения происходят по радиусу, но при этом она включает в себя учёт сжатия вдоль оси цилиндра камеры сгорания за счёт добавочных членов в уравнении энергии и уравнении непрерывности. Соответствующие этой модели изменения внесены в программный код, используемый в лаборатории диссертанта. В разделе 2.4 описана используемая кинетическая схема, и приведена её валидация при помощи расчёта времени индукции и скорости ламинарного пламени для смеси пропана с воздухом и этилена с кислородом; результаты сравнивались с экспериментальными и теоретическими референсными значениями. Также приведены результаты тестирования модели сжатия из предыдущего раздела. Описанная в главе модель дальше используется для

получения результатов, с её помощью выполнены все расчёты в Главе 4 и некоторые – в Главе 3.

В Главе 3 рассмотрены различные подходы к моделированию разрядной стадии с целью выявления способов влияния плазмы на топливную смесь. В разделе 3.1 приведены результаты однозонного расчёта, в котором влияние разряда учитывалось с использованием метода G-факторов и показано, что обработка топливовоздушной смеси непосредственно перед началом стадии холодного пламени оптимальна с точки зрения стимулирования тепловыделения на этой стадии. Также показано, что для смеси с коэффициентом избытка топлива 0.33 только при энергозкладах порядка 0.1 эВ на молекулу достигается полное сгорание, а при таких энергозкладах в разряде появляется много нетермических оксидов азота. В разделе 3.2 рассмотрены результаты предварительных расчётов влияния различных факторов на воспламенение в газодинамической постановке и показано, что основную роль в ускорении воспламенения играет атомарный кислород. В разделе 3.3 приведены результаты моделирования развития импульсного разряда в воздухе в осесимметричной постановке. В разделе 3.4 обсуждаются некоторые результаты моделирования продольно-поперечного разряда в воздухе, применимые к решению задач плазменно-стимулированного горения. В разделе 3.5 в идеализированной постановке исследуется влияние различных способов введения энергозклада в топливно-воздушную смесь на изменение времени индукции и показано, что при равных энергозкладах результат действия разряда наносекундной длительности схож с созданием химической неравновесности. В разделе 3.6 описана используемая в дальнейших расчётах в главе 4 модель активированной зоны, учитывающая многоимпульсность и многоканальность разряда.

В главе 4 обсуждаются результаты исследования влияния разряда на режимы горения в камере сгорания. В разделе 4.1 формулируется постановка параметрического исследования, выделены основные управляющие режимами горения параметры разряда: энергозклад, доля объема разрядной зоны, обработанная стримерами, и момент включения разряда. В разделе 4.2 обсуждается влияние разряда на воспламенение обработанной разрядом области, показывается, что механизм уменьшения времени индукции тот же, что и в однозонном расчёте, а на время индукции непосредственно влияет момент включения разряда и энергозклад за счёт изменения концентрации активных частиц в стримере и температуры. В разделе 4.3 описано распространение волны горения после воспламенения активированной разрядом зоны; показано, что быстрое продвижение волны горения, обеспечивающее сгорание заметной доли топливовоздушной смеси, происходит за счёт взаимодействия с волнами сжатия; также обсуждается вклад различных механизмов в нагрев газа перед волной горения; причем основным является сжатие поршнем и фронтом волны горения. В разделе 4.4 описан переход к самовоспламенению газа перед волной горения, и показано, что волна самовоспламенения – фазовая, а детонация не успевает развиваться. В разделе 4.5 обсуждаются возможности управления всеми режимами горения путём варьирования параметров разряда, и показано, что, непосредственно варьируя параметры разряда, можно влиять только на воспламенение активированной зоны, а момент перехода к самовоспламенению

зависит уже от воспламенения активированной зоны, геометрии разряда и состава смеси.

В заключении формулируются основные результаты диссертационной работы.

Следует отметить некоторые основные результаты, которые имеют научную новизну и представляются теоретически и практически значимыми:

1. Установлены механизмы влияния разряда на все режимы горения в цилиндре камеры сгорания двигателя, возникающие после обработки части топливо-воздушной смеси разрядом. При этом, меняя параметры разряда, можно напрямую управлять временем воспламенения активированной зоны, а на переход газа перед волной горения к самовоспламенению можно влиять только опосредовано, через повышение давления перед волной горения.

2. Показано, что создание химической неравновесности при помощи разряда приводит к более быстрому воспламенению, чем нагрев топливо-воздушной смеси за счёт такого же энерговклада; предложен способ воздействия разрядом, сочетающий интегральный энергоподвод к смеси (в рассматриваемой задаче это сжатие поршнем) с управляющим воздействием разряда.

3. Показано, что инициация высокочастотным коронным разрядом может быть эффективным способом реализации оптимальных тепловых и мощностных характеристик двигателя и состава продуктов сгорания. При этом показано, что разрядные параметры можно варьировать в широком диапазоне значений, оставаясь одновременно как в области оптимальных моментов воспламенения активированной зоны, так и оптимальных моментов самовоспламенения газа перед волной горения.

4. Установлена разница в возникновении самовоспламенения для бедных смесей с различными коэффициентами избытка топлива. Показано, что чем меньше топлива в смеси, тем слабее влияние разрядной инициации на переход к самовоспламенению.

Замечания.

По тексту диссертационной работы можно сделать следующие замечания.

1. Моделирование влияния разряда на процессы в камере сгорания выполнено в двумерной осесимметричной постановке. Из текста диссертации не ясно, в каком месте камеры сгорания расположены электроды, соответствующие такой постановке.

2. Требуется пояснения вопрос о том, как соотносятся энерговклады от искрового разряда в стандартном процессе зажигания и в предлагаемом варианте инициирования зажигания импульсным высокочастотным разрядом.

3. Для лучшего понимания физического механизма воздействия рассматриваемого разряда на процесс зажигания стоит проиллюстрировать, как и на каком этапе происходит воздействие наработанных радикалов на основную кинетическую цепочку процесса зажигания.

Приведенные замечания не затрагивают основных результатов работы, выполненной на высоком научном уровне.

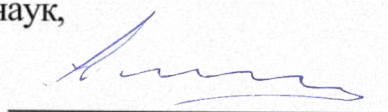
Заключение.

Диссертация Добровольской Анастасии Сергеевны «Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе» представляет собой законченную

научно-исследовательскую работу, посвященную актуальной тематике, соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а Добровольская Анастасия Сергеевна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 - Физика плазмы.

Диссертация обсуждена и одобрена на заседании кафедры прикладной физики физтех-школы физики и исследований им. Ландау 28 ноября 2023 г., протокол № 2023/3.

Доктор физ.-мат. наук,
профессор



Александров Николай Леонидович

Почтовый адрес: 141700, Московская область, г. Долгопрудный, Институтский пер., 9

Телефон: 7 (903) 773-63-19

Адрес электронной почты: aleksandrov.nl@mipt.ru

Организация – место работы: федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», кафедра прикладной физики физтех-школы физики и исследований им. Ландау

Должность: заместитель заведующего кафедрой прикладной физики, профессор

Web-сайт организации: <https://mipt.ru/>