«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Физико-технического института им. С.У. Умарова Национальной академии наук Таджикистана

_____ Ф. Шокир

«05» 05 _____2023 г.

Отзыв ведущей организации

на диссертацию Кабилова Маруфа Махмудовича по теме «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»

Актуальность темы диссертации. Изучение фильтрационного горения газов (ФГГ) вызвано практической и теоретической необходимостью. С её позиции изучены и объяснены явление прогорания огнепреградителей, разработаны горелочные устройства нового поколения и химические реакторы с тепловыми волнами. Современные горелочные устройства основаны на принципах ФГГ и имеют многосекционные конструкции. Такой подход позволяет исследовать и оптимизировать функции горелки: химическое превращение, стабилизацию пламени, устойчивость горения, выход радиационного потока и др. – раздельно, что в свою очередь позволяет сделать горелочное устройство наиболее отвечающим требованиям потребителя. Сфера использования таких горелок очень широк: горелки для печей, сушилок, отопления жилищ и других помещений, печи для обжига руд, кирпича, керамики, варки стекла, силикатных материалов, и многое другое. Наряду с этими возможностями, ФГГ привлекает внимание исследователей и с научной точки зрения, рассматривая разные виды горения, как частные случаи более

общих волновых процессов. При математическом описании процесса ФГГ в уравнениях учитывается лишь экзотермическая реакция смеси и связанное с ней выделение энергии. В случае достаточно интенсивного межфазного теплообмена, различием температур газа и пористого скелета можно пренебречь, тогда из уравнения ФГГ, в частности, можно получить уравнения гомогенного горения газов, горения конденсированных веществ и др. Поэтому исследуя модель ФГГ, также выявляется закономерности распространения волн реакции при горении различных веществ. Различие возникает при переходе к двухтемпературной структуре волны, когда температура газа существенно различается от температуры частиц твёрдой фазы в силу малой теплопроводности газовой фазы по сравнению с теплопроводностью каркаса.

На данном этапе существуют различные классификации стационарных режимов фильтрационного горения газов, например, скоростная классификация В.С.Бабкина, скоростные режимы с учётом давления на фронте волны горения Г.А.Лямина с коллегами и режимы со значимыми характеристиками К.В.Добрего, С.А.Жданок. По классификации В.С.Бабкина существует шесть основных стационарных режимов ФГГ, два из них соответствуют режимам низких скоростей (скорость распространения волны изменяется от 10^{-6} м/с до 10^{-1} м/с): режим низких скоростей, реализуемый в пористой среде с диаметром пор меньше критического; режим низких скоростей 2 (два) с диаметром пор больше критического. Диссертационное исследование относится изучению свойств именно этих режимов. Изучение физических характеристик волн в этих режимах крайне важно для практики изготовления горелочных устройств современного типа, где используются иные способы локализации пламени в пористых телах, по сравнению с традиционным способом (стабилизация пламени на границе пористое тело – внешняя среда).

Исследованию указанных режимов горения посвящено достаточное количество теоретических работ, к которым предшествовала работа о тепловом самовоспламенении гомогенной газовой смеси в потоке. Но в этих работах, некоторые вопросы ФГГ с позиции классической теории горения изучены

недостаточно, к чему посвящена диссертационная работа. Например, определение соотношения для скорости распространения фронта фильтрационного горения газов методами Я.Б.Зельдовича и Д.А.Франк-Каменецкого (связь температуры и концентрации), А.П.Алдушина и А.Г.Мержанова, Б.В.Новожилова (связь градиента температуры и концентрации). Определение влияния порядка скорости химической реакции по недостающему компоненту на характеристики волны ФГГ по модели А.Г.Мержанова и А.К.Филоненко. Учёт явления диффузии по диффузионному приближению Р.И.Нигматулина и метода аппроксимации профилей температур и концентрации различными функциями в различных зонах структуры волны по Н.Н.Смирнову и И.Н.Звереву. Исследование структуры стационарной волны ФГГ по методу пристрелки Я.Б.Зельдовича и др. Определение критерия воспламенения смеси газов подходами: Я.Б.Зельдовича, И.Г.Ассовского, П.К.Сеначина, В.И.Бабушок и др. Моделирование продольной и пространственной устойчивости стационарных волн ФГГ в адиабатическом и неадиабатическом режиме с помощью метода малых возмущений, подходами: Г.И.Баренблатта, Я.Б.Зельдовича и А.Г.Истратова, Г.М.Махвиладзе и Б.В.Новожилова, К.Г.Шкадинского и Б.И.Хайкина, К.Г.Шкадинского, Б.И.Хайкина и А.Г.Мержанова, В.С.Бермана и В.Н.Курдюмова, Б.Дж.Матковского и Г.И.Сивашинского. Определение условия устойчивости стационарной волны ФГГ с применением преобразования Фурье и Лапласа на линеаризованное, обобщённое уравнение тепла и метода бифуркации на пульсирующий фронт ФГГ по Б.Дж.Матковскому и Г.И.Сивашинскому.

Оценка содержания диссертации. Диссертационная работа М.М.Кабилова состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, обсуждения полученных результатов, рекомендации по практическому использованию результатов, выводов, пяти приложений, списков литературы и иллюстраций. Работа представлена на 274 страницах, содержит 302 библиографических ссылок.

Во введении приведены актуальность темы исследования, степень научной разработанности изучаемой проблемы и связь работы с перспективными темами.

В части **общая характеристика работы приводятся** цель и задачи исследования, объект и предмет исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость исследования, основные положения, выносимые на защиту, степень достоверности результатов, соответствие диссертации паспорту специальности, личный вклад автора в исследовании, апробация полученных результатов, публикации по теме диссертации, структура диссертации.

Первая глава посвящена обзору литературы по фильтрационному горению и устойчивому распространению волны горения в различных средах.

Первые четыре параграфа **второй главы** посвящены основным нестационарным и стационарным одномерным уравнениям сохранения энергии, массы, их первым интегралам, уравнению состояния газовой фазы, а также постановке задачи фильтрационного горения газов в инертной недеформируемой пористой среде. В последующих четырёх параграфах главы из математической модели ФГГ (в адиабатическом режиме) выводятся соотношения параметров, чтобы произвести расчёт скорости стационарной волны ФГГ. В **пятом** параграфе рассматривается однотемпературная модель, что предполагает равенства температур фаз. Между градиентом температуры системы (пористая среда + смеси газов) и концентрации реагирующего компонента смеси газов находиться связь, которая используется в уравнении энергии, чтобы получить соотношение параметров. Соотношение для расчёта скорости волны получено методом Б.В.Новожилова (для конденсированных сред). В **шестом** параграфе рассматривается конечный межфазный теплообмен, что означает различие температур фаз и находиться связь между градиентом температуры твёрдой фазы и концентрации недостающего составляющего смеси. В **седьмом** параграфе рассматривается аналитически приближенная модель структуры стационарной волны ФГГ, то есть приближённая модель

структуры волны описываются функциями (полиномиальными и экспоненциальными) известными в математике. В **восьмом** параграфе главы изучается, поведение системы дифференциальных уравнений в особых точках с учётом затухающей химической реакции в конечной части волны.

Третья глава посвящена подобию профилей температуры пористой среды и концентрации компонентов смеси газов, температурам инициирования химической реакции, а также аналитическому решению задачи теплового воспламенения смеси газов в инертной пористой среде. В **первом** параграфе главы приводится модель ФГГ, которая включает уравнения баланса тепла в твёрдой и газовой фазах, уравнения баланса массы составляющих газовой смеси и уравнение состояния газа в предположении постоянства давления. Во **втором** параграфе из обезразмеренной системы получены критерии подобия профилей температуры пористой среды и концентрации компонентов газа, а также их линейные зависимости. В **третьем** параграфе для скорости стационарной волны получено соотношение (интегрированием уравнения энергии) учитывающие коэффициенты диффузии компонентов газа в виде чисел Льюиса. Интеграл энергии берётся в предположении, что тепловая энергия выделяется в узкой зоне, а функции температуры и концентрации, входящие в скорость химической реакции, берётся из решения задачи в области прогрева. Кроме того, для аррениусовской функции используется преобразование Д.А.Франк-Каменецкого. В последующих параграфах главы изучается тепловое воспламенение реакционной смеси. В частности, в **четвёртом** параграфе на основе двухтемпературной модели воспламенения смеси газов получены различные формулы определения температуры инициирования химической реакции, соответствующие случаям распространения волны ФГГ. Для температуры пористой среды, при которой воспламеняется смеси газов в порах пористой среды получена формула, а также зависимости температуры пористой среды, смеси газов и доли недостающего компонента смеси от времени и координат. В **пятом** параграфе получено соотношение для определения температуры инициирования химической

реакции в порах пористой среды. Это соотношение, найдено исходя из однотемпературной и одномерной модели распространения стационарной волны ФГГ в неадиабатическом режиме. В **шестом** параграфе анализ модельной задачи воспламенения в двухтемпературной постановке проводится в предположении, что зона горения является поверхностью разрыва и решения в областях прогрева и внутренней релаксации сшиваются. Кроме того, на этом параграфе приведены различные графики температуры пористой среды и смеси газов в момент инициирования волны химической реакции, а также максимальной и равновесной температуры в зависимости от состава смеси, диаметра частиц и теплопроводности пористой среды. **Седьмой** параграф этой главы посвящён аналитическому решению математической модели теплового воспламенения смеси газов в инертной пористой среде. Решение зависящие от времени и продольной координаты, представляющие собой профили температур газа, пористой среды и недостающего компонента смеси найдены вдоль характеристик. При этом определено соотношение для скорости стационарной волны ФГГ.

В **четвёртой главе** анализируется численные расчёты профилей температур фаз и зависимости скорости волны, максимальной температуры и ширины различных участков волны от параметров пористой среды, и газа. **Первый и второй** параграфы главы посвящены расчёту и анализу характеристик волны для водородо-воздушной смеси газов. В **третьем** параграфе произведены расчёты характеристик волны для метано-воздушной смеси. Проведён анализ изменения кривых зависимостей скорости волны, наиболее высокой температуры газа и толщины различных участков в структуре волны от параметров. В **четвёртом** параграфе главы приводится результаты расчётов характеристик волны, произведённые по моделям с переменной и постоянной плотностью смеси газов. **Пятый** параграф главы посвящён комплексам программ расчёта характеристик и структуры стационарной волны фильтрационного горения газов.

В **пятой** главе изучается продольная и пространственная устойчивости стационарной волны ФГГ по отношению к малым тепловым возмущениям. В **первом** параграфе главы приводится математическая постановка задачи устойчивости стационарной волны по отношению к малым пространственным возмущениям. Во **втором** параграфе главы исследуется продольная устойчивость стационарной волны ФГГ. В **третьем** параграфе предпринято теоретическое исследование влияния теплоотвода на продольную устойчивость стационарных волн ФГГ с целью нахождения зависимости параметров на границе устойчивости. **Четвёртый** параграф посвящён расшифровке аналитических зависимостей параметров на пределе ФГГ. В **пятом** параграфе главы изучается теплодиффузионная устойчивость стационарной волны в рамках подхода, где скорость химической реакции аппроксимируется δ-функцией. В **шестом** параграфе рассматривается пространственная устойчивость стационарной волны ФГГ по отношению к малым тепловым возмущениям при аппроксимации скорости химической реакции кусочно-постоянной функцией. В **седьмом** параграфе главы изучается пространственная устойчивость стационарных волн ФГГ по отношению к малым возмущения при теплопотерях в окружающее пространство и пренебрежением диффузии недостающего компонента. В **восьмом** параграфе главы в результате применения преобразования Фурье и Лапласа к обобщённому линеаризованному уравнению баланса тепла получено условие устойчивости фронта горения в неадиабитическом режиме. В **девятом** параграфе соотношение параметров на границе устойчивости получено на основе подхода Я.Б.Зельдовича, что максимальная температура пламени, соответствующая критическому значению теплоотвода, отличается от адиабатической температуры на один характерный интервал. В **десятом** параграфе нелинейная устойчивость стационарной волны ФГГ изучается методом бифуркации.

Новизна полученных результатов. Все научные результаты, полученные в диссертации, являются новыми. Наиболее важными среды них являются – обоснование применения метода Б.В.Новожилова для определения

скорости волны ФГГ; разработка нового подхода определения скорости стационарной волны ФГГ; обоснование приближенно аналитического описания структуры стационарной волны ФГГ; разработка нового метода учёта диффузии компонентов газа в определение скорости волны ФГГ; определение аналитических зависимостей температуры инициирования химической реакции от параметров пористой среды и смеси газов; нахождение нового аналитического решения модельной задачи ФГГ вдоль характеристик; подтверждение критерии инициирования химической реакции при теплоотводе из зоны горения при ФГГ; обоснование эффективного численного метода исследования структуры стационарной волны ФГГ; обоснование однотемпературной математической модели ФГГ, в частности, описывающая горение конденсированных сред и теплодиффузионное горение газа без пористой среды; получение формулы максимальной температуры пористой среды при наличии теплопотерь и вдува смеси; обоснование критерии продольной и пространственной устойчивости фронта ФГГ, а также применение теории бифуркации к пульсирующему фронту ФГГ.

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Все результаты получены аналитическим способом, на основе апробированных уравнений сохранения энергии и масс с помощью выкладок, преобразований, аналогий и, в частности, подтверждают теоретические и экспериментальные выводы и соотношений, существующие в научной литературе. Достоверность и новизна полученных автором результатов не вызывает сомнений. Результаты диссертационной работы были доложены на международных научных конференциях по горению. Они опубликованы в 71 публикациях в научной печати, в том числе 38 публикаций в журналах из перечня рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан, в которых отражены материалы диссертации.

Теоретическая и практическая значимость полученных автором результатов. Теоретическая значимость исследования заключается в нахождении – связи градиента температуры с концентрацией реагирующего

компонента газа; условия симметричности профилей температуры и концентрации компонентов газа и их зависимости; функциональной зависимости температуры инициирования химической реакции от параметров; аналитического решения модельной задачи ФГГ вдоль характеристик; критерия инициирования химической реакции при теплоотводе из зоны горения при ФГГ; условия продольной устойчивости фронта фильтрационного горения газов, в частности, аппроксимирующего пульсирующий режим горения конденсированных сред; условия пространственной диффузионно-тепловой устойчивости фронта фильтрационного горения газов; разложения характеристик волны по малому параметру и оценка средних значений величин.

Практическая ценность работы определяется тем, что полученные результаты необходимы и будут использованы при формулировке способов повышения надёжности огнепреградителей и рекомендации об устойчивости фронтов фильтрационного горения газов, конденсированных сред и горения смеси газов без пористой среды.

Соответствие автореферата основному содержанию диссертации.

Диссертация и автореферат оформлены в соответствии с основными существующими требованиями. Автореферат отражает основное содержание диссертации.

Замечания по содержанию и оформлению диссертации и автореферата.

К недостаткам диссертации можно отнести следующие:

– можно было объединить некоторые параграфы диссертации под едиными обобщающими названиями, к примеру, параграфы 1.2-1.4, 2.4-2.5, 3.1-3.2, 3.5-3.7, 4.3-4.5, 5.1-5.2, 5.6-5.7, 5.8-5.10.

– в оглавлении, а также в названии параграфов диссертации обозначение ФГГ (фильтрационное горение газов) используется наряду с полным названием;

– страницы некоторых глав и параграфов не соответствуют указанным в оглавлении (см., например, главу 3 и её параграфы);

– список литературы диссертации оформлен с техническими опечатками. Также для лучшего обзора следовало бы отделить авторский список публикаций.

К недостаткам автореферата можно отнести следующие:

– в автореферате диссертации следовало бы привести также соответствующие формулы и иллюстрации, отражающие основные сведения об объекте исследования и полученных результатах;

– в списке авторских публикаций русской части автореферата не приведены сведения о монографии.

Но, следует отметить, что все указанные замечания носят технический характер и не влияют на научную ценность и новизну проведённых исследований диссертационной работы.

Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным «Положением о присуждении учёных степеней»

Вышеизложенное даёт основание считать, что диссертационная работа Кабилова М.М. «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», является научно-квалификационной работой и полностью соответствует требованиям ВАК при Президенте Республики Таджикистан, предъявляемым к диссертациям на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по вышеуказанной специальности.

М.М. Кабилов выступил с докладом по материалам диссертации на общеинститутском семинаре Физико-технического института им. С.У.Умарова Национальной академии наук Таджикистана 03 мая 2023 года.

Отзыв подготовил заведующий лабораторией физики атмосферы, доктор физико-математических наук Сабур Фузайлович Абдуллаев. Отзыв был заслушан, обсуждён и утверждён на расширенном заседании научного семинара Физико-технического института им. С.У.Умарова НАНТ от «03» мая 2023 года, протокол №5.

Председатель заседания,
заместитель директора по научно-учебным делам,
кандидат физико-математических наук Холмуродов Ф.

Эксперт,
доктор физико-математических наук
заведующий лабораторией физики атмосферы Абдуллаев С.Ф.

Секретарь заседания,
кандидат физико-математических наук
ведущий научный сотрудник Юнусова С.

Сведения об оппонирующей организации:
Физико-технического институт им. С.У. Умарова
Национальной академии наук Таджикистана
734063, Республика Таджикистан,
г. Душанбе, пр. Айни 299/1,
Тел. +(992 37) 2258084;
E-mail: admin@phti.tj
Сайт: https://www.phti.tj

Подписи Холмуродова Ф., Абдуллаева С.Ф., Юнусовой С.
заверяю.

Заведующая ОК ФТИ имени С.У.Умарова НАНТ Ёрова М.