

ОТЗЫВ

официального оппонента

на диссертационную работу Добровольской Анастасии Сергеевны «Использование неравновесной плазмы стримерного разряда для управления горением углеводородо-воздушной смеси в компрессионном двигателе» на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы

Диссертация Добровольской А. С. посвящена исследованию воздействия неравновесной плазмы на все этапы горения однородной смеси в камере сгорания компрессионного двигателя и поиску способов управления таким воздействием, работа является расчётно-теоретической.

Актуальность темы. В обзоре литературы показано, что современные требования к энергоэффективности и экологичности энергетических установок приводят к разработке новых типов двигателей внутреннего сгорания, работающих на обеднённых смесях в рамках стратегии низкотемпературного горения. На этом пути есть много нерешённых задач, в том числе инициация и поддержание стабильного горения в бедных смесях, а также управление процессами в камере сгорания. В качестве перспективного метода стимулирования горения обеднённых смесей в двигателях выделяют обработку топливовоздушной смеси неравновесной плазмой. Но несмотря на продемонстрированные в экспериментах результаты, механизмы влияния неравновесной плазмы на происходящее в камере сгорания понятны не до конца, и их прояснение является актуальной задачей.

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 литературы и приложения; список литературы содержит 125 наименований. Ознакомление с диссертацией позволяет утверждать, что сформулированные Добровольской А.С. положения, выносимые на защиту, раскрыты и обоснованы во второй, третьей и четвертой главе диссертации.

Обзор литературы состоит из пяти разделов. В первом разделе приводятся важные для понимания работы основные понятия из химической кинетики и особенности горения углеводородов. Во втором разделе обсуждаются особенности современных типов двигателей внутреннего сгорания, их преимущества и недостатки, описывается стратегия низкотемпературного горения и принцип работы компрессионного двигателя, а также сложности, замедляющие его внедрение. В третьем разделе рассмотрены основные методы воздействия плазмы на процессы горения - тепловой, кинетический и транспортный, а также обсуждается использование электрического разряда для создания стратифицированной среды с переменной реактивностью и обосновывается выбор стримерного разряда, как инициатора горения в исследовании в диссертации. В четвертом разделе обсуждаются проблемы управления процессами в камере сгорания компрессионного двигателя, связанные с тем, что момент воспламенения определяется химической кинетикой. В 5 разделе обсуждаются сложности совместного моделирования разрядных процессов и процессов горения в двигателях внутреннего сгорания.

В Главе 2 представлена математическая и численная модель, позволяющее моделировать процессы в камере сгорания двигателя после воздействия электрического разряда на часть топливовоздушной смеси. Описаны параметры установки, на основе которой создана однозонная модель, используемая в дальнейшем для получения значений

давления, температуры и состава в камере сгорания в зависимости от угла поворота коленвала в двигателе. Создана газодинамическая квазиодномерная модель процессов в камере сгорания, в которой все изменения происходят по радиусу, но при этом учитывается сжатие вдоль оси цилиндра. Эта модель используется для вычислений в последующих главах, соответствующие изменения внесены в лабораторный программный код и протестированы, также приведено тестирование используемой кинетической схемы горения этилена и пропана.

Глава 3 посвящена моделированию влияния электрического разряда на топливовоздушную смесь. В силу временной многомасштабности задачи необходимо было разделить моделирование разрядных процессов и горения, и в третьей главе рассматривается влияние разряда, а в четвертой – результаты расчёта горения, возникающего после обработки разрядом. Влияние разряда на состав и температуру топливовоздушной смеси рассмотрено в различных приближениях: интегральный метод G-факторов и квазинейтральное приближение для описания плазмы совместно с решением системы уравнений Навье-Стокса для нейтрального газа. Показано, что инициирование воспламенения, в области обработанной электрическим разрядом происходит со счет наработки сверхравновесной концентрации атомов и молекул низкотемпературной плазмы. При этом общий энергоклад важен для уменьшения времени индукции топливовоздушной смеси, а основным влияющим на горения радикалом является атомарный кислород.

В главе 4 обсуждаются результаты параметрического исследования влияния электрического разряда на процессы в камере сгорания. Перечислены управляющие параметры разряда, рассмотренные в диссертации – удельный энергоклад, момент включения и доля объёма активированной зоны, обработанная разрядом, также варьировалось количество топлива в смеси. Продемонстрированы механизмы влияния на все стадии горения в двигателе, а именно: на наступление воспламенения можно влиять, непосредственно меняя энергоклад или момент включения разряда, скорость продвижения дефлаграционной волны горения определяется взаимодействием с волнами давления, возникшими в момент воспламенения активированной зоны, а переход к самовоспламенению осуществляется при помощи сжатия как поршнем, так и фронтом волны горения. Обнаружена зависимость между временем воспламенения обработанной разрядом зоны и переходом к самовоспламенению, показано, что эта зависимость более слабая в случае более бедной смеси, что накладывает ограничения на возможности управления горением в двигателе.

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 топливовоздушной смеси разрядом. Изменение параметров разряда даёт возможность непосредственно управлять временем воспламенения активированной зоны, при этом на возникновение самовоспламенения в области несгоревшего газа можно влиять только опосредовано, через повышение давления перед волной горения.
2. Продемонстрировано, что инициация высокочастотным коронным разрядом может быть эффективным способом реализации оптимальных тепловых и

мощностных характеристик двигателя и состава продуктов сгорания. Понимание механизмов влияния разряда на различные стадии горения даёт возможность управлять процессами в камере сгорания, варьируя параметры разряда в широком диапазоне значений.

3. Показано, что хоть создание химической неравновесности и ускоряет воспламенение, но для достижения характерных для двигателя времен индукции нужен больший подвод энергии, чем в исследуемом разряде; что показывает важность учёта изменения объема при моделировании процессов в камере сгорания. Предложен способ воздействия разрядом, сочетающий интегральный энергоподвод к смеси (в рассматриваемой задаче это сжатие поршнем) с управляющим воздействием разряда.
4. Показано, что чем меньше топлива в смеси, тем слабее влияние обработки топливоздушной смеси разрядом на переход к самовоспламенению, и тем менее эффективным будет управление процессами в камере сгорания.

Научная и практическая значимость. Результаты исследования по управлению процессами в камере сгорания могут быть использованы в качестве практических рекомендаций по организации горения при разработке современных двигателей внутреннего сгорания на обеднённых смесях. Результаты расчётов воздействия разряда на топливоздушную смесь могут использоваться в фундаментальных и практических исследованиях стимулированного плазмой горения в различных установках. 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, в том числе ФИЦ ИХФ РАН, МФТИ (НИУ), МГТУ им. Н.Э. Баумана, НИИ ядерной физики им. Д.В. Скобельцина МГУ, ГНЦ РФ «ТРИНИТИ».

Личный вклад автора. Все выносимые на защиту результаты получены лично автором. Автор принимала активное участие в планировании исследований, лично вносила изменения в коды расчётных программ и проводила анализ результатов.

Автореферат включает необходимые сведения о диссертации Добровольской А.С. и соответствует её содержанию. Сама диссертационная работа структурирована по правилам ВАК, содержит требуемые формальные разделы, в достаточной степени иллюстрирована и даёт полное представление о проведённых исследованиях и результатах. Все полученные автором научные результаты являются новыми, а выводы – обоснованными.

Достоверность полученных результатов обеспечивается использованием проверенных методов моделирования, а используемый собственный программный код лаборатории много лет применяется для решения различных задач и детально верифицирован. Основные результаты работы **опубликованы** в 7 статьях в различных рецензируемых российских и зарубежных журналах и находится в соответствии с расчётными и экспериментальными результатами полученными другими авторами.

Апробация работы. Материалы диссертации были достаточно полно представлены на 12 российских и международных конференциях, соответствующий список, представлен во введении.

По предоставленной диссертационной работе можно сделать следующие замечания.

1. В диссертации говорится о необходимости достижения низких концентраций NOx в продуктах сгорания. Известно, что использование электрического разряда в газовых

турбинах, использующих в качестве топлива метан, может привести к расширению пределов воспламенения и стабилизации работы турбины. С другой стороны, использование разряда приводит так же к существенному увеличению концентрации NOx. Основная причина диссоциация молекул азота электронами. В используемой кинетической модели этот процесс учитывается. Однако в диссертации не приводятся значения расчетных концентраций NOx.

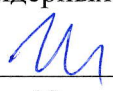
2. В диссертационной работе предлагается управлять процессом воспламенения путем настройки трех параметров: удельной энергии, подаваемой в стример, доли объема, занимаемого стримерами (или радиуса активированной зоны), и угла включения разряда относительно ВМТ. Увеличение удельной энергии разряда может приводить к увеличению доли объема, занимаемого стримерами. Возникает вопрос насколько независимыми являются первых два параметра: удельная энергия и доля объема, занимаемого стримерами?


3. К сожалению, текст диссертации не свободен от опечаток и неточностей. Например, на стр. 82 есть ссылка на рисунок 4, которого в тексте диссертации нет. В подписи к Рис. 3.8 не расшифровано, что такое кривая 1 и 2. Не ясно, что означает термин “емкостного разряда” на стр. 64.

Вместе с тем, указанные замечания не умаляют значимости диссертационного исследования.

На основании изложенного можно заключить, что диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а её автор Добровольская Анастасия Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – физика плазмы.

Отзыв составил ведущий научный сотрудник лаборатории физики плазмы Отделения теоретической физики, вычислительной математики и прикладных разработок Акционерного общества "Государственного научного центра Российской Федерации Троицкого института инновационных и термоядерных исследований»

к.ф.-м.н., Кочетов Игорь Валерианович  «11» *января* 2023 г.
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, тел. (495) 841-5309,
e-mail: kochet@triniti.ru

Подпись Кочетова И. В. удостоверяю
ученый секретарь ГНЦ РФ ТРИНИТИ, к.ф.-м.н.  /А. А. Ежов/
108840, г. Москва, г. Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, тел. (495) 841-5309,
e-mail: ezhov@triniti.ru

