

ОТЗЫВ

официального оппонента к.ф.-м.н. Титовой Наталии Сергеевны
на диссертационную работу Смыгалиной Анны Евгеньевны
“ВЛИЯНИЕ СОСТАВА ГОРЮЧИХ СМЕСЕЙ НА ОСНОВЕ ВОДОРОДА НА
РЕЖИМЫ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ И ГОРЕНИЯ”

на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Диссертационная работа А.Е. Смыгалиной посвящена теоретическому исследованию некоторых аспектов воспламенения и горения водородно-воздушных смесей в зависимости от их состава. Внимание сосредоточено на решении трех задач: (1) определение нижнего концентрационного предела горения гомогенной смеси водород-воздух; (2) анализ механизмов самовоспламенения водорода при его истечении из камеры высокого давления в канал, заполненный воздухом, а также определение нижнего предела давления в камере и скорости открытия диафрагмы с целью безопасного хранения и использования водорода; (3) исследование эффективности применения небольших добавок низкоактивных компонентов для предотвращения детонационных режимов горения в двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием, работающем на водороде.

Актуальность работы определяется современной мировой тенденцией по частичной или полной замене традиционных углеводородных топлив (природный газ, бензин, керосин, дизельное топливо) альтернативными топливами. Среди таких топлив водород занимает особое место, потому что обладает очень высокой удельной теплотой сгорания и является экологически чистым топливом, так как при его сгорании образуется только вода. Однако водород – это взрывоопасное вещество, поэтому вопросы, связанные с безопасным хранением и использованием водорода, являются очень актуальными.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Основные результаты диссертационной работы опубликованы в 4-х статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК. Результаты работы докладывались на российских и международных конференциях.

Во **введении** автор аргументирует актуальность работы, определяет цели и ставит задачи исследования, описывает новизну и значимость работы.

В **первой главе** описана математическая модель, используемая для численного моделирования воспламенения и горения водородно-воздушных смесей, которая основана на системе уравнений газовой динамики для реагирующей смеси. Система уравнений представлена в диссертации в общем виде, а также в нульмерной, одномерной и двумерной осесимметричной постановках, которые используются для решения

конкретных задач. Описан численный метод решения системы уравнений. Обосновывается выбор кинетического механизма окисления водорода и смеси водорода с добавкой метана для решения поставленных задач. Для верификации математической модели и программного кода выполнено сравнение рассчитанных значений времени индукции и ламинарной скорости пламени с экспериментальными данными.

Вторая глава посвящена определению нижнего концентрационного предела воспламенения и горения водородно-воздушной смеси. Для решения задачи используются нульмерный и одномерный подходы. Расчеты выполнены для смесей однородного и неоднородного состава.

В **третьей главе** представлены результаты численных исследований воспламенения водорода при его истечении из камеры высокого давления в канал, заполненный воздухом. Показана возможность формирования двух очагов самовоспламенения водорода. Проанализированы механизмы, ответственные за возникновение этих очагов. Для заданной конфигурации задачи определен предельный уровень давления в камере высокого давления, ниже которого вытекающий из баллона водород не способен воспламениться. Продемонстрировано влияние скорости открытия диафрагмы на возникновение очагов воспламенения. Работа способствовала объяснению явлений, выявленных в результате экспериментальных исследований, выполненных в ИВТАН.

В **четвертой главе** проведено численное исследование горения водорода в цилиндре двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием. Удовлетворительное соответствие результатов расчета с данными экспериментов, проведенных в ИВТАН, подтвердили работоспособной разработанной модели и вычислительного алгоритма. Показано, что эффективным способом предотвращения детонационных режимов горения в цилиндре является использование небольших добавок метана или водяного пара, а также обеднение горючей смеси. Определены минимальные концентрации этих добавок, с точки зрения обеспечения оптимальных значений максимального давления в цилиндре и угла поворота коленчатого вала, при котором реализуется это давление.

В **заключении** приведены основные результаты и выводы работы.

Работа содержит **новые** научные результаты: проанализированы различные режимы истечения водорода из камеры высокого давления в заполненный воздухом канал и подробно объяснены механизмы образования очагов воспламенения в этом случае; проведен анализ механизмов развития горения в цилиндре двигателя внутреннего сгорания с искровым зажиганием, работающем на водороде, в случае добавки низкоактивных компонентов для

подавления детонации и обеспечения оптимальных условий работы двигателя.

Практическая значимость работы состоит в том, что для конкретных условий и геометрии задач получены количественные данные по максимальному давлению водорода в камере высокого давления и скорости открытия диафрагмы, при которых не происходит самовоспламенения водорода при его истечении в канал. Также определены минимальные добавки низкоактивных компонентов к водороду для обеспечения бездетонационного режима горения в цилиндре двигателя внутреннего сгорания. Разработанный программный код может использоваться для определения этих пороговых значений для конкретных практических задач при различных условиях. Программный комплекс и полученные количественные данные могут использоваться на предприятиях, производящих и использующих водород.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждена сопоставлением результатов расчета с экспериментальными данными.

Смыгалина А.Е. внесла основной **вклад** в решение задач, поставленных в диссертации, прежде всего в модификацию и адаптацию компьютерного кода, анализу и интерпретации полученных результатов.

По работе имеются следующие **замечания**.

1. Автор пишет в главе 2 (стр. 40), что для определения нижнего концентрационного предела воспламенения водородно-воздушной смеси она будет руководствоваться определением, данным в ГОСТ [61]: “Нижний концентрационный предел распространения пламени (воспламенения) – минимальное содержание горючего вещества в однородной смеси с окислительной средой, при котором возможно распространение пламени по смеси на любое расстояние от источника зажигания”. При этом исследование начинается с решения задачи о самовоспламенении водородно-воздушной смеси, которое реализуется лишь при высокой температуре (более ~ 1000 К при атмосферном давлении). Определенная минимальная концентрация водорода в $\sim 1\%$ для смеси водород-воздух, при которой возможно самовоспламенение смеси при высокой температуре, не имеет никакого отношения к определению нижнего концентрационного предела распространения пламени, данному в ГОСТ. В тексте автор неточна в формулировках, смешивая понятия концентрационного предела воспламенения и концентрационного предела распространения пламени. Например, ссылаясь на работы [62, 64, 65], в которых приводится нижний концентрационный предел распространения пламени в смеси H_2 -воздух при нормальных условиях $\sim 4\%$, автор пишет о концентрационном пределе воспламенения (стр. 40 и 41).

2. Все анализируемые автором кинетические механизмы окисления водорода занижают (до 2 раз) экспериментально измеренную скорость ламинарного пламени для бедных смесей (10-20% водорода в воздухе) (рис. 8). Исходя из целей работы, представляется, что точность предсказания этого параметра очень важна для получения количественных данных о нижнем концентрационном пределе распространения пламени. Кроме того, исходя из рисунка 9б, ни один из рассмотренных механизмов не описывает экспериментальную зависимость [53] скорости ламинарного пламени от давления, которая является немонотонной с максимумом при давлении ~ 2 атм. Совпадение расчетного значения скорости пламени при использовании выбранного автором механизма NUI Galway [30] с экспериментом достигается лишь при атмосферном давлении. В работе эти аспекты не анализируются и не обсуждаются.

Следует также отметить, что рассчитанное давление в цилиндре двигателя при горении водорода или водорода с добавкой 1% H_2O достигает 240 атм (см. стр. 96 и рис. 30). Однако используемый в расчетах кинетический механизм [30, 31] тестировался до давлений 87 атм. Адекватность механизма при более высоком давлении не подтверждена.

Любые экспериментальные измерения имеют погрешность. Поэтому при сравнении расчетов с экспериментом этот факт необходимо учитывать. Если авторы экспериментальных работ приводят погрешность измеренных величин, то ее следует отображать на рисунках. Это позволяет лучше понять степень согласия расчетов эксперименту. По крайней мере, в работе [48], с данными которой автор сравнивает свои расчеты (рис. 4в), такая информация приводится.

3. Время реакции определяется в работе как время от окончания стадии индукции до выхода на стационар профиля температуры (стр. 42). Но это очень общее определение. Так как для сильно обедненных смесей выход температуры на стационарное значение может быть постепенным, то определение времени реакции при таком определении имеет некоторый произвол. Отмечу, что ни один из кинетических механизмов не тестировался по времени реакции (скорости тепловыделения). Не обосновано утверждение на стр. 43, что равенство времени индукции и времени реакции ($\tau_{ind} = \tau_{reac}$) определяет нижний предел экзотермической реакции.

4. Термин – температура “кроссовера” или температура продленного второго предела воспламенения – определен на страницах 43 и 46 по-разному. На стр. 43 температура “кроссовера” определяется из условия равенства $\tau_{ind}(T, C)$ и $\tau_{reac}(T, C)$, а на стр. 46 – из условия равенства скоростей разветвления и обрыва цепи. Но это разные понятия.

5. На рисунках 3 и 7 качественно изображены профили изменения температуры $T_{\text{отн}}$ при воспламенении смесей H_2 -воздух и CH_4 -воздух (рисунок 3) и во фронте пламени смеси природный газ-воздух (рисунок 7). Ни в тексте, ни в подписи к рисункам не описано, что подразумевается под величиной $T_{\text{отн}}$. Поэтому кажется, что изменение температуры изображено некорректно. Во-первых, температура исходной смеси должна иметь ненулевое (как изображено на рисунках), а некоторое конечное значение. Во-вторых, до тех пор, пока концентрации исходных реагентов практически не меняются, а количество компонентов, формирующихся в результате развития цепного процесса, невелико (молярная доля менее $\sim 0.1\%$), температура смеси меняется слабо. При проведении численных расчетов эволюция температуры вычисляется автоматически, поэтому логично было бы представить на рисунках изменение температуры, полученное в расчете. Это позволило бы не только избежать неточностей на рисунках, но и иметь дополнительную информацию об уровне температуры продуктов сгорания.

По работе имеются следующие **рекомендации**.

1. При исследовании воспламенения водорода при его истечении под высоким давлением через раскрывающуюся диафрагму получены новые и интересные результаты. Однако расчеты проведены лишь при одной геометрии, соответствующей эксперименту. С практической точки зрения было бы полезно получить зависимости предельно допустимого давления водорода в камере высокого давления от диаметра и длины канала, в который вытекает водород, а также для ситуации разгерметизации баллона, когда водород истекает не в канал, а в открытое пространство.
2. При анализе и сравнения влияния небольших добавок низкоактивных компонентов (метана, водяного пара или избытка воздуха) на горение водорода в двигателе внутреннего сгорания с искровым зажиганием, на мой взгляд, выбран не совсем подходящий способ включения этих добавок в смесь. В итоге при добавке метана реагирующая смесь оказывается богатой. Сжигание богатой смеси, особенно для энергетики, представляется экономически невыгодным.

Перечисленные замечания не влияют на высокую оценку работы А.Е. Смыгалиной в целом. Численные исследования выполнены на высоком научном уровне, расчеты сопровождаются сравнением с экспериментом, а также способствуют объяснению наблюдаемых в эксперименте эффектов, детально проанализированы и объяснены механизмы развития процесса горения в различных задачах. Полученные результаты обладают новизной и представляют научный и практический интерес.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертационная работа А.Е. Смыгалиной представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г., предъявляемым к кандидатским диссертациям, а её автор, Смыгалина Анна Евгеньевна, заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

Отзыв составил

начальник отдела “Физика неравновесных процессов и физико-химическая кинетика” отделения 600 ФГУП “ЦИАМ им. П.И. Баранова”,
к.ф.-м.н.



25.03.2019.

Титова Наталия Сергеевна

11116, г. Москва, Авиамоторная ул. 2, 8-495-362-90-70, nstitova@ciam.ru

Подпись Н.С. Титовой заверяю:

Ученый секретарь ФГУП “ЦИАМ им.П.И. Баранова”

д.э.н., доцент



Джамай Екатерина Викторовна

11116, г. Москва, Авиамоторная ул. 2, 8-495-361-64-62, secretar@ciam.ru

Федерального государственного унитарного предприятия

“Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова”,

Адрес: Авиамоторная ул. 2, г. Москва, 11116 Россия,

Тел. 8-499-763-61-67

E-mail: info@ciam.ru