

Отзыв

официального оппонента на диссертацию Кабилова Маруфа Махмудовича «МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ И ИХ УСТОЙЧИВОСТИ», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Исследование внутренних течений и волн горения в реагирующих пористых средах является актуальным, поскольку эти объекты широко используются в технологических устройствах и энергетических установках. Большое значение придается поискам способов управления, предотвращения развития и реализации нежелательных режимов, а также стабилизации процессов.

Задачи внутренних течений и горения газа внутри пористых сред изучались ранее как теоретически, так и экспериментально. Одним из основных вопросов, определяющих критические условия воспламенения, горения и срыва пламени является вопрос устойчивости. Несмотря на большое число работ в этой области, проблема стабилизации пламени в различных гидродинамических режимах при наличии тепловых и силовых взаимодействий фаз и химических реакций, описываемых аррениусовскими зависимостями, не является полностью изученной и остается актуальной. Это обосновано изложено автором во Введении, где приведена классификация стационарных режимов фильтрационного горения газов и отмечены основные проблемы и подходы к изучению их устойчивости. Соответственно, автором диссертации выделены и сформулированы основные цели и задачи исследования, связанные с теоретическим и численным анализом устойчивости двух низкоскоростных режимов фильтрационного горения в рамках моделей реагирующих гетерогенных сред.

Все исследования автора проведены на основе теоретического анализа моделей фильтрационного горения, включая параметрический анализ, рассмотрение асимптотических приближений, исследование предельных случаев, качественный характеристический анализ определяющей системы уравнений, а также численные расчеты.

Основной материал диссертации изложен в пяти главах, дополнительные материалы, иллюстрирующие расчетные данные приведены в Приложении.

Первая Глава диссертации является вводной. Выполнен обширный обзор литературы с перечислением подходов и анализом сопутствующих физических процессов, влияющих на воспламенение и горение в пористых средах. Сформулированы теоретические основы и описана методология исследований, проведен анализ рассмотренных в литературе задач и перечислены нерешенные на настоящее время проблемы,

составляющие предмет исследования в диссертации. В частности, установление связи между скоростью распространения волны фильтрационного горения газов (ФГГ), температурой (или градиентом температуры) среды, концентрацией недостающего компонента, порядком реакции; определение критериев воспламенения в адиабатических и неадиабатических режимах. Акцент сделан на применение аналитических методов, в частности, метода малых возмущений, преобразований Фурье и Лапласа, применения дельта-функции Дирака, бифуркационный анализ. Кроме этого, предусмотрена реализация эффективных численных методов.

Во второй Главе приведены основные уравнения механики гетерогенных сред в двухскоростном двухтемпературном приближении с учетом объема, занимаемого твердой (пористой) средой и ее деформации, замыкающие соотношения (уравнения состояния, обобщенный закон Гука, выражения для тепловых потоков и теплообмена фаз). Представлена система обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающая стационарные волны фильтрационного горения, и первые интегралы этой системы. Рассмотрены предельные случаи и аналитически приближенные модели, проведен качественный анализ системы ОДУ.

В третьей Главе анализируются стационарные уравнения ФГГ с учетом диффузии компонентов газа. Обезразмеривание системы и анализ позволили получить условие подобия профилей концентрации, компонентов газа и температуры среды (в условиях быстрого теплового равновесия). Получена аналитическая формула, связывающая равновесную температуру и коэффициент диффузии, получена аналитическая зависимость температуры воспламенения от параметров инертной пористой среды и критерий воспламенения смеси газов при теплопотерях. Получено аналитическое решение задачи теплового воспламенения в инертной пористой среде.

Четвертая Глава посвящена численному исследованию структуры стационарной волны ФГГ. Задача сводится к решению краевой задачи для системы ОДУ, которая решалась методом, тестированным на задаче с известным аналитическим решением. Анализ структуры волны ФГГ проведен для различных режимов (адиабатический, неадиабатический, с переменной и постоянной плотностью смеси).

В пятой Главе проводится анализ устойчивости стационарной волны ФГГ по отношению к продольным и пространственным возмущениям. Для продольной неустойчивости получено характеристическое уравнение и определены критерии как в случае отсутствия теплопотерь в окружающее пространство, так и с их учетом. Получены аналитические формулы, связывающие характеристики горения со скоростью подачи смеси газов в предельном случае колебательного режима горения. Проанализирована диффузионно-

тепловая неустойчивость стационарной волны фильтрационного горения, определены границы колебательной устойчивости, установлены определяющие параметры устойчивости стационарной волны ФГГ. Показаны качественные различия в чувствительности продольных и пространственных возмущений. Проанализирована пространственная неустойчивость стационарной волны ФГГ при аппроксимации скорости химической реакции ступенчатой функцией. Получены аналитические зависимости для скорости волны и ширины зоны прогрева. В рамках равновесной по температурам модели получены условия пространственной устойчивости волны ФГГ при теплопотерях. С применением математического формализма преобразования Фурье и Лапласа к задаче об устойчивости ФГГ получена связь между параметрами потока на пределе горения, что позволило определить предельную концентрацию горючего вещества. Также изучены процессы ФГГ в пористой среде методами бифуркационного анализа. На основе математических преобразований получены дифференциальные уравнения и приближенные аналитические решения для критических параметров, определяющих устойчивость ФГГ.

В последующих разделах диссертации сформулированы основные результаты работы и вытекающие из результатов практические рекомендации. В разделе Выводы представлено обобщение и научная значимость теоретических положений, полученных в диссертации.

Достоверность результатов диссертации обусловлена следующим.

1. Исследования основаны на применении общепринятых устоявшихся моделей механики реагирующих гетерогенных сред с корректным описанием процессов химических и межфазных взаимодействий.
2. Все теоретические результаты получены путем строгих математических преобразований с соблюдением всех правил логики и обеспечением точности формул.
3. Методы численного расчета тестируются на задачах, имеющих аналитическое решение.
4. Полученные результаты согласуются с известными теоретическими представлениями и имеющимися в литературе экспериментальными данными.

Новизна результатов диссертации

В диссертации получен ряд новых научных результатов, касающихся определения скорости волны ФГГ при различных физических свойствах среды (диффузии, концентрационной неоднородности). Получены аналитические формулы для температуры воспламенения в зависимости от параметров среды и сформулированы критерии инициирования для ряда случаев. Получены аналитические

критерии продольной и пространственной устойчивости фронта ФГГ. Продемонстрировано применение теории бифуркаций для анализа колебательного режима распространения фронта ФГГ.

Положительные стороны диссертации.

1. В работе глубоко и всесторонне изучены режимы фильтрационного горения газов, находящиеся на пределе устойчивости. Приведено детальное описание для каждого из большого числа рассмотренных предельных и общих случаев (различных режимов теплового взаимодействия, структуры пористой среды, характеристик реакции).
2. Применение точного математического аппарата позволило получить аналитические зависимости характеристических параметров процесса, которые определяют качественное поведение (переход от одного режима к другому, развитие неустойчивости и т.д.) и могут дать оценку количественным характеристикам.
3. Материал диссертации изложен достаточно обстоятельно. Все математические выкладки приведены последовательно и в полном объеме. Результаты являются достаточно общими, так как представлены в безразмерных величинах.
4. Для ряда предельных случаев представлены простые формулы, которые могут быть использованы для верификации численных методик и для оценок в инженерных расчетах.

Замечания и недостатки диссертации.

1. Ряд теоретических результатов получен при ограничивающих условиях, позволяющих внести упрощения в уравнения, или принять асимптотические приближения. При этом обсуждение физических обоснований таких приближений не представлено в полном объеме. В частности, не приведено конкретных примеров реализаций условий, например, равенства молекулярных весов исходной смеси и продуктов сгорания; возможности аппроксимации скорости химической реакции ступенчатой функцией, свойства подобия профилей температур и концентраций.
2. В параграфе 2.7. не приводятся основания выбора конкретного вида экспоненциально-полиномиальных функций для аппроксимации температурных зависимостей.
3. В Главе 3 сформулирован критерий подобия профилей температуры и концентрации среды в безразмерных переменных. Полезно было бы представить данный критерий с учетом размерных параметров и дать физическую интерпретацию условий его выполнения. Также повышению

достоверности способствовало бы подтверждение этого критерия численным расчетом профилей температур и концентраций.

4. Раздел 4.5, касающийся комплексов программ расчета, изложен недостаточно обстоятельно и не дает полного представления об используемых алгоритмах.
5. В разделе 5.2 в описании рисунка 5.2.1 отсутствует информация, каким образом получено численное решение, представленное на рисунке.
6. В разделе 5.4 не указано, для каких параметров газовой смеси и пористой среды получены результаты на рис. 5.4.1 – 5.4.5.
7. Значительное число расчетных данных представлено в Приложениях, однако в тексте диссертации нет ссылок на эти результаты, и нет указаний, к каким разделам они относятся.
8. В тексте диссертации имеется ряд опечаток, орфографических ошибок и отклонений от стандартного форматирования текста и формул, которые, однако, не препятствуют пониманию материала.

Указанные замечания не снижают общей положительной оценки, которую заслуживает диссертационная работа Кабилова М.М.

Научная и практическая значимость результатов

Сформулированные в диссертации положения и выводы расширяют и дополняют теорию распространения волн ФГГ и содержат данные, улучшающие понимание механизмов развития неустойчивости. Результаты могут быть применены в практике для разработки способов управления процессами горения в пористых средах. Полученные для ряда предельных случаев простые формулы могут быть весьма полезными для предварительных оценок и в инженерных расчетах аналогичных процессов.

Результаты диссертации опубликованы в 38 работах в журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан и ВАК при Министерстве науки и высшего образования РФ. Результаты прошли апробацию на множестве всероссийских и международных научных конференций.

Диссертация соответствует паспорту специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ (разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений; развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей; реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента).

Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

С учетом всего вышесказанного, считаю, что работа Кабилова Маруфа Махмудовича «Математическое моделирование стационарных волн фильтрационного горения газов и их устойчивости» соответствует всем критериям, предъявляемым ВАК при Президенте Республики Таджикистан к диссертациям на соискание ученой степени доктора физико-математических наук. Автор работы Кабилов Маруф Махмудович заслуживает присуждения ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Хмель Татьяна Алексеевна

«25» апреля 2023 г.

Организация – место работы: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория 12

Должность: Ведущий научный сотрудник

Почтовый адрес: 630060, г. Новосибирск, ул. Лесосечная, д. 5, кв. 144.

Телефон: 8(923)158-93-45

Адрес электронной почты: khmel@itam.nsc.ru

Web-сайт организации: <http://www.itam.nsc.ru>

Подпись и сведения заверяю
Ученый секретарь ИТПМ СО РАН

К.ф.-м.н.

Кратова Юлия Владимировна

