

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу Якупова Эдуарда Олеговича «Исследование механизмов формирования пространственно-временных структур, возникающих на движущемся фронте реакции», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика»

Диссертационная работа Якупова Эдуарда Олеговича посвящена решению **актуальной задачи** изучения механизмов формирования структур на поверхности распространяющегося фронта реакции. Автором на основе существующих моделей реагирующих систем с диффузией продемонстрирован принципиальный механизм формирования автоволновых и диссипативных структур на фронте реакции. На основе полной модели, описывающей распространение пламени в водородно-воздушной смеси построена редуцированная модель, позволяющая выделить механизм формирования структур на фронте горения обогащенной водородно-воздушной смеси. Таким образом, диссертационное исследование дает как информацию о фундаментальных особенностях формирования и развития структуры фронта реакции, так и о важных с практической точки зрения особенностях развития структуры фронта горения перспективных водородно-воздушных смесей.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 6 глав, заключения, списка литературы, включающего 104 наименования, 4 приложений. Объем работы составляет 112 страницы, включая 3 таблицы и 40 рисунков.

Во введении сформулированы цель и задачи диссертации, обоснована их актуальность, определены научная новизна, теоретическая и практическая ценность, а также достоверность полученных результатов. Здесь же автор формулирует положения, выносимые на защиту. Представлены личный вклад автора и информация об апробации результатов диссертационной работы. Дана общая структура диссертации.

В первой главе представлен литературный обзор по теме исследования. Представлен обзор основных математических моделей, используемых для описания реагирующих систем с диффузией компонентов.

Во второй главе предложены три модели, позволяющие описать формирование автоволновых структур на движущемся фронте реакции. Каждая модель предполагает иерархию двух подсистем, одна из которых описывает формирование и распространение фронта реакции, а вторая – возникновение автоволновых структур на движущемся фронте. Результаты расчетов согласно предложенным моделям демонстрируют как режимы с распространением кольцевых, так и спиральных волн. Полученные результаты указывают на потенциальную возможность использования предложенного подхода к построению моделей для описания на качественном уровне механизмов формирования и развития структур на фронте реакции.

В третьей главе предложена математическая модель для описания эволюции структуры фронта реакции в трехмерном пространстве. Проведены расчеты, демонстрирующие формирование автоволновых структур, включая кольцевые и спиральные. В ходе параметрического исследования получена граница существования автоволновых структур в терминах скорости и ширины фронта реакции.

В четвертой главе продолжено исследование предложенной выше математической модели в области параметров, определяющих неустойчивость по Тьюрингу. На основе результатов численного моделирования продемонстрировано возникновение диссипативных структур на фронте реакции в исследуемой области параметров. Обсуждаются особенности развития диссипативных структур в зависимости от скорости и ширины фронта реакции.

В пятой главе иерархический подход применен для редукции модели, описывающей горение водородно-воздушной смеси обогащенного состава при повышенном давлении. Построена редуцированная модель, позволяющая воспроизвести процесс формирования и развития структур на фронте распространяющегося фронта горения. В рамках предложенной модели источники формирования автоволновых структур на фронте горения сосредоточены внутри низкотемпературного слоя. На основе численного моделирования продемонстрированы устойчивые режимы с формированием автоволновых спиральных возмущений и неустойчивые с разрушением спиральной и переходом к более сложной пространственно-временной структуре.

В шестой главе представлены результаты численного моделирования по предложенной в пятой главе модели при варьировании параметров системы. Показано, что в области параметров, соответствующих условиям эксперимента, возможен переход от решения с автоволновыми колебаниями к решению с возникновением ячеистых (тьюринговских) структур. Представлено многообразие морфологии ячеистых структур.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

Научная новизна диссертационной работы определяется новым подходом к описанию механизмов формирования автоволновых и диссипативных структур на фронте реакции. В частности, впервые предложена редуцированная модель, позволяющая исследовать механизм формирования структур на фронте горения обогащенной водородно-воздушной смеси. С использованием предложенной модели получены новые данные о механизме формирования ячеистых структур на фронте горения.

Научная и практическая значимость работы. Результаты, полученные Якуповым Э.О. и представленные в диссертационной работе, расширяют представления о механизмах формирования и развития автоволновых и диссипативных структур на фронте реакции. Это, в частности, позволяет корректно интерпретировать причины возникновения структур на фронте горения газовых смесей и является основой для разработки методов стабилизации горения. Так, предложенная на основе проведенного исследования редуцированная модель эволюции структур на фронте горения обогащенной водородно-воздушной смеси позволяет обосновать механизм зарождения неустойчивости пламени в такой смеси, что, в свою очередь, является фундаментальной основой для создания системы стабилизации пламени. Полученные автором научные результаты могут быть использованы для решения широкого круга фундаментальных и прикладных задач в таких научных центрах как ОИВТ РАН, ФИЦ ХФ им. Н.Н. Семенова РАН, ЦИАМ им. П.И. Баранова, ИТПМ им. С.А.Христиановича СО РАН, ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН и др.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях.

Публикации. Результаты работы изложены в 6 научных работах, опубликованных в рецензируемых научных изданиях. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертационной работы.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

В ходе рассмотрения текста диссертации возникли следующие **вопросы и замечания**:

- 1) В тексте встречается термин «слой пламени», по всей видимости это опечатка, и следует говорить о «фронте пламени».
- 2) Одним из ключевых элементов исследуемых в диссертации моделей является уравнение связи, однако в тексте отсутствует четкое пояснение, почему выбран именно рассматриваемый вид уравнения связи. Следует дать пояснение. Также следует пояснить отличие между уравнениями связи (2.2) и (2.4).
- 3) При анализе результатов расчетов по предлагаемым моделям не уделяется внимание ширине фронта реакции, в частности изменяется ли она в течение времени, если изменяется, то каким образом и влияет ли это как-то на динамику автоволновых структур. В частности, на с. 28 автор говорит об «узком фронте», и необходимо пояснение, какой фронт можно считать узким, а какой нет в терминах параметров используемой модели.
- 4) Говоря о пределах существования кольцевых структур упускается из виду возможная зависимость конкретного значения предела от параметров источника колебаний. Если это исследовалось, то желательно дать комментарий по этому поводу.
- 5) Из каких соображений в главе 5 выбрана модель кинетики горения Варнатца? За прошедшие более чем 30 лет построены и многократно апробированы более точные модели кинетики горения водорода, и, несмотря на качественно те же базовые механизмы, количественные данные более современными моделями воспроизводятся с большей степенью точности.
- 6) На рисунке 5.1 виден небольшой прирост концентрации молекулярного кислорода в области преднагрева, с чем это связано?
- 7) На с. 64 не очень понятен тезис «распределение интенсивности, связанное с радикалом Н, находится в области температур выше 1000 К». По всей видимости, речь идет об области, где идет основная наработка радикала Н, но в таком случае, не понятен выбор отсечки по температуре в 1000 К.
- 8) с. 81, насколько корректно в данном конкретном случае, на рассматриваемой стадии процесса говорить о переходе к хаотическим структурам? Какой критерий перехода к хаосу использовался автором?
- 9) В тексте имеются опечатки и неточности в обозначениях и формулировках.

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертации. Диссертация содержит новые результаты, имеющие практическую и научную значимость для решения актуальных задач физики горения газообразных топлив, включая задачу устойчивого горения водородно-воздушных смесей. Диссертация Якупова Э.О. является законченным исследованием. Стиль изложения материала ясный. Диссертация содержит достаточное количество качественных иллюстраций и результатов расчетов в графической форме, что позволяет разобраться во всех нюансах работы. Достоверность результатов обуславливается использованием в работе традиционных математических моделей и зарекомендовавших себя численных методов.

Таким образом, диссертационная работа Якупова Э.О. «Исследование механизмов формирования пространственно-временных структур, возникающих на движущемся

фронте реакции» полностью соответствуют паспорту специальности 1.3.3 – «Теоретическая физика» и всем критериям «Положения о присуждении ученых степеней», предъявляемых к диссертациям на соискание степеней кандидата физико-математических наук. Считаю, что ее автор заслуживает присуждения искомой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент:

доктор физико-математических наук по специальности 01.04.14 - Теплофизика и теоретическая теплотехника, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), г. Москва

 Киверин Алексей Дмитриевич

22.04.2025

Адрес: 125412, г. Москва, Ижорская улица, 13, к. 2.

Электронная почта: alexeykiverin@ihed.ras.ru

Телефон: +7 (495) 485-9009

Подпись Киверина Алексея Дмитриевича и сведения заверяю.
Заместитель директора ОИВТ РАН,

 Иванова Нина Николаевна

Ряд научных работ по теме рассматриваемой диссертации:

1. Kiverin, A.D. Dynamic loads induced by near-limit turbulent hydrogen-air combustion inside a confinement / A.D. Kiverin, K.S. Melnikova, I.S. Yakovenko // *Process Safety and Environmental Protection*. – Vol. 189. – P. 728-735.
2. Kiverin, A. Three-dimensional structure of freely-propagating flame prior to deflagration-to-detonation transition / A. Kiverin, I. Medvedkov, I. Yakovenko, V. Bykov // *Acta Astronautica*. – 2023. – Vol. 204. – P. 686-691.
3. Yakovenko, I. Numerical Modeling of Hydrogen Combustion: Approaches and Benchmarks / I. Yakovenko, A. Kiverin // *Fire*. – 2023. – Vol. 6, No. 6. – P. 239.
4. Яковенко, И. С. Структура и динамика фронта горения обедненной водородно-воздушной смеси в проточном реакторе / И. С. Яковенко, И. С. Медведков, А. Д. Киверин // *Химическая физика*. – 2022. – Т. 41, № 3. – С. 85-90.
5. Киверин, А. Д. О роли локальных эффектов в развитии горения / А. Д. Киверин, И. С. Яковенко // *Физика горения и взрыва*. – 2022. – Т. 58, № 3. – С. 32-39.