

## **Отзыв официального оппонента на диссертационную работу**

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.

Диссертационная работа Добровольской А.С. представляет собой законченное расчетно-теоретическое исследование, в котором моделируется воздействие неравновесной плазмы импульсно-периодического наносекундного разряда на горение однородной смеси применительно к рабочему процессу в компрессионном двигателе.

Работа посвящена решению важной научной задачи – поиска и развития новых эффективных способов активного управления горением с использованием неравновесной плазмы электрического разряда.

**Актуальность диссертации** определяется потребностью создания технологий, позволяющих наиболее эффективно и экологически безопасно преобразовывать химическую энергию топлив в полезную мощность. Одним из приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации является «Энергоэффективность, энергосбережение, ядерная энергетика». А одним из путей решения вопроса энергоэффективности (снижения количества выбросов  $\text{CO}_2$  на произведенную единицу мощности) является развитие активных способов управления сжиганием топлив, в том числе с применением внешних энергоисточников различного типа (лазерное излучение, нестационарная газовая плазма, электрические поля и разряды). Следует отметить, что говоря о воздействии неравновесной плазмы на горение необходимо учитывать, как изменения в протекании кинетических процессов, так и газодинамические эффекты локального тепловыделения. Поэтому работы, посвященные исследованию

физических механизмов воздействия плазмы на реагирующие течения, были и остаются актуальными в настоящее время.

Диссертация включает в себя: введение, 4 главы, заключение, список сокращений и условных обозначений, словарь терминов, список литературы (125 источников) и приложение. Полный объем диссертации составляет 136 страниц, включая 47 рисунков.

Во **введении** обоснована актуальность темы диссертации; поставлены цели и задачи, показана научная новизна, теоретическая и практическая значимость; кратко описаны методы исследования; сформулированы основные положения, выносимые на защиту; выделен личный вклад автора в работу; сжато изложено содержание диссертации.

В **первой главе** приведен обзор литературы по теме диссертации. Определены термины и понятия, используемые в дальнейшем при рассмотрении горения углеводородов в двигателе внутреннего сгорания (ДВС). В упрощенном случае проведена оценка роли химической неравновесности при сжатии газа. Сделано сравнение ДВС с искровым зажиганием, дизельного и компрессионного.

Согласно литературным данным преимуществами применения в ДВС низкотемпературного горения являются уменьшение тепловых потерь в стенку и снижение скорости образования NOx. При этом компрессия в таком ДВС оказывается достаточно высокой, обеспечивая КПД на уровне дизельного двигателя и выше. Основными недостатками являются: слабая устойчивость и управляемость рабочего процесса; сложная процедура запуска двигателя (холодный старт). Т.е. в реализации высоко эффективного рабочего процесса имеются проблемы, разрешение которых возможно с помощью плазменного управления горением (Plasma Assisted Combustion). При этом плазма сама по себе является достаточно сложным объектом, что отмечено в данной главе. В частности, рассматриваемая в дальнейшем плазма стримерных разрядов является неравновесной, в ней кроме наличия высокой

электронной температуры, присутствуют активные радикалы и молекулы в возбужденных состояниях. Поэтому при взаимодействии с реагирующей средой необходимо учитывать как нагрев, так и изменение в химических цепочках реакций. Кроме того, вследствие локального изменения состава могут меняться транспортные свойства (коэффициенты диффузии и теплопроводности). Термическое воздействие плазмы, изменение химической кинетики и транспортных свойств среды являются сопряженными задачами, что вызывает дополнительные трудности при рассмотрении вопросов плазменного управления горением с помощью стримерных разрядов.

Несмотря на обилие экспериментальных и расчетно-теоретических работ по влиянию неравновесной электро-разрядной плазмы (коронный, стримерный, барьерный разряд) на предплазменную подготовку топливно-воздушной смеси, нет полного понимания механизмов, определяющих «активацию» смеси, инициирование горения и распространения пламени при наличии пространственной неоднородности температуры и концентраций.

Таким образом, согласно анализу литературных данных, для решения задачи о воспламенении и формировании волны горения в газодинамическом приближении необходимо выработать подходы к созданию «активированной» разрядом области при совместном моделировании быстрого воздействия импульсного разряда и относительно медленном развитии горения. Из чего следует необходимость разделения процессов при моделировании и использование физических упрощений и приближенных моделей. Чем обусловлена формулировка целей и задач диссертации.

**Вторая глава** посвящена моделированию газодинамических процессов в камере сгорания компрессионного двигателя с учетом изменения состава при открытии/закрытии клапанов, предплазменную подготовку разрядом выделенной массы смеси, инжестируемой в камеру сгорания отдельно. Выполнены оценки тепловых потерь в стенку. Воспламенение в камере сгорания цилиндрического компрессионного двигателя описывалось

одномерной газодинамической моделью, учитывающей сжатие среды поршнем вдоль оси. Использовалась схема химической кинетики, состоящая из 700 реакций для 103 компонент, подробно описывающая горение углеводородных топлив в воздухе. Схема верифицировалась на пропан-воздушной и этилен-воздушной смеси по временам индукции и скоростям распространения ламинарного пламени по экспериментальным и расчетным данным (источники [88, 89, 92-94] из списка библиографии).

В третьей главе представлены результаты моделирования в квазинейтральном приближении импульсного-периодического и продольно-поперечного электрического разряда в воздухе с целью оценки количества и скорости образования активных радикалов, а также определения влияния на время индукции различных способов «активации» топливно-воздушной смеси. В качестве основных реакций образования активных частиц взяты возбуждение молекул азота и кислорода электронным ударом; частичная диссоциация при столкновении с быстрым электроном сложных молекул и передача возбуждения от азота к кислороду. Это выглядит обоснованным, т.к. согласно рассматриваемым условиям в объеме создается электрическое поле, напряженность которого  $E[V/cm]/P[tor] \approx 15-20$ , что как раз соответствует средней энергии свободных электронов, превышающей энергию возбуждения и диссоциации молекул азота и кислорода. Выполнены оценки по активации в стримерном разряде в зависимости от вкладываемой энергии и состава. Определены моменты в цикле работы двигателя для оптимального включения стримерного наносекундного разряда, а также роли нагрева за счёт сжатия, тепловыделения в разряде и действия активных частиц, образующихся в газоразрядной плазме. Показана ключевая роль атомарного кислорода в ускорении воспламенения по сравнению с другими радикалами.

В четверной главе отображены результаты расчетно-теоретического исследования влияния обработки части смеси импульсно-периодическим стримерным наносекундным разрядом на рабочий процесс в камере сгорания

компрессионного двигателя. Определено влияние различных параметров разряда на воспламенение, распространение волны горения и смену режима распространения пламени. Для этого используются методы и подходы, а также результаты, представленные во второй и третьей частях диссертации. Сравнение двух составов ( $\varphi=0.5$  и  $0.7$ ) показало, что на воспламенение и горение более бедной смеси  $\varphi=0.5$  слабо влияют параметры разряда, и управление процессом в компрессионном двигателе на такой смеси затруднено. В случае  $\varphi=0.7$ , изменяя энергию в разряде и момент зажигания, можно эффективно управлять рабочим процессом.

В **заключении** приведены основные результаты работы, подтверждающие основные положения, выносимые на защиту.

В работе использовались оригинальные подходы, полученные результаты, изложенные в диссертации, являются **новыми**, а выводы – **обоснованными**.

**Достоверность** представленных автором результатов подтверждена квалифицированным применением расчетных методов; сравнительным анализом полученных данных с экспериментальными и расчетно-теоретическими результатами, полученными другими авторами.

К несомненным **достоинствам работы** относится владение автором современных методов расчетно-теоретических исследований, использованием оригинальных кодов, в которые собственноручно вносились изменения и дополнения.

Отметим наиболее **важные результаты**, полученные автором:

- Создана математическая модель камеры сгорания компрессионного двигателя с импульсно-периодическим наносекундным разрядом в качестве воспламенителя, включающая в себя одномерную газодинамическую модель на основе системы уравнений Навье-Стокса для химически активной среды, дополненную специальными членами учёта сжатия поршнем, детальную схему химической кинетики горения углеводородов в воздухе и модель разрядной зоны.

- На основе результатов численных исследований показана роль: наработки разрядом активных радикалов, разогрева топливно-воздушной смеси в области активации и работы сжатия поршня.
- Определена минимальная энергия стримерного разряда (для условий расчета примерно  $1 \text{ МДж/м}^3$ ) для того, чтобы объемный разряд мог успешно использоваться для воспламенения и управления процессами горения в камере сгорания, повышая эффективность рабочего процесса компрессионного двигателя.
- В расчете реализованы все стадии процесса теплоподвода от горения: активация смеси, воспламенение, распространение волны горения и переход в режим объемного горения. Определены условия инициирования горения топливно-воздушной среды высокочастотным коронным разрядом с реализацией оптимальных тепловых и мощностных характеристик двигателя с низким уровнем содержания вредных веществ в продуктах сгорания.
- Установлены различия в переходе к режиму объемного горения для бедных смесей с различными коэффициентами избытка топлива. Переход в режим объемного горения в более бедной смеси с  $\varphi=0.5$  почти не зависит от параметров разряда и времени воспламенения активированной зоны. В то время как для смеси с  $\varphi=0.7$  наблюдалось заметное влияние их на самовоспламенение газа перед волной горения. Показано, что в смеси с коэффициентом избытка топлива  $\varphi=0.7$  в расчетах возникают волны самовоспламенения в газе перед волной горения, а в более бедной смеси с  $\varphi=0.5$  воспламенение идет по всему объему, сжатого волной горения, одновременно.

Полученные результаты свидетельствуют, что возможности эффективного применения неравновесной плазмы импульсно-периодического наносекундного разряда в рабочем процессе в компрессионного двигателя.

**По тексту диссертации имеются следующие замечания и вопросы:**

1) На стр.16 сделано утверждение со ссылкой на первоисточник: «*Чем сложнее молекула, тем больше при горении высвобождается энергии химических связей на единицу массы*» [12]. При этом, данное утверждение нигде далее не используется.

В источнике (Е.С. Щетинков «Физика горение газов» стр.142, все с точностью до наоборот): «*Чем сложнее молекула, тем больше энергии заключено во внутренних связях и соответственно тем меньше тепловой энергии выделяется при сгорании одной молекулы в расчете на единицу веса.*» Что подтверждается, например, теплотворной способностью топлив: метан  $H_u=13250$  ккал/кг, пропан  $H_u=12000$  ккал/кг, бутан  $H_u=11800$  ккал/кг, бензин  $H_u=11250$  ккал/кг.

2) На стр. 40 в формуле 2.2 опечатка, в градиенте температуры не должно быть индекса «*wall*». Далее идет ссылка на эмпирическую модель Хохенберга, которая описывает тепловые потоки при турбулентном пограничном слое и подводе тепла в объеме для дизельного двигателя. Почему Вы считаете, что константы, полученные для рабочего процесса в дизельном двигателе, подходят и для компрессионного ДВС?

3) В тексте диссертации нет подробной кинетической схемы, в работе [83], на которую сделана ссылка, также не приводится полной кинетики. Но можно заметить, что в кинетической схеме отсутствуют реакции хемоионизации. Известно, что при горения углеводородных топлив за образование ионов в пламени отвечают реакции хемоионизации. Как Вы считаете, что изменится в Вашем расчете при включении этих реакций в кинетическую схему?

4) В параграфе 4.3 идут рассуждения о скорости распространения пламени и сравнение с движением ламинарных фронтов по «холодной» смеси (не активированной). Вы решаете уравнения Навье-Стокса, какие числа Рейнольдса в задаче? Распространение пламени идет в ламинарном или турбулентном режиме? Кроме того, подключая «активацию» среды, Вы

меняете транспортные свойства, а скорости ламинарного пламени связаны с коэффициентом теплопереноса:  $Su = \sqrt{\frac{a}{\tau_{comb}}}$ . Чем же обусловлено ускорение волны горения на самом деле?

5) По тексту встречаются упоминания о качественном сравнении с результатами других авторов. Есть ли какие-то количественные экспериментальные данные по рабочему процессу компрессионного двигателя с которыми можно корректно провести сравнение полученных Вами результатов?

Приведенные замечания не являются принципиальными при общей оценке диссертации. Работа выполнена на высоком научном уровне. Полученные результаты обладают новизной и практической значимостью.

#### **Личный вклад автора**

Все результаты расчётов, выносимые на защиту, получены лично автором. Автор принимала активное участие в планировании исследований и анализе результатов. Лично вносил изменения в коды расчетных программ.

Результаты, представленные в диссертации, опубликованы в 7 статьях рецензируемых периодических изданий, входящих в базы данных Web of Science и Scopus и рекомендованных ВАК., докладывались и обсуждались на международных и Российских научных мероприятиях.

Автореферат в полной степени отражает основные положения и выводы диссертации.

Результаты диссертационной работы Добровольской А.С. могут быть использованы для создания и прогнозирования работы плазменного активатора в компрессионных двигателях.

Таким образом, диссертация Добровольской А.С. является научно-квалификационной работой, в которой на основании выполненных автором



исследований создана адекватная математическая модель, учитывающая все стадии тепловыделения в рабочем процессе компрессионного двигателя с плазменной активацией топливно-воздушной смеси.

Диссертационная работа Добровольской А.С. удовлетворяет требованиям, предъявляемым ВАК РФ к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук и соответствует требованиям пункта 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., а Добровольская А.С. заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.9 – Физика плазмы.

Официальный оппонент:

Тупикин Андрей Викторович,

д.ф.-м.н. (специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы),

старший научный сотрудник лаборатории №7.4 «Лаборатория физических основ энергетических технологий» ИТ СО РАН.

Телефон: +7 (913) 462-88-63

E-mail: [tupikin@itp.nsc.ru](mailto:tupikin@itp.nsc.ru)

Институт теплофизики СО РАН,

Пр. Ак. Лаврентьева, д.1, Новосибирск, Россия, 630090,

сайт: <http://itp.nsc.ru/>, E-mail: [director@itp.nsc.ru](mailto:director@itp.nsc.ru)

тел.: +7 (383) 330-90-40, факс: +7(383) 330-84-80

Я, Тупикин Андрей Викторович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Добровольской Анастасии Сергеевны, и их дальнейшую обработку.

21.11.2023 г.



А.В. Тупикин

Подпись Тупикина Андрея Викторовича заверяю  
Учёный секретарь ИТ СО РАН

к.ф.-м.н.



М.С. Макаров