

**ТАДЖИКСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ**

УДК 536.46

*На правах рукописи*



Кабиров Маруф Махмудович

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ ВОЛН  
ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗОВ И ИХ УСТОЙЧИВОСТИ**

**Автореферат**

диссертации на соискание учёной степени  
доктора физико–математических наук по специальности 05.13.18 –  
Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ

Душанбе - 2023

Работа выполнена на кафедре информатики и информационных технологий  
МОУ ВО «Российско-Таджикский (Славянский) университет»

Научный консультант: **Нигматулин Роберт Искандерович**  
академик РАН, доктор физико-математических наук, профессор, Врио научного руководителя ФГБУН «Институт океанологии им. П.П. Ширшова Российской академии наук», г. Москва

Официальные оппоненты: **Хмель Татьяна Алексеевна**  
доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, ФГБУН «Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича» СО РАН, г. Новосибирск  
**Комилиён Файзали Саъдулло**  
доктор физико-математических наук, профессор кафедры информатики Таджикского национального университета  
**Исхоков Сулаймон Абунасрович**  
доктор физико-математических наук, член-корр. НАНТ, заместитель директора по науке и учебной работе Института математики им. А.Джураева НАНТ

Ведущая организация: Физико-технический институт имени С.У.Умарова Национальной Академии наук Таджикистана

Защита состоится 31 мая 2023 года 14-00 часов на заседании диссертационного совета 6D.КOA-011 на механико-математическом факультете Таджикского национального университета по адресу: 734027, г.Душанбе, ул.Буни-Хисорак, корпус 17, аудитория 203

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной библиотеке Таджикского национального университета и на сайте [www.tnu.tj](http://www.tnu.tj)

Автореферат разослан \_\_\_\_ \_\_\_\_ 20 \_\_\_\_ года

Учёный секретарь диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



Нуров И.Дж.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы исследования.** Фильтрационное горение газов (ФГГ) это процессы распространения зоны газофазовой экзотермической реакции в инертной пористой среде при фильтрационном подводе газообразных реагентов к зоне химического превращения. ФГГ входит в состав сравнительно новой области теории горения под названием фильтрационное горение (ФГ). Изучение 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. Горелки с пористой средой характеризуются более высокими скоростями горения, повышенной стабильностью пламени и более низкими температурами в зоне горения, что приводит к уменьшению образования  $\text{NO}_x$ . Традиционные пористые горелки односекционные, то есть состоят из одного слоя пористого тела. Этот слой обеспечивает сгорание горючей смеси, стабилизацию и устойчивость зоны горения, полноту выгорания и др. Современные горелочные устройства основаны на принципах ФГГ и имеют многосекционной конструкции. Такой подход позволяет исследовать и оптимизировать функции горелки: химическое превращение, стабилизацию пламени, устойчивость горения, выход радиационного потока и др. – отдельно, 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 выявляем 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. Этот вид горения считается малоизученным видом гетерогенного горения. К такому виду, ФГГ относятся не по типу химической реакции, а вследствие активного участия в механизме распространения волн горения одновременно двух фаз - твёрдой пористой среды и реагирующего газа. На данном этапе существуют различные классификации стационарных режимов фильтрационного горения газов, например, скоростная классификация В.С. Бабкина<sup>1</sup>, скоростные режимы с учётом давления во фронте волны горения Г.А. Лямина с коллегами<sup>2</sup> и режимы со значимыми характеристиками К.В. Доброго, С.А. Жданок<sup>3</sup>. 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 к этим режимам.

---

<sup>1</sup> Babkin, V.S. Filtration combustion of gases. Present state of affairs and prospects / V.S. Babkin // Pure and Appl.Chem. – 1993. – Vol.65. –P. 335-344.

<sup>2</sup> Пинаев, А.В. Основные закономерности дозвукового и детонационного горения газов в инертных пористых средах / А.В. Пинаев, Г.А. Лямин // – Физика горения и взрыва. – 1989. – Т.25, №4. С.75-85.

<sup>3</sup> Доброго, К.В. Физика фильтрационного горения газов: монография / К.В. Доброго, С.А. Жданок. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова, 2002. – 203 с.

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 достаточно большое количество теоретических работ, к которым предшествовала работа о тепловом самовоспламенении гомогенной газовой смеси в потоке<sup>4</sup>. Но в этих работах, некоторые вопросы ФГГ изучены недостаточно с позиции классической теории горения, к чему посвящена диссертационная работа. Например, определение соотношения для скорости распространения фронта фильтрационного горения газов методами Я.Б. Зельдовича и Д.А. Франк-Каменецкого<sup>5,6</sup> (связь температуры и концентрации), А.П. Алдушина и А.Г. Мержанова<sup>7</sup>, Б.В. Новожилова<sup>8</sup>, (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<sup>4</sup>. Учёта явления диффузии по диффузионному приближению Р.И. Нигматулина<sup>9</sup> и метода аппроксимации профилей температур и концентрации различными функциями в различных зонах

---

<sup>4</sup>Мержанов, А.Г. О тепловом самовоспламенении гомогенной газовой смеси в потоке / А.Г. Мержанов, А.К. Филоненко // Доклады Академии наук СССР. – 1963. –Т. 152, № 1. – С. 143-146.

<sup>5</sup> Математическая теория горения и взрыва: монография / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махваладзе. – М.: Наука, 1980. – 478с.

<sup>6</sup> Lewis В., Elbe G. On the theory of flame propagation / В. Lewis, G. J. Elbe // Chem. Phys. –1934. – V.2., No.8 – P. 537-546.

<sup>7</sup> Алдушин, А.П. Теория фильтрационного горения: Общие представления и состояние исследований / А.П. Алдушин, А.Г. Мержанов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах: сборник статей / под. ред. Ю.Ш. Матроса. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 9-52.

<sup>8</sup> Новожилов, Б.В. Скорость распространения фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе. / Б.В. Новожилов // Доклады Академии наук СССР. – 1961. – Т.141, №1. – С.151-153.

<sup>9</sup> Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред: учебник / Р.И. Нигматулин. – Часть 1. – М.: Наука, 1987. – 464 с.

структуры волны по Н.Н. Смирнову и И.Н. Звереву<sup>10</sup>. Исследование структуры стационарной волны ФГГ по методу пристрелки Я.Б. Зельдовича и др.<sup>5</sup>. Определение критерия воспламенения смеси газов подходами: Я.Б. Зельдовича<sup>11</sup>, И.Г.Ассовского<sup>12</sup>, П.К.Сеначина<sup>13</sup>, В.И.Бабушок и др.<sup>14</sup>. 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<sup>15</sup>, Г.М. Махвиладзе и Б.В.Новожилова<sup>16</sup>, К.Г.Шкадинского и Б.И.Хайкина<sup>17</sup>, К.Г.Шкадинского, Б.И.Хайкина и А.Г.Мержанова<sup>18</sup>, В.С.Бермана и В.Н.Курдюмова<sup>19</sup>, Б.Дж.Матковского и Г.И.Сивашинского<sup>20</sup>. Определение условия

---

<sup>10</sup> Смирнов, Н.Н. Гетерогенное горение: учебник / Н.Н. Смирнов, И.Н. Зверев. – М.: МГУ, 1992. – 446 с.

<sup>11</sup> Зельдович, Я.Б. Теория зажигания накаленной поверхностью / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1939. – Т. 9, №12. – С.1530-1534.

<sup>12</sup> Ассовский, И.Г. Физика горения и внутренняя баллистика: учебник / И.Г. Ассовский. – М.: Наука, 2005. – 357 с.

<sup>13</sup> Сеначин, П.К. Некоторые вопросы моделирования процессов самовоспламенения и горения в ограниченных объемах и двигателях внутреннего сгорания [Электронный ресурс] / П.К. Сеначин. – Режим доступа: [http:// elib.altstu.ru /elib/books/Files/va2000\\_2/pages/07/07.htm](http://elib.altstu.ru/elib/books/Files/va2000_2/pages/07/07.htm). – Дата обращения: 20.12.2012 г.

<sup>14</sup> Бабушок В.И. Тепловое воспламенение в инертной пористой среде /В.И.Бабушок, В.М.Гольдштейн, А.С.Романов, В.С.Бабкин//Физика горения и взрыва. – 1992. – Т.11. – №4. – С.3-9.

<sup>15</sup> Баренблатт, Г.И. О диффузионно–тепловой устойчивости ламинарного пламени / Г.И. Баренблатт, Я.Б. Зельдович, А.Г. Истратов // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1962. – №4. – С.21-26.

<sup>16</sup> Махвиладзе, Г.М. Двумерная устойчивость горения конденсированных систем / Г.М. Махвиладзе, Б.В. Новожилов // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1971. – №5. – С 51-59.

<sup>17</sup> Шкадинский, К.Г. Влияние теплотерь на распространение фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе / К.Г. Шкадинский, Б.И. Хайкин // Горение и взрыв: сборник. – М.: Наука, 1972. – 839 с.

<sup>18</sup> Шкадинский, К.Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе / К.Г. Шкадинский, Б.И. Хайкин, А.Г. Мержанов // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т. 7, № 1. – С. 19-28.

<sup>19</sup> Берман, В.С. Об устойчивости стационарного фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе / В.С. Берман, В.Н. Курдюмов // Механика жидкости и газа. – 1986. – №4. – С.164-167.

<sup>20</sup> Matkowsky, V.J. Propagation of pulsation front in solid fuel combustion / V.J. Matkowsky , G.I. Sivashinsky // SIAM Journal Appl.Math. – 1978. – V. 35, №3.–P. 465-478.

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<sup>20</sup>.

**Цель исследования.** Аналитическое и численное моделирование характеристик и структуры стационарной волны ФГГ в режимах низких скоростей. Разработка диффузионно-тепловой модели ФГГ. Моделирования воспламенения газа в инертной пористой среде, критерии продольной и пространственной устойчивости фронта ФГГ методами малых возмущений, преобразованием Фурье и Лапласа и бифуркации.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие **задачи исследования:**

1. Определение соотношения для скорости волны в однотемпературной и двухтемпературной моделях фильтрационного горения газов.
2. Аппроксимация профилей температур пористой среды, газа и концентрации недостающего компонента газа полиномиальными и экспоненциальными функциями.
3. Исследование диффузионно-тепловой многокомпонентной модели ФГГ.
4. Исследование воспламенения газа в инертной пористой среде в адиабатическом и неадиабатическом режиме.
5. Обоснование эффективного численного метода исследования моделей ФГГ.
6. Вычислительный эксперимент структуры стационарной волны ФГГ.
7. Сравнение расчётных значений характеристик стационарной волны в моделях с постоянной и переменной плотностью смеси газов.
8. Исследование продольной устойчивости фронта ФГГ в адиабатическом и неадиабатическом режиме.
9. Применение преобразования Фурье и Лапласа в задачах устойчивости фронта ФГГ.
10. Исследование диффузионно-тепловой устойчивости фронта ФГГ.

11. Исследование пространственной устойчивости фронта ФГГ при теплопотерях.
12. Исследование пространственной устойчивости фронта ФГГ при замене скорости химической реакции кусочно-постоянной функции.
13. Бифуркационное исследование устойчивости фронта ФГГ

**Научная новизна исследования:**

1. Обоснована применения метода Б.В.Новожилова для определения скорости волны ФГГ.
2. Разработан новый подход определения скорости стационарной волны ФГГ.
3. Обосновано приближенно аналитическое описание структуры стационарной волны ФГГ.
4. Разработан новый метод учёта диффузии компонентов газа в определение скорости волны ФГГ.
5. Определены аналитические зависимости температуры инициирования химической реакции от параметров пористой среды и смеси газов.
6. Впервые найдено аналитическое решение модельной задачи ФГГ вдоль характеристик.
7. Подтверждено критерии инициирования химической реакции при теплоотводе из зоны горения при ФГГ.
8. Обоснован эффективный численный метод исследования структуры стационарной волны ФГГ.
9. Обоснована однотемпературная математическая модель ФГГ, в частности, описывающая горение конденсированных сред и теплодиффузионное горение газа без пористой среды.
10. Впервые получена формула максимальной температуры пористой среды при наличии теплопотерь и вдува смеси.
11. Обосновано критерии продольной и пространственной устойчивости фронта ФГГ.
12. Применена теория бифуркации к пульсирующему фронту ФГГ.



## **Теоретическая и научно-практическая значимость исследования**

**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** исследования заключается в следующем:

1. Явные выражения функции температуры смеси газов, пористой среды и концентрации от координаты и времени позволяют инженерам легко рассчитать распределения температуры и концентрации в зонах горения при конструировании и разработки оборудования и устройств.
2. Разработанная и обоснованная критерия инициирования волны химической реакции при ФГГ позволяет предсказать температуру воспламенения смеси в тех или иных случаях.
3. В предсказании максимальной температуры пористой среды в зависимости от параметров системы.

4. Полученные результаты могут быть использованы при формулировке способов повышения надёжности огнепреградителей и рекомендации об устойчивости фронтов фильтрационного горения газов, конденсированных сред и горения смеси газов без пористой среды.
5. Полученные результаты также могут быть использованы в практике 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).

**Объект исследования** - стационарная волна ФГГ в инертной пористой среде в режимах низких скоростей.

**Предмет исследования.** Соотношения параметров для определения скорости волны. Зависимости скорости волны от определяющих и управляющих параметров системы. Приближённо аналитическое описание структуры стационарной волны. Критерии подобия профилей температуры пористой среды и концентрации компонентов смеси газов. Функциональные зависимости температуры инициирования химической реакции от параметров. Аналитическое решение модельной задачи ФГГ вдоль характеристик. Условия инициирования волны химической реакции при теплоотводе из зоны горения. Вычислительный эксперимент структуры стационарной волны ФГГ. Критерии продольной и пространственной устойчивости волны ФГГ. Разложения характеристик волны по малому параметру и оценка средних значений величин.

#### **Личный вклад соискателя учёной степени**

Все представленные в диссертации результаты получены лично автором за исключением некоторых параграфов (§2.1, §2.2, §3.2, §3.3), которые являются результатами совместных исследований со своими учениками.

**Соответствие диссертации паспорту специальности:** диссертация соответствует следующим областям исследований по паспорту специальности:

- п.1. Разработка новых математических методов моделирования объектов и явлений;

- п.2. Развитие качественных и приближенных аналитических методов исследования математических моделей;

- п.4. Реализация эффективных численных методов и алгоритмов в виде комплексов проблемно-ориентированных программ для проведения вычислительного эксперимента.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Разными подходами выведены различные соотношения для определения скорости волны ФГГ.
2. Разработан приближённо аналитический метод описания структуры стационарной волны ФГГ.
3. Разработан новый метод учёта диффузии компонентов газа при определении скорости волны ФГГ.
4. Функциональные зависимости температуры инициирования химической реакции от параметров пористой среды и смеси газов.
5. Аналитические решения модельной задачи ФГГ вдоль характеристик.
6. Разработано критерии инициирования волны химической реакции при теплоотводе из зоны горения.
7. Обоснован эффективный численный метод исследования структуры стационарной волны ФГГ.
8. Разработана и обоснована однотемпературная математическая модель ФГГ, в частности, описывающая горение конденсированных сред и теплодиффузионное горение газа без пористой среды.
9. Впервые получена формула максимальной температуры пористой среды при наличии теплопотерь из зоны горения и вдува смеси газов в пористую среду.
10. Разными способами выведены условия продольной и пространственной устойчивости волны ФГГ.

11. К пульсирующему фронту ФГГ применена теория бифуркации.

**Степень достоверности результатов.** 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.

**Апробация и реализация результатов диссертации.** Основные научные результаты диссертации докладывались и обсуждались:

1. XII всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (г.Уфа, 19-24.08.2019);
2. Научно-исследовательский семинар кафедры газовой и волновой динамики МГУ им. М.В. Ломоносова под руководством академика РАН Р.И. Нигматулина (11.02.2019, 14.02.2011, 14.03.2011,);
3. IV Международной научно-практической конференции “Современное программирование” (г. Нижневартовск, 08.12.2021);
4. Международной научно-практической конференции посвящённой 30-летию независимости РТ и 25-летию РТСУ «Роль Российско-Таджикского (Славянского) университета в становлении и развитии науки и инновационного образования в Республике Таджикистан» Часть I, Душанбе, 15-16 октября 2021 г.
5. Международной научной конференции «Физика конденсированного состояния и смежные проблемы», посвящённой 70-летию профессора А.И. Филиппова (г. Стерлитамак, 2-5.11.2019);
6. Международной научной конференции «Сингулярные интегральные уравнения и дифференциальные уравнения с сингулярными коэффициентами», посв. 70-летию профессора Г. Джангибекова (г. Душанбе, 30 – 31.01.2020 г.);
7. Научный семинар по горению и аэрозолям Института химической кинетики и горения СО РАН под руководством В.С. Бабкина (11.12.2014);

8. Международной конференции «IX International Voevodsky Conference Physics Chemistry of Elementary Chemical Processes» посвящённой столетию В.В. Воеводского (г. Новосибирск, ИХКГ СО РАН, 26.06.2017);
9. Научный семинар Института механики им. Р.Р. Мавлютова, УНЦ РАН (г.Уфа, 01.06.2017);
10. Первой и второй всероссийской летней школы-конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения» (БашГУ, 26.06.2016 , 25-30 июня 2018);
11. Международной конференции «Дифференциальные уравнения и смежные проблемы» (г. Стерлитамак, Республика Башкортостан, 25-29 июня 2018);
12. Второй и третьей конференции по фильтрационному горению (г.Черноголовка, ИПХФ РАН, 11.11.2010, 21.06.2013);
13. Международной конференции «Химическая и радиационная физика», посвящённой 100-летию О.И. Лейпунского (г. Москва, ИХФ РАН 25.08.2009);
14. Научной конференции отдела горения и взрыва Института химической физики РАН под руководством С.М. Фролова (г.Москва, ИХФ РАН 01.2011);
15. Международной конференции «Современные проблемы газовой и волновой динамики», посвящённой памяти академика Х.А. Рахматулина (г.Москва, МГУ им. М.В. Ломоносова, 2009);
16. Международной конференции MSS-09 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность», посвящённой академику Моисееву (г.Москва, ИКИ РАН 23.11.2009);
17. Научные семинары физического и механико-математического факультетов Таджикского национального университета (17.05.2014, 22.04.2015);
18. Научный семинар Физико-технического института АН Республики Таджикистан (19.06.2013);
19. VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике (Пермь, 2001г.);

20. Международной конференции «Фундаментальные вопросы физики» (Казань 13-18.06.2005);
21. Международной научной конференции «Современные проблемы теории дифференциальных уравнений и математического анализа», посвящённой 80-летию академика АН РТ А. Джураева (г. Душанбе 07.12.2012);
22. Международной научной конференции «Актуальные вопросы математического анализа, дифференциальных уравнений и информатики», посв. 70-летию академика АН РТ З.Д. Усманова (г. Душанбе, 24.08.2007);
23. Международной научной конференции «Современные проблемы математического анализа и их приложений», посвящённой 60-летию академика АН РТ К.Х. Бойматова (г. Душанбе, 21.06.2010);
24. Международной конференции по физике конденсированного состояния, посвящённой 85-летию академика А.А. Адхамова (г. Душанбе, 17.10.2013);
25. Международной научной конференции «Современные проблемы математического анализа и теории функций», посвящённой 60-летию академика АН РТ М.Ш. Шабозова (г. Душанбе, 28.06.2012);
26. Международной научной конференции «Современные проблемы математики и её приложения», посвящённой 70-летию чл.-корр. АН РТ Э.М. Мухаммадиева (г. Душанбе, 28.06.2011);
27. Международной научно-практический семинар «Проблемы гидромеханики и развитие гидроэнергетики, мелиорации и экологии в Центральной Азии», посвящённой 75-летию доктора технических наук, профессора М.А. Саттарова (г. Душанбе, 16.03.2013);
28. Десятая Международная теплофизическая школа «Теплофизические исследования и измерения при контроле качества веществ, материалов и изделий» (г. Душанбе, 3.10.2016);
29. Международной научной конференции «Актуальные проблемы математики и её приложения» (г. Кургантюбе, 06.10.2012);

30. Республиканские конференции (г. Ленинабад, 1990, г. Куляб, 1991, г. Душанбе, 1992, 1996, 1998, 2001, 2006-2008, 2014).

### **Публикации по теме диссертации**

По теме диссертации автором опубликованы более 70 печатных работ, в том числе 38 работ в журналах, рекомендованных ВАК при Президенте Республики Таджикистан и ВАК Министерство образования и науки РФ. Список основных публикаций приведён в последней части раздела списка литературы.

### **Структура диссертации и объём**

Диссертация состоит из введения, пяти глав, обсуждения результатов, выводы, четыре приложения, 56 рисунков, списков литературы и иллюстраций. Работа представлена на 274 страницах (208 стр. текста), 302 библиографических ссылок.

**Ключевые слова:** волна, горение, газовая смесь, пористая среда, скорость, установившаяся волна, условие неустойчивости, начало реакции, температура, температура воспламенения, стационарная волна, фильтрационное горение, бифуркация, равновесная температура, скорость реакции, диффузия, теплопроводность, число Льюиса.

### **Основное содержание работы**

**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 находится связь, а затем это связь используется в уравнение энергии для нахождения соотношения. 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 находится 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. А именно, 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. При этом скорость стационарной волны определялась по соотношению из шестого параграфа второй

главы (2.6.7). 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 анализируются 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 приводятся 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  $\delta$ -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 возмущениям 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.

## ВЫВОДЫ

Проведено математическое моделирование стационарной волны ФГГ, её устойчивости и реализован эффективный численный метод расчёта структуры волны, её характеристик и в итоге сделаны следующие выводы и заключения:

- показана применимость существующих подходов определения соотношений для скорости волны ФГГ (Б.В.Новожилова; А.П.Алдушина и А.Г.Мержанова) и разработан собственный подход определение соотношения, включающее коэффициент межфазного теплообмена;
- обоснован эффективный численный метод решения задачи о структуре стационарной волны ФГГ. Это метод Рунге-Кутты четвёртого порядка точности;
- обосновано приближённо-аналитическое описание структуры стационарной волны ФГГ в соответствии, с которой аппроксимируются профили температур пористой среды и газа, а также концентрации недостающего компонента газа экспоненциальными и полиномиальными функциями на участках подогрева, горения и внутренней релаксации;
- предложена и обоснована новая однотемпературная математическая модель ФГГ, в частности, описывающая горение конденсированного вещества и теплодиффузионное горение газа без пористой среды;
- впервые разработан метод учёта диффузии компонентов смеси в нахождении стационарной скорости волны ФГГ;
- впервые аналитическим способом найдена функциональная зависимость температуры инициирования химической реакции от коэффициента межфазного теплообмена и других параметров;
- впервые получено аналитическое решение модельной задачи ФГГ вдоль характеристик;

- для ФГГ подтверждена идея о критерии воспламенения, что температура воспламенения зависит от отношения характерных времён химической реакции и теплоотдачи в окружающую среду;
- аналитическим способом подтверждено условие пульсирующего горения конденсированных сред (полученное численным методом) и этот результат обобщён для ФГГ;
- обоснован подход Г.И.Баренблатта, Я.Б.Зельдовича, А.Г.Истратова по исследованию закономерностей диффузионно-тепловой устойчивости стационарной волны ФГГ;
- обоснована применимость подхода В.С.Бермана, В.Н.Курдюмова (замена скорости химической реакции кусочно-постоянной функцией) по исследованию пространственной устойчивости стационарной волны ФГГ;
- обоснована применимость метода малых возмущений по исследованию закономерностей пространственной устойчивости стационарной волны ФГГ при наличии теплопотерь;
- впервые получена формула максимальной температуры пористой среды при наличии теплопотерь в окружающее пространство и скорости вдува смеси в пористый блок;
- обосновано применение преобразования Фурье и Лапласа в задачах устойчивости стационарной волны ФГГ;
- обосновано применение теории бифуркации к пульсирующему фронту ФГГ.

Проведённые исследования дополняют теорию стационарных волн ФГГ в режимах низких скоростей.

## **РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ПРАКТИЧЕСКОМУ ИСПОЛЬЗОВАНИЮ РЕЗУЛЬТАТОВ**

Следующие нижеприводимые результаты могут быть использованы как темы специального курса по фильтрационному горению газов:

- нахождение зависимостей градиента температуры с концентрацией реагирующего компонента газа;
- нахождение условий симметричности профилей температуры и концентрации компонентов газа и их связи;
- нахождение аналитических зависимостей температуры инициирования химической реакции от коэффициента межфазного теплообмена и других параметров;
- нахождение аналитических решений модельной задачи ФГГ вдоль характеристик;
- нахождение критерия инициирования химической реакции при теплоотводе из зоны горения;
- нахождение условий продольной устойчивости фронта фильтрационного горения газов, в частности, аппроксимирующего пульсирующий режим горения конденсированных сред;
- нахождение условий диффузионно-пространственной устойчивости фронта фильтрационного горения газов.

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

## Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

### Статьи в рецензируемых журналах

- [1-А]. Кабилов, М.М. Исследование диффузионно-тепловой устойчивости волн фильтрационного горения газов в инертной пористой среде / М.М. Кабилов // Физика горения и взрыва. – 2012. – №1. – С.3-13.
- [2-А]. Кабилов, М.М. О неустойчивости фронта фильтрационного горения газов в неадиабатическом режиме / М.М. Кабилов // Физика горения и взрыва. – 2012. – №2. – С.15-23.
- [3-А]. Кабилов М.М. Аналитическое решение модельной задачи фильтрационного горения газов /М.М. Кабилов, О.А. Холов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т.62, №1-2. – С.31-36.
- [4-А]. Кабилов М.М. Особенности сверхадиабатического режима горения метано-воздушной смеси в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, И.И. Халимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т.62, №3-4. – С.159-165.
- [5-А]. Кабилов М.М. Приближенно-аналитическое решение модельной задачи фильтрационного горения газов /М.М. Кабилов, О.А. Холов // Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2018. – Т.61, №2. – С.134-139.
- [6-А]. Кабилов М.М. Сверхадиабатический режим горения водородо-воздушной смеси в инертной пористой среде/М.М. Кабилов, И.И. Халимов// Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2018. – Т.61, №3. – С.241-249.
- [7-А]. Кабилов М.М. Математическая модель фильтрационного горения газов при подобии распределения температуры и концентрации/М.М.Кабилов, П.Б.Садриддинов, Б.Дж.Гулбоев, О.А.Холов//Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2017. – Т. 60, №9. – С.402-409.
- [8-А]. Кабилов М.М. Применение классической теории горения газов к определению скорости стационарной волны фильтрационного горения

- газов/М.М. Кабилов, П.Б.Садриддинов, Б.Дж.Гулбоев, О.А.Холов// Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2017. №1/5.–С.78-83.
- [9-А].Кабилов М.М. Фильтрационное горение водородо-и метановоздушных смесей с учётом значений коэффициентов диффузии компонентов /М.М.Кабилов, П.Б.Садриддинов, Б.Дж.Гулбоев, А.С.Баротов //Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2017. №1/5. – С.226-229.
- [10-А].Кабилов М.М. Скорость стационарной волны фильтрационного горения газов при подобию полей температуры и концентрации/ М.М. Кабилов, П.Б.Садриддинов, Б.Дж.Гулбоев, О.А.Холов//Труды Института механики им. М.М. Мавлютова. Уфимский центр РАН, Уфа. – 2017. – Т. 12, № 1. – С. 27–32.
- [11-А].Кабилов, М.М. Структура стационарных волн фильтрационного горения газов в инертной пористой среде/ М.М. Кабилов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – Т. 57, №2. – С.109-115.
- [12-А].Кабилов, М.М. Влияние теплотерь и диффузии компонентов газовой смеси на распространение волны горения в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев // Известия Академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – № 4(157). – С.59-67.
- [13-А].Кабилов, М.М. Фильтрационное горение газов при симметричности профилей температуры пористой среды и концентрации компонентов газовой смеси / М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев // Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2013. – Т. 56, № 1. – С.35-43.
- [14-А].Кабилов, М.М. Численное моделирование фильтрационного горения газов при симметричности профилей температуры и концентрации компонентов / М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев, П.Б. Садриддинов, И.Х. Халимов // Известия Академии наук Республики Таджикистан. – 2013. – № 1(150). – С.67-75.



- [15-А]. Кабилов, М.М. Численное исследование стационарной структуры волны фильтрационного горения газов при наличии теплотерь / М.М. Кабилов, И.Х. Халимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2013. – Т. 56, № 4. – С.297-304.
- [16-А]. Кабилов, М.М. Тепловое инициирование химической реакции в инертной пористой среде. / М.М. Кабилов, И.Х. Халимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2013. – Т. 56, № 5. – С.376-380.
- [17-А]. Кабилов, М.М. Температура инициирования химической реакции в волне фильтрационного горения газов при наличии теплоотвода / М.М. Кабилов, И.Х. Халимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2013. Т. 56, № 6. – С.445-449.
- [18-А]. Кабилов, М.М. Горение метановоздушной смеси в инертной пористой среде/М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев// Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2013. – №1. – С.92-96.
- [19-А]. Кабилов, М.М. Численный расчёт характеристик стационарной волны фильтрационного горения метановоздушной смеси/М.М. Кабилов, И.Х. Халимов, Б.Дж. Гулбоев // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2013. – №1/1(102). – С.116-121.
- [20-А]. Кабилов, М.М. Численное определение структуры и характеристики стационарной волны фильтрационного горения газов / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, И.Х. Халимов // Известия Академии наук республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических наук. – 2011. – №1(142). – С. 47-54.
- [21-А]. Кабилов, М.М. Исследование процесса распространения фронта фильтрационного горения газов / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. - 2010. - Т. 53, № 4. - С. 272-278.

- [22-А]. Кабилов, М.М. Скорость распространения фронта горения смеси газов в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2009. – Т. 52, № 6. – С. 443-448.
- [23-А]. Кабилов, М.М. Фильтрационное горение газов в инертной деформируемой пористой среде / М.М. Кабилов // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических наук. – 2007. - № 3(128). - С. 22-28.
- [24-А]. Кабилов М.М. Применение теории бифуркаций к пульсирующему распространению фильтрационного горения газов / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов, Б.К. Шокиров // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2006. - Т. 49, №4. – С. 131-137.
- [25-А]. Кабилов, М.М. Установление устойчивости стационарного горения с использованием преобразования Фурье и Лапласа / М.М. Кабилов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2002. – Т. 45, № 10. – С. 102-107.
- [26-А]. Кабилов, М.М. Об устойчивости стационарного фронта горения в инертной пористой среде при фильтрации смеси газов / М.М. Кабилов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 1999. – Т. 42, № 8. – С. 82-87.
- [27-А]. Кабилов, М.М. Влияние теплотерь на устойчивость стационарных волн при фильтрационном горении газов / М.М. Кабилов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 1997. – Т. 40, № 9-10. – С. 82-88.
- [28-А]. Кабилов, М.М. Определение условия устойчивого распространения фронта пламени при фильтрации смеси газов / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 1994. – Т. 37, № 2. – С. 14-16.
- [29-А]. Кабилов, М.М. Параметрическая зависимость скорости распространения волны горения и скорости вынужденной фильтрации смеси газов в

- инертных пористых средах / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 1993. – Т. 36, № 2. – С. 177-181.
- [30-А]. Кабилов, М.М. К теории фильтрационного горения газов в пористых средах / М.М. Кабилов, П.Б. Вайнштейн // Известия Академии наук Таджикской ССР. Отделение физико-математических, химических, геологических наук. – 1992. – №3. – С. 55-59.
- [31-А]. Кабилов М.М. Основные характеристики волны горения пропановоздушной смеси в моделях фильтрационного горения газов /М.М.Кабилов, А.С.Баротов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т.62, №7-8. – С.418-424.
- [32-А]. Кабилов М.М. Численное исследование фильтрационного горения газов при обобщённом числе Льюиса/М.М.Кабилов,О.А.Холов//Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2020 г. Том 63, №5-6. С.24-27.
- [33-А]. Кабилов М.М. Тепловое воспламенение смеси газов в инертной пористой среде/М.М.Кабилов//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2022. – Т. 65. – №1-2. – С. 24-27.
- [34-А]. Кабилов М.М. Аналитическое решение математической модели теплового воспламенения смеси газов в инертной пористой среде/М.М.Кабилов// Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2022. – Т. 65. – №2. – С. 57-62.
- [35-А]. Кабилов М.М. Сравнительный анализ основных параметров волны горения пропано-воздушной смеси в двух моделях фильтрационного горения газов /М.М.Кабилов, П.Б.Садриддинов, А.С.Баротов//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2022. – Т. 65. – №2. – С. 57-62.
- [36-А]. Кабилов М.М. Влияние температурной зависимости коэффициентов переноса на параметры волны горения в двух моделях фильтрационного горения газов /М.М.Кабилов., А.С.Баротов//Известия Академии наук

Республики Таджикистан, Отделение физико-математических, химических и технических наук. – 2022. – №3(189). – С. 88-92.

[37-A].Kabilov M. M. Diffusion-thermal stability of gas filtration combustion waves in an inert porous medium/M.M.Kabilov//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2012. – V.48. – N. 1. – P. 10–16.

[38-A].Kabilov M. M. Instability of the front of filtration combustion of gases in the nonadiabatic regime/M.M.Kabilov//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2012. – V.48. – N. 3. – P. 136–143.

### **Статьи и тезисы в публикациях конференции**

[39-A].Кабилов М.М. Численное решение модельной задачи фильтрационного горения газов при обобщённом числе Льюиса/ М.М. Кабилов, О.А.Холов // Журнал«Многофазные системы»,УФА.2020.№1-2.DOI:10.21662 / mfs 2020.1

[40-A].Кабилов М.М. Волна фильтрационного горения газов при диффузии компонентов в зоне горения/М.М.Кабилов, Б.Дж.Гулбоев // Журнал «Многофазные системы», УФА. 2020. №1-2.DOI:10.21662/mfs2020.1

[41-A].Кабилов М.М. Стабилизация волны фильтрационного горения газов в инертной пористой среде/М.М.Кабилов//Материалы международной научной конференции «Сингулярные интегральные уравнения и дифференциальные уравнения с сингулярными коэффициентами» Таджикистан, Душанбе, 30-31 января 2020 г. С.150-154.

[42-A].Кабилов М.М., Холов О.А. Исследование модельной задачи ФГГ классическим методом /М.М.Кабилов, О.А.Холов // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 19-24 август 2019 г. Секция II-4. С.218-220.

[43-A].Кабилов М.М., Халимов И.И. Режимы ФГГ в эквивалентной модели // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и

прикладной механики. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 19-24 август 2019 г. Секция II-4. С.80-82.

[44-А]. Кабилов М.М. Численный расчёт структуры нестационарной волны фильтрационного горения газовоздушной смеси/М.М. Кабилов// Материалы международной конференции «Современные проблемы и приложения алгебры, теории чисел и математического анализа». Душанбе, ИМ АН РТ, 2019. С.130-135.

[45-А]. Кабилов М.М., Халимов И.И. Фильтрационное горение метаноокислородной смеси/ М.М. Кабилов, И.И.Халимов // Материалы международной научной конференции «Физика конденсированного состояния и смежные проблемы» Республика Башкортостан, Россия, г. Стерлитамак, 2 октября 2019 г. С.170-173.

[46-А]. Кабилов М.М. Частное решение модельной задачи фильтрационного горения газов при произвольном числе Льюиса/ М.М. Кабилов, О.А.Холов //Второй всероссийской школы конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения» 25-30 июня 2018 г., с.52.

[47-А]. Кабилов М.М. Сверхадиабатический режим фильтрационного горения водородо-воздушной смеси/ М.М. Кабилов, И.И.Халимов //Международная конференция «Дифференциальные уравнения и смежные проблемы» 25 – 29 июня 2018 г., г. Стерлитамак, Республика Башкортостан. С.93-96.

[48-А]. Кабилов М.М. «Околостационарное решение эквивалентной модели процесса фильтрационного горения газов»/ М.М. Кабилов// Международная научная конференция "Современные проблемы математики и её приложений" посвящённой 70-летию со дня рождения академика Академии наук Республики Таджикистан, доктора физико-математических наук, профессора Илолова Мамадшо Илоловича (Душанбе, 14-15 марта, 2018 г.). С.165-166.

- [49-A].Kabilov, M.M. Analitical solution of the nonstationary problem of filtration combustion of gases / M.M. Kabilov, P.B. Sadridinov, B.J. Gulboev, I.I. Khalimov // IX International Voevodsky Conference Physics Chemistry of Elementary Chemical Processes, Novosibirsk. – June 25-30 2017. – P.67-68.
- [50-A].Кабиров, М.М. Стационарная скорость волны фильтрационного горения газов при подобии полей температуры и концентрации / М.М. Кабиров, П.Б. Садриддинов, Б.Дж. Гулбоев, О.А. Холов // VI Российская конференция «Многофазные системы: модели, эксперименты, приложения» и школы молодых ученых «Газовые гидраты – энергия будущего», Уфа. – 26-30 июня 2017. – С. 49.
- [51-A].Кабиров, М.М. Фильтрационное горение газов с позиции классической теории горения / М.М. Кабиров // Сборник трудов Первой летней школы-конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения», Уфа. – 26-29 июня 2016. – С. 77-85.
- [52-A].Kabilov, M.M. Influence of heat losses for speed wave of filtration combustion of gases under symmetric profiles of temperature and concentrations of the components / M.M. Kabilov // Международная конференция «Мемориал Я.Б.Зельдовича» посвящённая 100 - летию со дня рождения академика Я.Б.Зельдовича, Москва. – 27-31 октября 2014. – С. 104-105.
- [53-A].Кабиров, М.М. Скорость волны и максимальная температура при горении водородо-воздушной смеси газов в инертной пористой среде/ М.М. Кабиров, Б.Дж. Гулбоев // Учёные записки. Современные проблемы математики и её преподавания, Худжанд. –2014. – №2(29), Ч.1. –С. 348-351.
- [54-A].Кабиров, М.М. Зависимость скорости волны фильтрационного горения газов от коэффициентов диффузии компонентов смеси газов / М.М. Кабиров, Б.Дж. Гулбоев // Сборник научных статей по итогам международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург.–27-28 февраля 2014. –С.77-79.

- [55-А]. Кабилов, М.М. Фильтрационное горение газов в инертной пористой среде при диффузии компонентов газовой смеси / М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев // Третья конференция по фильтрационному горению, Черноголовка. – 18-21 июня 2013. – С. 92-96.
- [56-А]. Кабилов, М.М. Тепловое воспламенение смеси газов в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, И.Х. Халимов // Третья конференция по фильтрационному горению, Черноголовка. – 18-21 июня 2013. – С. 97-99.
- [57-А]. Кабилов, М.М. Пространственная устойчивость волн ФГГ при замене скорости химической реакции ступенчатой функцией / М.М. Кабилов // Вторая конференция по фильтрационному горению, Черноголовка. – 11-15 октября 2010. – С. 69-72.
- [58-А]. Кабилов, М.М. Пространственная устойчивость неадиабатических волн фильтрационного горения газов / М.М. Кабилов // Международная конференции «Химическая и радиационная физика», посвященной 100-летию О.И. Лейпунского, Москва, Черноголовка. – 2009. – С.157-160.
- [59-А]. Кабилов, М.М. Скорость распространения фронта ФГГ в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов // Международная конференции «Химическая и радиационная физика», посвященной 100-летию О.И. Лейпунского, Москва, Черноголовка. – 2009. – С.165-168.
- [60-А]. Кабилов М.М. Скорость фронта ФГГ в модели воспламенения / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов, П.Б. Садриддинов // Международная конференция MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность», Москва. – 23 ноября 2009. – С.462-467.
- [61-А]. Кабилов, М.М. Параметры волн фильтрационного горения газов на границе устойчивости / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Н.И. Фатхуллоев // Международная конференция «Современные проблемы газовой и волновой динамики» посвященной к 100-летию со дня рождения академика Х.А. Рахматулина, Москва. – 21 апреля 2009. - С. 45-46.

- [62-А]. Кабилов М.М. О пространственной устойчивости стационарного режима фильтрационного горения газов/М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Б.К. Шокиров//Материалы международной научной конференции «Актуальные вопросы математического анализа, дифференциальных уравнений и информатики» посвященной 70-летию академика Академии наук Республики Таджикистан Усманова Зафара Джураевича. Душанбе. – 24-25 августа 2007. – С.47-49.
- [63-А]. Кабилов, М.М. Применение теории бифуркаций к пульсирующему распространению фильтрационного горения газов /М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов, Х.Х. Муминов, Б.К. Шокиров // III Международная конференция «Фундаментальные вопросы физики», Казань. - 13-18 июня 2005. - С. 51-52.
- [64-А]. Кабилов М.М. К теории фильтрационного горения газов /М.М. Кабилов//Материалы республиканской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Таджикистана. –Тезисы докладов. Ленинабад, 1990. – С.171-173.
- [65-А]. Кабилов М.М. Исследование особых точек системы дифференциальных уравнений/М.М. Кабилов//Тезисы докладов республиканской научной конференции “Дифференциальные уравнения и их приложения”. Куляб. – 1991. – С. 80-81.
- [66-А]. Кабилов М.М. Определение скорости распространения волны горения в инертных пористых средах/М.М. Кабилов.–Деп. в ТаджНИНТИ. – №7(796) –Та92. – Вып. 2. – 7 с.
- [67-А]. Кабилов М.М. Влияние теплотерь на распространение фронта пламени/М.М. Кабилов//VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Пермь. –23-29 август 2001.
- [68-А]. Кабилов М.М. Программный комплекс для сравнения основных параметров фильтрационного горения пропано-воздушной смеси /М.М. Кабилов, И.И. Халимов, О.А. Холов, А.С. Баротов//Материалы IV



международной научно-практической конференции “Современное программирование”. Россия, г.Нижевартовск, 08.12.2021 г. С.186-191.

[69-А].Кабиров М.М. Компьютерное моделирование фильтрационного горения газов/М.М.Кабиров, И.И.Халимов, З.Б.Шерматова//Материалы Международной научно-практической конференции посвящённой 30-летию независимости РТ и 25-летию РТСУ «Роль Российско-Таджикского (Славянского) университета в становлении и развитии науки и инновационного образования в Республике Таджикистан» Часть I, Душанбе, 15-16 октября 2021 г. С. 46-52.

[70-А].Кабиров М.М. Горение пропановоздушной смеси в эквивалентной модели фильтрационного горения газов//Материалы международной научной конференции «Сингулярные интегральные уравнения и дифференциальные уравнения с сингулярными коэффициентами» Таджикистан, Душанбе, 30-31 января 2020 г. С.154-158.

[71-А].Кабиров М.М. Воспламенение смеси газов в инертной пористой среде/ М.М.Кабиров,А.С.Баротов//Материалы республиканской научно-практической конференции, посвящённой двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук «Актуальные вопросы естественных наук и технологий». РТСУ. Душанбе, 28 октября 2020г. С 136-138.

**ДОНИШГОҲИ МИЛЛИИ ТОҶИКИСТОН**

УДК 536.46

*Бо ҳуқуқи дастнавис*



Қобилов Маруф Маҳмудович

**МОДЕЛСОЗИИ МАТЕМАТИКИИ МАВҶҲОИ СТАТСИОНАРИИ СЌЗИШИ  
ФИЛТРОНАИ ГАЗҲО ВА УСТУВОРИИ ОНҲО**

**Автореферати**

диссертация барои дарёфти дараҷаи илмии доктори илмҳои физикаю математика  
аз рӯи ихтисоси 05.13.18 – Амсиласозии математикӣ, методҳои ададӣ ва  
мучтамаъи барномаҳо

Душанбе - 2023

Диссертатсия дар кафедраи “Информатика ва технологияи иттилоотӣ”-и  
"Донишгоҳи славянии Русия ва Тоҷикистон" ба анҷом расонида шудааст.

Мушовири илмӣ:

**Нигматулин Роберт Искандерович**  
академики Академияи илмҳои Россия,  
доктори илмҳои физикаю математика,  
профессор, и.в. роҳбари илмии МТОБФД  
“Институти океанологияи ба номи  
П.П.Ширшов Академияи илмҳои Россия” ш.  
Москва

Муқарризи расмӣ:

**Хмель Татьяна Алексеевна**  
доктори илмҳои физикаю математика,  
тадқиқотчи пешбари МТОБФД  
"Институти механикаи назариявӣ ва амалӣ  
ба номи С.А. Христианович " Шӯбаи  
Сибири Академияи илмҳои Россия  
ш. Новосибирск

**Комилиён Файзали Саъдулло**  
доктор илмҳои физикаю математика,  
профессори кафедраи “Информатика”-и  
Донишгоҳи миллии Тоҷикистон

**Исхоков Сулаймон Абунасович**  
доктори илмҳои физикаю математика,  
профессор, аъзо-вобастаи АМИ Тоҷикистон,  
ҷонишини директор оид ба илм ва таълим -и  
Институти математикаи ба номи А.Ҷураев  
АМИТ

Муассисаи муқарриз:

Институти физикаю техникаи ба номи  
С.У.Умаров АМИ Тоҷикистон

Ҳимоя санаи 31 май соли 2023, соати 14:00 дар ҷаласаи Шӯрои  
диссертатсионии 6D.KOA-011-и назди Донишгоҳи миллии Тоҷикистон  
баргузор мегардад. Нишонӣ: 734027, ш. Душанбе, кӯчаи Буни Ҳисорак,  
факултети механикаю математика, бинои 17, синфхонаи 216. Бо  
диссертатсия дар Китобхонаи марказии илмии Донишгоҳи миллии  
Тоҷикистон ва ё дар сомонаи <http://www.tnu.tj> шинос шудан мумкин аст.

Автореферат “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 ирсол гардидааст

Котиби илмии Шӯрои диссертатсионии 6D.KOA-011,  
доктори илмҳои физикаю математика, дотсент



И.Ҷ.Нуров

## ТАВСИФИ УМУМИИ КОР

**Мубрамияти мавзӯи тадқиқот.** Сӯзиши филтронаи газҳо (СФГ) ин протессҳои паҳншавии соҳаи реаксияи экзотермии газ дар муҳити ковоки инертӣ буда, моддаи даргиранда ба ин соҳа филтрона расонида мешавад. СФГ ба қатори нисбатан нави соҳаи назарияи сӯзиш – сӯзиши филтрона дохил мешавад. Омӯзиши СФГ бо зарурияти дар амал ва назария истифода шуданаш ба вучуд омадааст. Аз нуктаи назари он ҳодисаҳои гузариши оташ аз оташнагузаронакҳо омӯхта ва шарҳ дода шуда, оташнагузаронакҳои насли нав ва реакторҳои кимиёвӣ дар асоси мавҷҳои гармӣ таҳия карда шуданд.

Ҳодисаи СФГ бештар таваҷҷӯҳи муҳаққиқонро ба худ ҷалб мекунад ва аз нуктаи назари илмӣ, дар он намудҳои гуногуни сӯзиш ҳамчун ҳолатҳои махсуси равандҳои мавҷҳои умумӣ ба ҳисоб мераванд. Ҳангоми тавсифи математикии протессеи СФГ, муодилаҳо ифодаи реаксияи ҳомогенӣ (якҷинса) ва аз он вобаста будани ҷудошавии энергияро дарбар мегиранд. Агар додугирифтӣ гармӣ байни фазаҳо ба дараҷаи кофӣ шадид бошад ва фарқи ҳарорати фазаҳо (газ ва зарраҳои сахт) сарфи назар кардан мумкин бошад, пас аз муодилаи СФГ, алаҳусус, муодилаҳои сӯзиши якҷинсаи газҳо, сӯхтани моддаҳои конденсионӣ ва дигарҳо ҳосил кардан мумкин аст. Аз ин рӯ, омӯзиши модели СФГ имкон медиҳад, ки қонуниятҳои паҳншавии мавҷҳои реаксия ҳангоми сӯхтани моддаҳои гуногун ошкор карда шаванд. Яъне дар ин маврид баёни сӯзиши моддаҳои гуногун бо як хел муодилаҳо ба амал меояд. Тафовут, дар ҳолати баён намудани сохтори мавҷи ду ҳарората ба вучуд меояд, вақте ки ҳарорати газ (аз сабаби паст будани гармигузаронии фазаи газ) аз ҳарорати зарраҳои фазаи сахт ба таври назаррас фарқ мекунад. Ин навъи сӯзиш то ҳадди имкон омӯхта нашудааст ва ба навъи сӯзиши ҳетерогенӣ дохил мешавад. Дохилшавӣ ба ин навъи сӯзиш аз нуктаи назари реаксияи кимиёвӣ набуда, балки ба туфайли иштироқи фаёлона дар механизми паҳншавии мавҷҳои сӯзиш дар як вақт дар ду фаза (муҳити сахт ва газ) мебошад.

Дар ин марҳила таснифоти мухталифи режимҳои стационарии сӯзиши газҳо мавҷуданд, масалан, таснифи суръатонаи В.С. Бабкин<sup>21</sup>, режимҳои баландсуръат бо назардошти фишор дар сатҳи мавҷи сӯзиши Г.А. Лямин ва ҳамкорон<sup>22</sup> ва

<sup>21</sup> Babkin, V.S. Filtration combustion of gases. Present state of affairs and prospects / V.S. Babkin // Pure and Appl.Chem. – 1993. – Vol.65. –P. 335-344.

<sup>22</sup> Пинаев, А.В. Основные закономерности дозвукового и детонационного горения газов в инертных пористых средах / А.В. Пинаев, Г.А. Лямин // – Физика горения и взрыва. – 1989. – Т.25, №4. С.75-85.

режимҳо бо хусусиятҳои назарраси К.В. Добрего, С.А. Жданок<sup>23</sup>. Мувофиқи таснифоти В.С. Бабкин, шаш режимҳои асосии статсионарии СФГ мавҷуданд, ки дутои он ба режимҳои пастсуръат мувофиқ аст (суръати паҳншавии мавҷҳо аз  $10^{-6}$  м/с то  $10^{-1}$  м/с тағир меёбанд): режими пастсуръат, ки паҳншавии мавҷи сӯзиш дар муҳити ковоқӣ диаметри сӯрохиҳояш аз диаметри критики хурд ба амал меояд ( $10^{-6}$  м/с то  $10^{-3}$  м/с); режими суръаташ пасти 2 (ду), ки дар муҳити диаметри сӯрохиҳояш аз диаметри критики калон ба вуқӯъ меояд ( $10^{-3}$  м/с то  $10^{-1}$  м/с). Тадқиқоти диссертатсионӣ ба ин режимҳо мувофиқ мебошад.

Омӯзиши хусусиятҳои физикии мавҷҳо дар ин режимҳо барои дар амал истехсол намудани таҷхизотҳои гармкунии муосир, ки дар онҳо усулҳои дигари ҷойгиркунонии шӯъла дар муҳити ковок истифода мешаванд, дар муқоиса бо усули анъанавӣ (мӯътадилгардонии шӯъла дар сарҳади дастгоҳ) ниҳоят муҳим аст. Бинобарин, шумораи хеле зиёди таҳқиқотҳои назариявӣ ба омӯзиши ин режимҳои сӯзиш бахшида шудаанд, ки аз онҳо пештар кор дар бораи аз гармӣ худазхуд даргирии омехтаи газҳои яклухт чоп шуда буд<sup>24</sup>. Аммо дар ин асарҳо баъзе масъалаҳои СФГ аз нуқтаи назари назарияи классикии сӯзиш, ки рисола ба он бахшида шудааст, нокифоя омӯхта шудаанд. Масалан, муайян кардани муодила нисбати суръати паҳншавии сатҳи сӯзишии газҳо бо усулҳои Я.Б. Зельдович ва Д.А. Франк-Каменецкий<sup>25,26</sup> (муносибати байни ҳарорат ва концентратсия), А.П. Алдушин ва А.Г. Мержанов<sup>27</sup>, Б.В. Новожилов<sup>28</sup> (муносибати байни градиенти ҳарорат ва концентратсия). Муайян кардани таъсири тартиби суръати реактсияи химиявӣ (нишондиҳандаи ҷузъи норасоии газ) ба хусусиятҳои мавҷи СФГ аз рӯи модели А.Г. Мержанов ва А.К. Филоненко<sup>4</sup>. Бо назардошти ҳодисаи диффузия бо

---

<sup>23</sup> Добрего, К.В. Физика фильтрационного горения газов: монография / К.В. Добрего, С.А. Жданок. – Мн.: Ин-т тепло- и массообмена им. А.В.Лыкова, 2002. – 203 с.

<sup>24</sup> Мержанов, А.Г. О тепловом самовоспламенении гомогенной газовой смеси в потоке / А.Г. Мержанов, А.К. Филоненко // Доклады Академии наук СССР. – 1963. – Т. 152, № 1. – С. 143-146.

<sup>25</sup> Математическая теория горения и взрыва: монография / Я.Б. Зельдович, Г.И. Баренблатт, В.Б. Либрович, Г.М. Махваладзе. – М.: Наука, 1980. – 478с.

<sup>26</sup> Lewis B., Elbe G. On the theory of flame propagation / B. Lewis, G. J. Elbe // Chem. Phys. –1934. – V.2., No.8 – P. 537-546.

<sup>27</sup> Алдушин, А.П. Теория фильтрационного горения: Общие представления и состояние исследований / А.П. Алдушин, А.Г. Мержанов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах: сборник статей / под. ред. Ю.Ш. Матроса. – Новосибирск: Наука, 1988. – С. 9-52.

<sup>28</sup> Новожилов, Б.В. Скорость распространения фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе. / Б.В. Новожилов // Доклады Академии наук СССР. – 1961. – Т.141, №1. – С.151-153.

истифодабарии методи тахминии диффузия<sup>29</sup>(Р.И. Нигматулин) ва усули бо функцияҳои гуногун иваз намудани профилҳои ҳарорат ва консентратсия дар минтақаҳои гуногуни сохтори мавҷ аз рӯи таҳқиқотҳои Н.Н. Смирнов ва И.Н. Зверев<sup>30</sup>. Таҳқиқи сохтори мавҷи статсионарии СФГ бо усули интиҳоби суръати пахншавии сатҳи сӯзиш (тирандозӣ) Я.Б.Зелдович ва дигарон<sup>5</sup>. Муайян кардани меъёрҳои алангагирии омехтаи газ бо равишҳои Я.Б.Зельдович<sup>31</sup>, И.Г.Ассовский<sup>32</sup>, П.К.Сеначин<sup>33</sup>, В.И.Бабушок ва дигарон<sup>34</sup>.

Омӯзиши устувории тӯлонӣ ва ҷазоии мавҷҳои статсионарии СФГ дар ҳолатҳои адиабатӣ ва ғайриадиабатӣ бо истифода аз усули иловаҳои хурд (равешҳои Г.И.Баренблатт, Я.Б.Зельдович ва А.Г.Истратов<sup>35</sup>, Г.М.Махвиладзе ва Б.В. Новожилов<sup>36</sup>, К.Г.Шкадинский ва Б.И.Хайкин<sup>37</sup>, К.Г.Шкадинский, Б.И.Хайкин ва А.Г.Мержанов<sup>38</sup>, В.С.Берман ва В. Н.Курдюмов<sup>39</sup>,

---

<sup>29</sup> Нигматулин, Р.И. Динамика многофазных сред: учебник / Р.И. Нигматулин. – Часть 1. – М.: Наука, 1987. – 464 с.

<sup>30</sup> Смирнов, Н.Н. Гетерогенное горение: учебник / Н.Н. Смирнов, И.Н. Зверев. – М.: МГУ, 1992. – 446 с.

<sup>31</sup> Зельдович, Я.Б. Теория зажигания накаливаемой поверхностью / Я.Б. Зельдович // Журнал экспериментальной и теоретической физики. – 1939. – Т. 9, №12. – С.1530-1534.

<sup>32</sup> Ассовский, И.Г. Физика горения и внутренняя баллистика: учебник / И.Г. Ассовский. – М.: Наука, 2005. – 357 с.

<sup>33</sup> Сеначин, П.К. Некоторые вопросы моделирования процессов самовоспламенения и горения в ограниченных объемах и двигателях внутреннего сгорания [Электронный ресурс] / П.К. Сеначин. – Режим доступа: [http://elibr.altstu.ru/elibr/books/Files/va2000\\_2/pages/07/07.htm](http://elibr.altstu.ru/elibr/books/Files/va2000_2/pages/07/07.htm). – Дата обращения: 20.12.2012 г.

<sup>34</sup> Бабушок В.И. Тепловое воспламенение в инертной пористой среде / В.И.Бабушок, В.М.Гольдштейн, А.С.Романов, В.С.Бабкин//Физика горения и взрыва. – 1992. – Т.11. – №4. – С.3-9.

<sup>35</sup> Баренблатт, Г.И. О диффузионно–тепловой устойчивости ламинарного пламени / Г.И. Баренблатт, Я.Б. Зельдович, А.Г. Истратов // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1962. – №4. – С.21-26.

<sup>36</sup> Махвиладзе, Г.М. Двумерная устойчивость горения конденсированных систем / Г.М. Махвиладзе, Б.В. Новожилов // Журнал прикладной механики и технической физики. – 1971. – №5. – С 51-59.

<sup>37</sup> Шкадинский, К.Г. Влияние теплотерь на распространение фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе / К.Г. Шкадинский, Б.И. Хайкин // Горение и взрыв: сборник. – М.: Наука, 1972. – 839 с.

<sup>38</sup> Шкадинский, К.Г. Распространение пульсирующего фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе / К.Г. Шкадинский, Б.И. Хайкин, А.Г. Мержанов // Физика горения и взрыва. – 1971. – Т. 7, № 1. – С. 19-28.

<sup>39</sup> Берман, В.С. Об устойчивости стационарного фронта экзотермической реакции в конденсированной фазе / В.С. Берман, В.Н. Курдюмов // Механика жидкости и газа. – 1986. – №4. – С.164-167.

Б.Ж.Матковский ва Г.И.Сивашинский<sup>40</sup>). Муайян кардани шароити устуворӣ барои мавҷи статсионари СФГ бо истифодаи табдилотҳои Фурье ва Лаплас ва таҳлили бифуркатсионии сатҳи СФГ аз рӯи усули В.Ж. Матковский ва Г.И. Сивашинский<sup>20</sup>.

**Мақсади тадқиқот.** Мақсади асосии тадқиқоти диссертатсионӣ ин моделсозии аналитикӣ ва ададии параметрҳои мавҷ ва сохтори мавҷҳои статсионари СФГ дар ҳолатҳои пасти суръати паҳншавии сатҳи сӯзиш. Таҳияи модели гармию диффузии СФГ. Моделсозии алангагирии газ дар муҳити ковоки инертӣ. Таҳияи меъёрҳои устувори тӯлонӣ ва фазогии сатҳи СФГ бо методҳои ғалаёнҳои хурд, дигаргункуниҳои Фурею Лаплас ва бифуркатсия мебошанд.

**Масъалаҳои тадқиқот.** Барои ноил шудан ба мақсади гузошта шуда масъалаҳои зерин дида баромада шуданд :

1. Муайян намудани вобастагӣҳо барои суръати мавҷ дар моделҳои якҳарората ва духароратаи сӯзиши филтронаи газҳо.
2. Ивазкунии профилҳои ҳарорати муҳити ковок, газ ва маҳлули таркибаи норасои газ бо функсияҳои полиномиалӣ ва экспоненсиалӣ дар соҳаҳои мавҷ.
3. Тадқиқи модели диффузионию гармии бисёртаркибаи СФГ.
4. Тадқиқи алангагирии газ дар муҳити ковоки инертӣ ҳангоми режимҳои адиабатӣ ва ғайриидиабатӣ.
5. Асоснокунии самаронокии усули ададӣ дар таҳқиқи моделҳои СФГ.
6. Гузаронидани эксперименти компютерӣ нисбати сохтори мавҷи статсионари СФГ.
7. Муқоисаи қиматҳои характеристикаҳои мавҷи статсионарӣ дар моделҳои, ки дар онҳо зичии омехтаи газ доимӣ ва тағирёбанда мебошанд.
8. Тадқиқоти устувори тӯлонии сатҳи СФГ ҳангоми сӯзишҳои адиабатӣ ва ғайриидиабатӣ.
9. Татбиқи табдуллотҳои Фурье ва Лаплас дар масъалаҳои устувори сатҳи СФГ.
10. Тадқиқоти устувори сатҳи СФГ аз рӯи назарияи диффузия ва ҳарорат.
11. Тадқиқоти устувори фазогии сатҳи СФГ ҳангоми талафоти гармӣ.
12. Тадқиқи устувори фазогии сатҳи СФГ ҳангоми иваз кардани суръати реаксияи химиявӣ бо функсияи қисман доимӣ.
13. Тадқиқи бифуркатсионии устувори сатҳи СФГ.

---

<sup>40</sup> Matkowsky, B.J. Propagation of pulsation front in solid fuel combustion / B.J. Matkowsky , G.I. Sivashinsky // SIAM Journal Appl.Math. – 1978. – V. 35, №3.–P. 465-478.

**Объекти тадқиқот** ин мавҷҳои статсионари СФГ-и суръаташон паст дар муҳити ковоки инертӣ мебошанд.

**Мавзӯи тадқиқот.** Ин муайян намудани: таносубҳои параметрҳо барои муайянкунии суръати мавҷи статсионарӣ; вобастагии суръати мавҷи статсионарӣ аз параметрҳои муайяни ва идоракунии система; тавсифи тақрибию-аналитикии сохти мавҷҳои статсионарӣ; меъёрҳои монандии профилҳои ҳарорати муҳити ковок ва консентратсияи таркибаи омехтаи газҳо; вобастагии функциявии ҳарорати газ аз параметрҳо дар ҳолати оғози реаксияи кимиёвӣ; ҳалли аналитикии масъалаи СФГ қад-қади характеристика; шарти ба шууроии ректсияи кимиёвӣ ҳангоми талафшавии гарми аз соҳаи сӯзиш; сохтори мавҷи статсионарӣ бо гузаронидани эксперименти компютерӣ; меъёрҳои устувории тӯлонӣ ва фазогии мавҷи СФГ; ифодаҳои характеристикаҳои мавҷ аз рӯи параметрҳои хурд ва баҳо додани арзиши миёнаи параметрҳои сӯзиш.

**Усулҳои тадқиқот.** Рисола назариявӣ буда, дар он бо равишҳои гуногуни дақиқи математикӣ таносуби параметрҳо ёфта шудаанд, ки барои муайян намудани суръати мавҷ истифода мешаванд. Барои омӯзиши муфассали сохтори мавҷҳо усули таҳқиқоти ададӣ истифода мешавад. Меъёрҳои оғози мавҷи реаксияи кимиёвӣ бо усули тахминии аналитикӣ муқаррар карда мешаванд. Усули математикии дақиқ, ки ҳодисаи диффузияи таркибаҳои омехтаи газро барои муайян намудани суръати мавҷи СФГ ба назар мегирад, истифода шудааст. Дар асоси усули маълуми иловаҳои хурд, устувории мавҷи статсионари СФГ омӯхта мешавад, ҳудуди ноустувории ларзишӣ ва экспоненсиалӣ муайян ва дар ин ҳудуд вобастагиҳои аналитикии зудии иловаҳо, адади мавҷи ва коэффитсиенти гармидиҳӣ аз параметрҳои система ёфта мешаванд. Ғайр аз ин, усули табдилдиҳиҳои Фурье ва Лаплас барои ба даст овардани шарти устувории мавҷҳои статсионари СФГ истифода мешавад. Таҳлили бифуркатсионӣ дар наздикии нуқтаҳои сарҳади устуворӣ истифода шудаанд.

**Навоварихои илмӣ.** Ҳамаи натиҷаҳои илмии диссертатсия нав буда, характери назариявию амалӣ доранд ва аз инҳо иборатанд:

1. Истифодабарии усули Б.В.Новожилов барои муайян намудани суръати мавҷи СФГ асоснок карда шудааст.
2. Барои муайян намудани суръати мавҷи статсионари СФГ рафтори нав таҳия карда шудааст.
3. Тавсифи тақрибию аналитикии сохти мавҷи статсионари СФГ асоснок карда шудааст.



4. Усули нави баҳисобгирии диффузияи таркибаҳои омехтаи газ барои муайян кардани суръати мавҷи СФГ таҳия карда шудааст.
5. Вобастагии аналитикии ҳарорати оғозшавии реаксияи кимиёвӣ аз параметрҳои муҳити ковок ва омехтаи газҳо муайян карда шудаанд.
6. Якумин шуда ҳалли аналитикии масъалаи СФГ қад-қади характеристика ёфта шудааст.
7. Меъёри оғозшавии реаксияи кимиёвӣ ҳангоми талафшавии гарми аз соҳаи сӯзиш барои СФГ тасдиқ карда шудааст.
8. Самараноктарин усули ададӣ барои тадқиқи соҳти мавҷи статсионари СФГ асоснок карда шудааст.
9. Модели математикии якҳароратаи СФГ асоснок карда шудааст, ки дар ҳолатҳои хусусӣ, сӯзиши моддаи конденсионӣ ва сӯзиши ҳароратию диффузии газро тавсиф мекунад.
10. Якумин шуда формулаи ҳарорати максималии муҳити ковок, ки коэффитсиенти талафи гармӣ ва суръати воридшавии омехтаи газро дарбар мегирад ёфта шудааст.
11. Меъёрҳои устувории тӯлонӣ ва фазогии сатҳи СФГ асоснок карда шуданд.
12. Назарияи бифуркатсия ба сатҳи пулсаронаи СФГ татбиқ шудааст.

**Арзишҳои назариявӣ ва амалӣ.**

**Арзиши назариявии тадқиқот иборат аз ёфтани:**

- вобастагии байни градиенти ҳарорат ва консентратсияи таркибаи норасои газ;
- шарти симметрияи профилҳои ҳарорат ва консентратсияи таркибаҳои газ ва вобастагии байни онҳо;
- вобастагии функсионалии ҳарорати оғози реаксияи кимиёвӣ аз параметрҳо;
- ҳалли аналитикии масъалаи СФГ қад-қади характеристикаҳо;
- меъёри оғозшавии реаксияи кимиёвӣ ҳангоми талафи гармӣ аз соҳаи сӯзиш дар СФГ;
- шарти устувории тӯлонии сатҳи СФГ, ки алаҳхусус шарти ададан ёфташудаи сатҳи сӯзиши муҳити конденсиониро ифода мекунад;
- шарти устувории фазогии диффузию гармии сатҳи СФГ;
- ифодаҳо барои параметрҳои мавҷ аз рӯи бузургии хурд ва баҳо додани қиматҳои миёнаи параметрҳо.

**Арзиши амалии тадқиқот чунин аст:**

1. Ифодаҳои ошкори функцияҳои ҳарорати омехтаи газҳо, муҳити ковок ва концентратсия аз координата ба муҳандисон имкон медиҳанд, ки ҳангоми тарроҳӣ ва таҳияи таҷҳизоту дастгоҳҳо, ҳарорат ва тақсимои концентратсияро дар минтақаҳои сӯзиш бо осони ҳисоб кунанд.

2. Меъёри асоснокшудаи оғозшавии реаксияи химиявӣ ҳангоми СФГ имкон медиҳад, ки ҳарорати алангагирии омехта дар ҳолатҳои муайян пешгӯӣ карда шавад.

3. Пешгӯии ҳарорати максималии муҳити ковок вобаста ба параметрҳои система.

4. Натиҷаҳо барои таҳияи роҳҳои баланд бардоштани эътимоднокии оташнамонакҳо ва тавсияҳо оид ба устувории сатҳи сӯзиши филтронаи газҳо, моддаҳои конденсионӣ ва сӯзиши омехтаи газҳо бидуни муҳити ковок истифода бурдан мумкин аст.

5. Ба ғайр аз ин натиҷаҳо дар таҷрибаи истеҳсоли таҷҳизотҳои муосир, ки дар онҳо усулҳои дигари ҷойгиркунонии шӯъла дар муҳити ковок пешбинӣ шудааст, истифода бурдан мумкин аст.

#### **Муқарароти ба ҳимоя бароварда шаванда:**

1. Ёфтани таносубҳои гуногун барои муайян намудани суръати мавҷи статсионарии СФГ бо истифода аз равишҳои гуногун.

2. Усули таҳмини-аналитикӣ таҳияшуда барои тавсифи сохтори мавҷи статсионарии СФГ.

3. Усули нави баҳисобгирии паҳншавии таркибаҳои газ ҳангоми муайян намудани суръати мавҷи СФГ.

4. Вобастагии функсионалии ҳарорати оғозшавии реаксияи кимиёвӣ аз параметрҳои муҳити ковок ва омехтаи газҳо.

5. Ҳалли аналитикии масъалаи СФГ қад-қадӣ характеристикаҳо.

6. Таҳияи меъёри оғозшавии реаксияи кимиёвӣ ҳангоми талафи гармӣ аз соҳаи сӯзиш.

7. Усули ададии самарона барои тадқиқи сохти мавҷи статсионарии СФГ.

8. Модели математикии якҳароратаи СФГ таҳия ва асоснок карда шуда, ки дар ҳолати хусусӣ сӯзиши моддаи конденсионӣ ва сӯзиши ҳароратию диффузии ҳуди газро тавсиф мекунад.

9. Формулаи ҳарорати максималии муҳити ковок, ки коэффисиенти талафи гармӣ ва суръати воридшавии омехтаи газро ба таҷҳизот дарбар мегирад.

10. Шартҳои бо роҳҳои гуногун муайян кардашудаи устувории тӯлонӣ ва фазогии мавҷи СФГ.

11. Татбиқи назарияи бифуркатсия ба сатҳи лаппишхӯрандаи СФГ.

**Эътимоднокии** натиҷаҳои бадастомада бо он тасдиқ карда мешаванд, ки онҳо дар асоси дигаргуниҳо, табдилдиҳиҳо ва ташбеҳҳои таҳлилӣ ба даст оварда шуда, муқаррароти ҳозираи маълуми назариявӣ ва таҷрибавиро тасдиқ мекунад. Моделҳои баррасишуда ба қонунҳои бақои модда ва энергия асос ёфтаанд, ки эътимоднокии онҳо исбот шудаанд.

#### **Мувофиқати диссертатсия ба шиносномаи ихтисоси илмӣ.**

Кори диссертатсионӣ аз рӯи ихтисоси 05.13.18 – Амсиласозии математикӣ, методҳои ададӣ ва мучтамаъи барномаҳо иҷро шуда, пурра ба се банди соҳаи тадқиқоти он мувофиқ мебошад:

банди 1. Таҳияи нави усулҳои математикии моделсозии объектҳо ва ҳодисаҳо;

банди 2. Рушди сифатан баланд ва тақрибии усулҳои аналитикии тадқиқи моделҳои математики;

банди 4. Татбиқи усулҳои самараноки ададӣ ва алгоритмҳо, дар шакли маҷмӯаҳои барномаҳои ба мушкилот раван кардашуда, барои гузаронидани ҳисоби таҷрибавӣ.

**Саҳми шахсии унвонҷӯи дараҷаи илмӣ.** Мундариҷаи диссертатсия ва муҳтавои асосии он, ки ба ҳимоя пешниҳод мегарданд, саҳми шахсии муаллифро дар қорҳои нашршуда инъикос менамоянд. Ҳамаи натиҷаҳои дар диссертатсия пешниҳодшуда шахсан аз ҷониби муаллиф ба даст оварда шудаанд, ба ғайр аз якҷанд параграфҳо (§2.1, §2.2, §3.2, §3.3), ки дар онҳо ҳиссаи шогирдони унвонҷӯ ҷой дорад.

**Муҳокимаи натиҷаҳо.** Натиҷаҳои асосии илмии рисола дар баромадҳо ва ҷорабиниҳои илмии зерин муҳокима карда шуданд:

1. Съезди XII умумирусиягӣ оид ба масъалаҳои асосии механикаи назариявӣ ва амалӣ (19-24.08.2019);

2. Семинари илмии кафедраи “Волновая и газовая динамика”-и Донишгоҳи давлатии Москва ба номи М.В. Ломоносов, таҳти роҳбарии академик Р.И.Нигматулин (02.02.2019, 14.02.2011, 14.03.2011.);

3. IV Конфронти илмӣ амалии байналмилалӣ “Современное программирование” (ш. Нижневартовск, 08.12.2021);

4. Конфронси илмӣ амалии байналмилалӣ ба муносибати 30-солагии истиқлолияти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва 25-солагии Донишгоҳи славянии Русия ва Тоҷикистон «Роль Российско-Таджикского (Славянского) университета в

становлении и развитии науки и инновационного образования в Республике Таджикистан». Қисми 1, Душанбе, 15-16 октябри соли 2021;

5. Конфронси байналмилалии илмӣ "Физикаи моддаҳои конденсионӣ ва масъалаҳои марбута", бахшида ба 70-солагии профессор А.И.Филиппов (Стерлитамак, 2-5 ноябри соли 2019);

6. Конфронси байналмилалии илмӣ "Муодилаҳои интегралӣ сингулярӣ ва муодилаҳои дифференциалӣ бо коэффисиентҳои сингулярӣ", бахшида ба 70-солагии профессор Ҷангибеков (Душанбе, 30 - 31 январи соли 2020);

7. Семинари илмӣ оид ба сӯзиш ва азрозолҳои Институти кинетикаи кимиёвӣ ва сӯзиши ШС АИР таҳти роҳбарии В.С. Бабкин (11.12.2014);

8. Конфронси байналмилалии "Конфронси IX байналмилалии Воеводский оид ба физикаи химия дар равандҳои кимиёвӣ", ки ба садсолагии В.В. Воеводский бахшида шудааст (Новосибирск, ICKG SB RAS, 26.06.2017);

9. Семинари илмӣ Институти механикаи ба номи Р.Р.Мавлютова, Маркази илмӣ Уфои Академияи илмҳои Русия (Уфа, 01.06.2017);

10. Якум ва дуюм мактаб-конфронси тобистонаи "Гидродинамикаи физикӣ ва химиявӣ: моделҳо ва замимаҳо" (Донишгоҳи давлатии Бошқирдистон, 26.06.2016, 25-30 июни 2018);

11. Конфронси байналмилалӣ "Муодилаҳои дифференциалӣ ва мушкилоти марбута" (Стерлитамак, Ҷумҳурии Бошқирдистон, 25-29 июни 2018);

12. Конфронсҳои дуюм ва сеюм оид ба сӯзиши филтратсионӣ (Черноголовка, Институти масъалаҳои физикаи химиявӣ АИР, 11.11.2010, 21.06.2013);

13. Конфронси байналмилалии "Физикаи химиявӣ ва радиатсионӣ" бахшида ба 100-солагии О.И. Лейпунский (Москва, ИФХ АИР 25.08.2009);

14. Конфронси илмӣ шӯъбаи сӯзиш ва таркиши Институти физикаи химиявии Академияи илмҳои Русия таҳти роҳбарии С.М.Фролов (Москва, ИФХ АИР 01.2011);

15. Конфронси байналмилалӣ "Проблемаҳои муосири газ ва динамикаи мавҷҳо", бахшида ба хотираи академик Х.А.Рахматулин (Москва, Донишгоҳи давлатии Москва ба номи Ломоносов, 2009);

16. Конфронси байналмилалии MSS-09 "Табдилоти мавҷҳо, сохторҳои ҳамоҳанг ва турбулентӣ", ки ба академик Моисеев бахшида шудааст (Москва, ИТК АИР 23.11.2009);

17. Семинарҳои илмӣ факултаҳои физика, механика ва математикаи Донишгоҳи миллии Тоҷикистон (17.05.2014, 22.04.2015);

18. Семинари илмии Институти физикаю техникаи Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон (19.06.2013);
19. Съезди VIII умумирусиягӣ оид ба механикаи назариявӣ ва амалӣ (Пермь, 2001);
20. Конфронси байналмилалӣ "Масъалаҳои асосии физика" (Қазон, 13-18 июни 2005);
21. Конфронси байналмилалӣ илмӣ "Проблемаҳои муосири назарияи муодилаҳои дифференсиалӣ ва таҳлили математикӣ", бахшида ба 80-солагии академики Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тотористон А. Ҷӯраев (Душанбе 07.12.2012);
22. Конфронси байналмилалӣ илмӣ "Мушкилоти актуалии таҳлили математикӣ, муодилаҳои дифференсиалӣ ва информатика", бахшида ба 70-солагии академики Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тотористон З.Д. Усмонов (Душанбе, 24 августи 2007);
23. Конфронси байналмилалӣ илмӣ "Проблемаҳои муосири таҳлили математикӣ ва истифодаи онҳо", бахшида ба 60-солагии академики Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тоҷикистон К.Х. Бойматова (Душанбе, 21 июни 2010);
24. Конфронси байналмилалӣ оид ба физикаи моддаҳои конденсатор, бахшида ба 85-солагии академик А.А.Адхамов (Душанбе, 17.10.2013);
25. Конфронси байналмилалӣ илмӣ "Проблемаҳои муосири таҳлили математикӣ ва назарияи функсияҳо", бахшида ба 60-солагии академики Академияи илмҳои Ҷумҳурии Тотористон М.Ш. Шабозов (Душанбе, 28.06.2012);
26. Конфронси байналмилалӣ илмӣ "Проблемаҳои муосири математика ва татбиқи он", бахшида ба 70-солагии Аъзо-корреспонденти АИ РТ Э.М. Муҳаммадиев (Душанбе, 28 июни 2011);
27. Семинари байналмилалӣ илмӣ ва амалӣ "Масъалаҳои гидромеханика ва рушди гидроэнергетика, ободонии замин ва экология дар Осиёи Марказӣ", бахшида ба 75-солагии доктори илмҳои техникӣ, профессор М.А.Саттаров (Душанбе, 16 март 2013);
28. Даҳумин Мактаби байналмилалӣ термофизикӣ "Тадқиқоти термофизикӣ ва ченкунӣ дар назорати сифати моддаҳо, мавод ва маснуот" (Душанбе, 3.10.2016);
29. Конфронси байналмилалӣ илмӣ "Масъалаҳои актуалии математика ва татбиқи он" (Қўрғонтеппа, 06.10.2012);
30. Конфронсҳои ҷумҳуриявӣ (Ленинобод, 1990, Кўлоб, 1991, Душанбе, 1992, 1996, 1998, 2001, 2006-2008, 2014).

**Нашрияҳо дар мавзӯи рисола.** Дар мавзӯи рисола, муаллиф зиёда аз 70 нашрия, аз ҷумла 38 асар дар маҷаллаҳои тавсиянамудаи Комиссияи олии

аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Руссияи Федеративӣ нашр кардааст.

**Сохтори рисола.** Рисола аз муқаддима, панҷ боб, хулоса, чор замима, 56 расм, рӯйхати адабиётҳо ва маводи мусаввар иборат аст. Рисола дар 274 саҳифа, 302 истиноди библиографӣ пешниҳод шудааст.

**Калимаҳои калидӣ:** мавҷ, сӯзиш, омехтаи газҳо, муҳити ковок, суръат, шартӣ ноустуворӣ, оғози реаксия, ҳарорат, ҳарорати алангагирӣ, мавҷи статсионарӣ, сӯзиши филтрона, бифуркатсия, ҳарорати мувозинатӣ, суръати реаксия, диффузия, гармигузаронӣ, адади Люис.

### **Мазмуни мухтасари рисола**

Дар **муқаддима** мубрамияти мавзӯи тадқиқот, дараҷаи ба таври илмӣ коркарда шудаи мавзӯъ ва алоқамандии тадқиқот бо мавзӯҳои перспективӣ оварда шудаанд.

Дар қисми **шарҳи мухтасари кор** ҳадаф ва масъалаҳои тадқиқот, объект, мавзӯҳо ва усулҳои тадқиқот, навоариҳои илмӣ, арзишҳои назариявӣ ва амалӣ, муқарароти ба ҳимоя пешниҳод шаванда, дараҷаи эътимоднокӣ ва баромаду муҳокимаҳо дар чорабиниҳои илмӣ, маълумот оиди нашр ва ҳиссаи шахсии муаллиф дар тадқиқотҳои гузаронидашуда, инчунин сохтори рисола қайд шудааст.

**Боби якум** ба шарҳи адабиёт нисбати сӯзиши филтрона ва устуворона паҳншавии мавҷи сӯзиш дар муҳитҳои гунгун бахшида шудааст.

Чор параграфи аввали **боби дуюм** ба муодилаҳои асосии статсионарӣ ва ғайрестатсионарӣ якченакаи бақои энергия, масса ва интегралҳои якуми онҳо, инчунин ба муодилаи ҳолати газ ва гузориши масъалаи сӯзиши филтронаи газҳо дар муҳити ковоки инертии деформатсия нашаванда бахшида шудааст. Дар чор параграфи дигари ин боб аз моделҳои математики СФГ (дар режимҳои адиабатӣ) таносубҳои параметрҳо ҳосил карда шудаанд, ки барои ҳисоб кардани суръати мавҷи статсионарӣ лозиманд. Дар параграфи панҷум модели якҳарората дида баромада шудааст, ки баробарии ҳарорати муҳити ковок ва газро дарбар мегирад. Дар ин ҷо аввал вобастагии байни градиенти ҳарорат ва консентратсияи таркибаи омехтаи газ ёфта мешавад ва баъд ин вобастагӣ барои ёфтани таносуби параметрҳо дар муодилаи энергия истифода мешавад. Ин таносуб барои ҳисоб кардани суръати мавҷ бо усули Б.В.Новожилов (барои муҳити конденсионӣ) ҳосил карда шудааст. Дар параграфи шашум мубодилаи охириноки гармӣ байни муҳити ковок ва газ дида баромада шудааст ва вобастагии байни градиенти ҳарорат ва

концентратсияи таркибаи норасои омехтаи газ ёфта мешавад. Дар параграфи ҳафтум модели аналитики-тақрибии сохти мавҷи статсионари СФГ дида баромада шудааст, яъне модели тақрибии сохти мавҷ ба воситаи функсияҳои полиномиалию и экспоненциалии дар математика маълум буда тавсиф карда мешавад. Дар параграфи ҳаштуми боби дувум рафтори системаи муодилаҳои дифференсиалӣ дар нуқтаҳои махсус бо назардошти сусти гузаштани ректсияи кимиёвӣ тадқиқ карда шудааст.

**Боби сеюм** ба монандии профилҳои ҳарорати муҳити ковок ва концентратсияи таркибаҳои омехтаи газҳо, ҳароратҳои оғозшавии реактсияи кимиёвӣ ва инчунин барои ёфтани ҳалли аналитикии масъалаи алангагирии омехтаи газҳо дар муҳити ковоки инертӣ бахшида шудааст. Дар **параграфи якуми** боб модели СФГ оварда шудааст, ки муодилаҳои бақои гармиро дар муҳити ковок ва газ, муодилаҳои бақои массаи таркибаҳои омехтаи газ ва муодилаи ҳолати газро дар пешниҳоди доимӣ будани фишор дарбар мегирад. Дар **параграфи дуум** аз системаи беченак кунонидашуда меъёрҳои монандии профилҳои ҳарорати муҳити ковок ва концентратсияи таркибаҳои газ ва инчунин вобастагии ҳаттии онҳо ёфта шудаанд. Дар **параграфи сеюм** барои суръати мавҷи статсионарӣ таносубе ёфта шудааст (бо интегронидани муодилаи энергия), ки коэффисентҳои диффузияи таркибаҳои газро дар намуди адади Люис дарбар мегирад. Интеграл аз муодилаи энергия дар фарзияте гирифта мешавад, ки гармӣ дар соҳаи ниҳоят хурд чудо мешавад ва функсияҳои ҳарорат ва концентратсия, ки ба функсияи суръати реактсия дохил мешаванд аз ҳалли масъалаи сӯзиш дар соҳаи гармшавӣ гирифта мешаванд. Ба ғайр аз ин барои функтсияи аррениус дигаргуниҳои Д.А.Франк-Каменетский истифода мешавад. Дар параграфҳои навбатӣ аз гармӣ реаксионӣ омӯхта мешаванд. Яъне, дар **параграфи чорум** дар асоси модели духароратаи алангагирии омехтаи газҳо, формулаҳои гуногуни муайян кардани ҳарорати оғозшавии реактсияи кимиёвӣ, ки ба ҳолатҳои паҳншавии мавҷи СФГ мувофиқанд, ба даст оварда шудаанд. Барои ҳарорати муҳити ковок, ки дар он алангагирии омехтаи газ дар ковоки ба амал меояд, формула ба даст оварда шудааст. Инчунин, вобастагии ҳароратҳои муҳити ковок, омехтаи газҳо ва ҳиссаи таркибаи норасоии омехта аз вақт ва координата муайян карда шудааст. Дар **параграфи панҷум**, барои муайян намудани ҳарорати оғозшавии реактсияи кимиёвӣ дар муҳити ковок, таносуб ҳосил карда шудааст. Ин таносуб аз дида баромадани модели якҳароратаи якченакаи паҳншавии мавҷи статсионари СФГ дар режими ғайриадиабатӣ ёфта шудааст. Дар **параграфи шашум** таҳлили модели духарората дар фарзияте гузаронида мешавад, ки соҳаи

сӯзиш ҳамчун сатҳи кандашавӣ аст ва ҳалҳои соҳаҳои гармшавӣ ва релаксатсияи дохили дар сарҳадшон бо якдигар баста мешаванд. Суръати мавҷи статсионарӣ бошад аз таносубе, ки дар параграфи шаши боби ду (формулаи 2.6.7) оварда шудааст, муайян карда мешавад. Ба ғайр аз ин дар ин параграф графикҳои гуногуни ҳарорати муҳити ковок ва омехтаи газҳо дар ҳолати оғозшавии реактсияи кимиёвӣ ва инчунин ҳароратҳои баландтарин ва мувозинатӣ дар вобастагӣ аз таркиби омехта, диаметри зарраҳо ва гармигузаронандагӣ муҳити ковок оварда шудаанд. **Параграфи ҳафтуми** ин боб ба ҳалли аналитикии модели математикии аз гармӣ алангагирии омехтаи газҳо дар муҳити ковок бахшида шудааст. Ҳалле, ки аз вақт ва координатаи тӯлонӣ вобаста аст, ҳамчун профилҳои ҳарорати газ, муҳити ковок ва таркибаи норасои омехта ёфта шудаанд. Дар ин ҷо таносуб барои суръати мавҷи статсионарӣ муайян карда шудааст.

Дар **боби чорум** таҳлили ҳисобҳои ададии профилҳои ҳароратҳои муҳити ковок ва газ, вобастагҳои суръати мавҷ, ҳарорати баландтарин ва дарозии қисмҳои мавҷи сӯзиш аз параметрҳои муҳити ковок ва газ гузаронида шудааст. **Якум ва дуюм параграфҳои** боб ба ҳисобу таҳлили параметрҳои мавҷ барои омехтаи газҳои гидрогену ҳаво бахшида шудааст. Дар **параграфи сеюм** ҳисобҳои нисбати параметрҳои мавҷ барои омехтаи газҳои метану ҳаво гузаронида шудаанд. Таҳлили тағирёбии қачхатҳои вобастагии суръати мавҷ, ҳарорати баландтарини газ ва дарозии соҳаҳои гуногуни мавҷ аз параметрҳо гузаронида шудааст. Дар **параграфи чоруми** боб натиҷаи ҳисобкуниҳои параметрҳои мавҷ оварда шудаанд, ки онҳо ҳангоми доимӣ ва тағирёбанда будани зичии омехтаи газҳо ҳисоб карда шудаанд. **Параграфи панҷуми** боб ба маҷмӯаи барномаҳо барои ҳисобкунии параметрҳо ва сохти мавҷи статсионарии СФГ бахшида шудааст.

Дар **боби панҷум** устувории тӯлонӣ ва фазогии мавҷи статсионарии СФГ нисбати ғалаёнҳои хурди гармӣ омӯхта шудааст. Дар **параграфи якуми** боб гузориши математикии масъалаи устувории мавҷи статсионарӣ нисбати ғалаёнҳои хурди фазогӣ оварда шудааст. Дар **параграфи дуюми** боб устувории тӯлонии мавҷи статсионарии СФГ тадқиқ карда шудаат. Дар **параграфи сеюм** тадқиқи назариявии таъсири талафи гармӣ ба устувории тӯлонии мавҷи статсионарии СФГ гузаронида шудааст. **Параграфи чорум** ба таҳлили вобастагии аналитикии параметрҳо дар сарҳади хомӯшшавии СФГ бахшида шудааст. Дар **параграфи панҷум** устувории мавҷи статсионарӣ ба гармию диффузия дар якҷоягӣ дар чорҷубаи рафторе, ки суръати реактсияи кимиёвӣ бо  $\delta$ -функсия иваз карда шудааст омӯхта мешавад. Дар **параграфи шашум** устувории мавҷи статсионарӣ



ба ғалаёнҳои хурди гармии фазогӣ ҳангоми иваз кардани суръати реаксияи кимиёвӣ бо функсияи қисман доимӣ дида баромада шудааст. Дар **параграфи ҳафтум боб** устувории мавҷи статсионарӣ ба ғалаёнҳои хурди фазогӣ ҳангоми талафи гармӣ ба гирду атроф ва ночиз будани диффузияи таркибаи норасо омӯхта шудааст. Дар **параграфи ҳаштуми боб** бо истифодабарии дигаргункуниҳои Фуре ва Лаплас ба муодилаи хаттикунонидашуда бақои гармӣ, шарти устувории сатҳи сӯзиш дар режими ғайриадиабатӣ ёфта шудааст. Дар **параграфи нухум** таносуби параметрҳо дар сарҳади ноустуворӣ дар асоси рафтори Я.Б.Зельдович ба даст оварда шудааст. Ин рафтор чунин аст: ҳарорати баландӣ даргирӣ, ки ба меъёри талафоти гармӣ мувофиқат мекунад аз ҳарорати адиабатӣ ба як интервали характериҳои ҳарорат фарқ мекунад. Дар **параграфи даҳум** устувории ғайри хаттии мавҷи статсионарии СФГ дар асоси усули бифуркатсионӣ омӯхта мешавад.

## ХУЛОСА

Моделсозии математикии мавҷи статсионарии СФГ, устувории он гузаронида, усули самараноки ададии ҳисоби сохти мавҷ, параметрҳои он амалӣ гардонида шуд ва дар охир чунин хулоса карда шуд:

1. Татбиқи рафторҳои мавҷуд будаи муайянкунии таносубҳо барои ёфтани суръати мавҷи СФГ нишон дода шуд (Б.В.Новожилов; А.П.Алдушин ва А.Г.Мержанов) ва рафтори худии унвонҷӯ таҳия карда шуд, ки таносуб коэффисенти мубодилаи гармиро дарбар мегирад.
2. Усули самараноки ададӣ барои ҳалли масъалаи сохти мавҷи статсионарии СФГ асоснок карда шуд. Ин усули Рунге-Куттаи аниқлаш дараҷаи чорум мебошад.
3. Тавсифи тақриби-аналитикии сохти мавҷи статсионарии СФГ асоснок карда шуд, мувофиқи он профилҳои ҳарорати муҳити ковок ва газ, ва инчунин, профили концентратсияи таркибаи норасо бо функсияҳои полиномиалию экспоненсиалӣ дар соҳаҳои гармшавӣ, сӯзиш ва релаксатсияи дохили иваз карда мешаванд.
4. Модели математикии нави якҳароратаи СФГ пешниҳод ва асоснок карда шуд, ва он дар ҳолатҳои хусусӣ, сӯзиши моддаи коденсионӣ ва гарми-диффузиони газро тавсиф мекунад.
5. Якумин шуда усули ба қайд гирифтани диффузияи таркибаҳои омехта барои муайян намудани суръати мавҷи статсионарии СФГ таҳия карда шуд.

6. Якумин шуда бо тарзи аналитикӣ вобастагии функционалии ҳарорати оғозшавии реаксияи кимиёвӣ аз коэффисенти мубодилаи гармӣ байни муҳити ковоку газ ёфта шуд.
7. Якумин шуда ҳалли аналитикии масъалаи СФГ қад-қади характеристикаҳо ба даст оварда шуд.
8. Барои СФГ идеяи меъёри даргирии омехта, ки дар асоси он ҳарорати даргирӣ вобаста аст аз нисбати вақтҳои гузариши реаксияи кимиёвӣ ва талафи гармӣ ба гирду атроф тасдиқ карда шуд.
9. Бо тарзи аналитикӣ шарти пулсарона сӯхтани моддаи конденсионӣ тасдиқ карда шуд ва ин тарз барои ёфтани шарти пулсарона паҳншавии СФГ истифода шуд.
10. Рафтори Г.И.Баренблатт, Я.Б.Зельдович, А.Г.Истратов нисбати тадқиқи қонуниятҳои устувории мавҷи статсионарии СФГ дар ҳолати диффузионаю гармӣ паҳншавии мавҷ асоснок карда шуд.
11. Истифодабарии рафтори В.С.Берман, В.Н.Курдюмов нисбати тадқиқи устувории фазогии мавҷи статсионарии СФГ асоснок карда шуд (дар ин ҷо функсияи суръати реаксияи кимиёвӣ бо функсияи қисматан доимӣ иваз карда мешавад).
12. Истифодабарии усули ғалаёнҳои хурд нисбати тадқиқи қонуниятҳои устувории фазогии мавҷи статсионарии СФГ ҳангоми талафи гармӣ асоснок карда шуд.
13. Якумин шуда формулаи ҳарорати баландтарини муҳити ковок ҳангоми талафи гармӣ ба гирду атроф ва бо суръат ҳаводихии омехта ба блоки ковок ёфта шуд.
14. Истифодабарии дигаргункуниҳои Фуре ва Лаплас дар масъалаҳои устувории мавҷи статсионарии СФГ асоснок карда шуд.
15. Истифодабарии назарияи бифуркатсия ба пулсарона паҳншавии стаҳи СФГ асоснок карда шуд.

Тадқиқотҳои гузаронидашуда назарияи мавҷҳои статсионарии СФГ-ро дар режимҳои пастсуръата пурра мекунад.

### **Тавсияҳо оид ба истифодаи амалии натиҷаҳо**

Натиҷаҳои дар поён овардашаванда, метавонанд ҳамчун мавзӯҳои курсҳои махсус оиди сӯзиши филтронаи газҳо истифода шаванд:

- ёфтани вобастагиҳои градиенти ҳарорат бо консентратсияи таркибаи газ;

- ёфтани шарти симметрии профилҳои ҳарорат ва консентратсияи таркибаҳои газ ва алоқамандии онҳо;
- ёфтани вобастагиҳои аналитикии ҳарорати оғозшавии реактсияи кимиёвӣ аз коэффисиентӣ мубодилаи гармӣ байни муҳити ковоку газ ва дигар параметрҳо;
- ёфтани ҳалҳои аналитикии масъалаи СФГ қад-қади характеристикаҳо;
- ёфтани меъёрҳои оғозшавии реактсияи кимиёвӣ ҳангоми талафи гармӣ аз соҳаи сӯзиш;
- ёфтани шартҳои устувории тӯлонии сатҳи СФГ, ки дар ҳолати хусусӣ, режимӣ пулсарона сӯхтани муҳити конденсиониро маънидод намояд.
- ёфтани шартҳои устувории фазогии сатҳи СФГ ҳангоми диффузионӣ ва гармӣ паҳншавии мавҷ.

Ба ғайр аз ин, аҳамияти кор бо он муайян карда мешавад, ки натиҷаҳои ба даст оварда шуда зарур ва барои тартиб додани роҳҳои баланд бардоштани эътимоднокии аловхомушқунакҳо ва тавсияҳо оид ба устувории фронтҳои СФГ, муҳити конденсатсионӣ ва сӯзиши омехтаи газҳо бе муҳити ковок истифода мешаванд.

## РҶҶҲАТИ ИНТИШОРОТИ ДОВТАЛАБИ ДАРАЧАИ ИЛМӢ

### Монографияҳо:

**Кабиров М.М., Халимов И.И.** Теория горения. Монография/М.М.Кабиров, И.И. Халимов – Душанбе: РТСУ, 2022. - 218 с.

**Мақолаҳои, ки дар маҷаллаҳои тақризишавандаи аз ҷониби Комиссияи олии аттестатсионии назди Президенти Ҷумҳурии Тоҷикистон ва Комиссияи олии аттестатсионии назди Вазорати маориф ва илми Федератсияи Россия тавсияшуда нашр шудаанд:**

- [1-А]. Кабиров, М.М. Исследование диффузионно-тепловой устойчивости волн фильтрационного горения газов в инертной пористой среде / М.М. Кабиров // Физика горения и взрыва. – 2012. – №1. – С.3-13.
- [2-А]. Кабиров, М.М. О неустойчивости фронта фильтрационного горения газов в неадиабатическом режиме / М.М. Кабиров // Физика горения и взрыва. – 2012. – №2. – С.15-23.
- [3-А]. Кабиров М.М. Аналитическое решение модельной задачи фильтрационного горения газов /М.М. Кабиров, О.А. Холов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т.62, №1-2. – С.31-36.
- [4-А]. Кабиров М.М. Особенности сверхадиабатического режима горения метано-воздушной смеси в инертной пористой среде / М.М. Кабиров, И.И. Халимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т.62, №3-4. – С.159-165.
- [5-А]. Кабиров М.М. Приближенно-аналитическое решение модельной задачи фильтрационного горения газов /М.М. Кабиров, О.А. Холов // Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2018. – Т.61, №2. – С.134-139.
- [6-А]. Кабиров М.М. Сверхадиабатический режим горения водородо-воздушной смеси в инертной пористой среде/М.М. Кабиров, И.И. Халимов// Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2018. – Т.61, №3. – С.241-249.

- [7-А]. Кабилов М.М. Математическая модель фильтрационного горения газов при подобии распределения температуры и концентрации/М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Б.Дж. Гулбоев, О.А. Холов// Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2017. – Т. 60, №9. – С.402-409.
- [8-А]. Кабилов М.М. Применение классической теории горения газов к определению скорости стационарной волны фильтрационного горения газов/М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Б.Дж. Гулбоев, О.А. Холов// Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2017. №1/5.–С.78-83.
- [9-А]. Кабилов М.М. Фильтрационное горение водородо-и метановоздушных смесей с учётом значений коэффициентов диффузии компонентов /М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Б.Дж. Гулбоев, А.С. Баротов // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2017. №1/5. – С.226-229.
- [10-А]. Кабилов М.М. Скорость стационарной волны фильтрационного горения газов при подобии полей температуры и концентрации/ М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Б.Дж. Гулбоев, О.А. Холов// Труды Института механики им. М.М. Мавлютова. Уфимский центр РАН, Уфа. – 2017. – Т. 12, № 1. – С. 27–32.
- [11-А]. Кабилов, М.М. Структура стационарных волн фильтрационного горения газов в инертной пористой среде/ М.М. Кабилов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – Т. 57, №2. – С.109-115.
- [12-А]. Кабилов, М.М. Влияние теплотерь и диффузии компонентов газовой смеси на распространение волны горения в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев // Известия Академии наук Республики Таджикистан. – 2014. – № 4(157). – С.59-67.
- [13-А]. Кабилов, М.М. Фильтрационное горение газов при симметричности профилей температуры пористой среды и концентрации компонентов

- газовой смеси / М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев // Доклады Академии наук республики Таджикистан. – 2013. – Т. 56, № 1. – С.35-43.
- [14-А]. Кабилов, М.М. Численное моделирование фильтрационного горения газов при симметричности профилей температуры и концентрации компонентов / М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев, П.Б. Садриддинов, И.Х. Халимов // Известия Академии наук Республики Таджикистан. – 2013. – № 1(150). – С.67-75.
- [15-А]. Кабилов, М.М. Численное исследование стационарной структуры волны фильтрационного горения газов при наличии теплопотерь / М.М. Кабилов, И.Х. Халимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2013. – Т. 56, № 4. – С.297-304.
- [16-А]. Кабилов, М.М. Тепловое инициирование химической реакции в инертной пористой среде. / М.М. Кабилов, И.Х. Халимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2013. – Т. 56, № 5. – С.376-380.
- [17-А]. Кабилов, М.М. Температура инициирования химической реакции в волне фильтрационного горения газов при наличии теплоотвода / М.М. Кабилов, И.Х. Халимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2013. Т. 56, № 6. – С.445-449.
- [18-А]. Кабилов, М.М. Горение метановоздушной смеси в инертной пористой среде/М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев// Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2013. – №1. – С.92-96.
- [19-А]. Кабилов, М.М. Численный расчёт характеристик стационарной волны фильтрационного горения метановоздушной смеси/М.М. Кабилов, И.Х. Халимов, Б.Дж. Гулбоев // Вестник Таджикского национального университета. Серия естественных наук. – 2013. – №1/1(102). – С.116-121.
- [20-А]. Кабилов, М.М. Численное определение структуры и характеристики стационарной волны фильтрационного горения газов / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, И.Х. Халимов // Известия Академии наук республики

Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических наук. – 2011. – №1(142). – С. 47-54.

- [21-А]. Кабилов, М.М. Исследование процесса распространения фронта фильтрационного горения газов / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. - 2010. - Т. 53, № 4. - С. 272-278.
- [22-А]. Кабилов, М.М. Скорость распространения фронта горения смеси газов в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2009. – Т. 52, № 6. – С. 443-448.
- [23-А]. Кабилов, М.М. Фильтрационное горение газов в инертной деформируемой пористой среде / М.М. Кабилов // Известия Академии наук Республики Таджикистан. Отделение физико-математических, химических, геологических наук. – 2007. - № 3(128). - С. 22-28.
- [24-А]. Кабилов М.М. Применение теории бифуркаций к пульсирующему распространению фильтрационного горения газов / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов, Б.К. Шокиров // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2006. - Т. 49, №4. – С. 131-137.
- [25-А]. Кабилов, М.М. Установление устойчивости стационарного горения с использованием преобразования Фурье и Лапласа / М.М. Кабилов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2002. – Т. 45, № 10. – С. 102-107.
- [26-А]. Кабилов, М.М. Об устойчивости стационарного фронта горения в инертной пористой среде при фильтрации смеси газов / М.М. Кабилов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 1999. – Т. 42, № 8. – С. 82-87.
- [27-А]. Кабилов, М.М. Влияние теплотерь на устойчивость стационарных волн при фильтрационном горении газов / М.М. Кабилов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 1997. – Т. 40, № 9-10. – С. 82-88.

- [28-А]. Кабилов, М.М. Определение условия устойчивого распространения фронта пламени при фильтрации смеси газов / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. –1994. –Т. 37, № 2.– С.14-16.
- [29-А]. Кабилов, М.М. Параметрическая зависимость скорости распространения волны горения и скорости вынужденной фильтрации смеси газов в инертных пористых средах / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 1993. – Т. 36, № 2. – С. 177-181.
- [30-А]. Кабилов, М.М. К теории фильтрационного горения газов в пористых средах / М.М. Кабилов, П.Б. Вайнштейн // Известия Академии наук Таджикской ССР. Отделение физико-математических, химических, геологических наук. – 1992. – №3. – С. 55-59.
- [31-А]. Кабилов М.М. Основные характеристики волны горения пропановоздушной смеси в моделях фильтрационного горения газов /М.М.Кабилов, А.С.Баротов // Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2019. – Т.62, №7-8. – С.418-424.
- [32-А]. Кабилов М.М. Численное исследование фильтрационного горения газов при обобщённом числе Льюиса/М.М.Кабилов,О.А.Холов//Доклады Академии наук Республики Таджикистан, 2020 г. Том 63, №5-6. С.24-27.
- [33-А]. Кабилов М.М. Тепловое воспламенение смеси газов в инертной пористой среде/М.М.Кабилов//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2022. – Т. 65. – №1-2. – С. 24-27.
- [34-А]. Кабилов М.М. Аналитическое решение математической модели теплового воспламенения смеси газов в инертной пористой среде/М.М.Кабилов// Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2022. – Т. 65. – №2. – С. 57-62.
- [35-А]. Кабилов М.М. Сравнительный анализ основных параметров волны горения пропано-воздушной смеси в двух моделях фильтрационного горения газов



/М.М.Кабиров, П.Б.Садриддинов, А.С.Баротов//Доклады Академии наук Республики Таджикистан. – 2022. – Т. 65. – №2. – С. 57-62.

[36-А].Кабиров М.М. Влияние температурной зависимости коэффициентов переноса на параметры волны горения в двух моделях фильтрационного горения газов /М.М.Кабиров., А.С.Баротов//Известия Академии наук Республики Таджикистан, Отделение физико-математических, химических и технических наук. – 2022. – №3(189). – С. 88-92.

[37-А].Kabilov M. M. Diffusion-thermal stability of gas filtration combustion waves in an inert porous medium/M.M.Kabilov//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2012. – V.48. – N. 1. – P. 10–16.

[38-А].Kabilov M. M. Instability of the front of filtration combustion of gases in the nonadiabatic regime/M.M.Kabilov//Combustion, Explosion, and Shock Waves. – 2012. – V.48. – N. 3. – P. 136–143.

#### **Маводи конференсияҳо ва фишурдаи маърузаҳо:**

[39-А].Кабиров М.М. Численное решение модельной задачи фильтрационного горения газов при обобщённом числе Льюиса/ М.М. Кабиров, О.А.Холов // Журнал«Многофазные системы»,УФА.2020.№1-2.DOI:10.21662 / mfs 2020.1

[40-А].Кабиров М.М. Волна фильтрационного горения газов при диффузии компонентов в зоне горения/М.М.Кабиров, Б.Дж.Гулбоев // Журнал «Многофазные системы», УФА. 2020. №1-2.DOI:10.21662/mfs2020.1

[41-А].Кабиров М.М. Стабилизация волны фильтрационного горения газов в инертной пористой среде/М.М.Кабиров//Материалы международной научной конференции «Сингулярные интегральные уравнения и дифференциальные уравнения с сингулярными коэффициентами» Таджикистан, Душанбе, 30-31 января 2020 г. С.150-154.

[42-А].Кабиров М.М., Холов О.А. Исследование модельной задачи ФГГ классическим методом /М.М.Кабиров, О.А.Холов // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной

механики. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 19-24 август 2019 г.  
Секция II-4. С.218-220.

[43-А]. Кабилов М.М., Халимов И.И. Режимы ФГГ в эквивалентной модели // XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Уфа, Республика Башкортостан, Россия, 19-24 август 2019 г. Секция II-4. С.80-82.

[44-А]. Кабилов М.М. Численный расчёт структуры нестационарной волны фильтрационного горения газовоздушной смеси/М.М. Кабилов// Материалы международной конференции «Современные проблемы и приложения алгебры, теории чисел и математического анализа». Душанбе, ИМ АН РТ, 2019. С.130-135.

[45-А]. Кабилов М.М., Халимов И.И. Фильтрационное горение метаноокислородной смеси/ М.М. Кабилов, И.И.Халимов // Материалы международной научной конференции «Физика конденсированного состояния и смежные проблемы» Республика Башкортостан, Россия, г. Стерлитамак, 2 октября 2019 г. С.170-173.

[46-А]. Кабилов М.М. Частное решение модельной задачи фильтрационного горения газов при произвольном числе Льюиса/ М.М. Кабилов, О.А.Холов //Второй всероссийской школы конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения» 25-30 июня 2018 г., с.52.

[47-А]. Кабилов М.М. Сверхадиабатический режим фильтрационного горения водородо-воздушной смеси/ М.М. Кабилов, И.И.Халимов //Международная конференция «Дифференциальные уравнения и смежные проблемы» 25 – 29 июня 2018 г., г. Стерлитамак, Республика Башкортостан. С.93-96.

[48-А]. Кабилов М.М. «Околостационарное решение эквивалентной модели процесса фильтрационного горения газов»/ М.М. Кабилов// Международная научная конференция "Современные проблемы математики и её приложений" посвящённой 70-летию со дня рождения академика Академии

наук Республики Таджикистан, доктора физико-математических наук, профессора Илолова Мамадшо Илоловича (Душанбе, 14-15 марта, 2018 г.). С.165-166.

- [49-A].Kabilov, M.M. Analitical solution of the nonstationary problem of filtration combustion of gases / M.M. Kabilov, P.B. Sadriddinov, B.J. Gulboev, I.I. Khalimov // IX International Voevodsky Conference Physics Chemistry of Elementary Chemical Processes, Novosibirsk. – June 25-30 2017. – P.67-68.
- [50-A].Кабилов, М.М. Стационарная скорость волны фильтрационного горения газов при подобии полей температуры и концентрации / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Б.Дж. Гулбоев, О.А. Холов // VI Российская конференция «Многофазные системы: модели, эксперименты, приложения» и школы молодых ученых «Газовые гидраты – энергия будущего», Уфа. – 26-30 июня 2017. – С. 49.
- [51-A].Кабилов, М.М. Фильтрационное горение газов с позиции классической теории горения / М.М. Кабилов // Сборник трудов Первой летней школы-конференции «Физико-химическая гидродинамика: модели и приложения», Уфа. – 26-29 июня 2016. – С. 77-85.
- [52-A].Kabilov, M.M. Influence of heat losses for speed wave of filtration combustion of gases under symmetric profiles of temperature and concentrations of the components / M.M. Kabilov // Международная конференция «Мемориал Я.Б.Зельдовича» посвящённая 100 - летию со дня рождения академика Я.Б.Зельдовича, Москва. – 27-31 октября 2014. – С. 104-105.
- [53-A].Кабилов, М.М. Скорость волны и максимальная температура при горении водородо-воздушной смеси газов в инертной пористой среде/ М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев // Учёные записки. Современные проблемы математики и её преподавания, Худжанд. –2014. – №2(29), Ч.1. –С. 348-351.
- [54-A].Кабилов, М.М. Зависимость скорости волны фильтрационного горения газов от коэффициентов диффузии компонентов смеси газов / М.М.

- Кабилов, Б.Дж. Гулбоев // Сборник научных статей по итогам международной научно-практической конференции, Санкт-Петербург.–27-28 февраля 2014. –С.77-79.
- [55-А].Кабилов, М.М. Фильтрационное горение газов в инертной пористой среде при диффузии компонентов газовой смеси / М.М. Кабилов, Б.Дж. Гулбоев // Третья конференция по фильтрационному горению, Черногловка. – 18-21 июня 2013. – С. 92-96.
- [56-А].Кабилов, М.М. Тепловое воспламенение смеси газов в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, И.Х. Халимов // Третья конференция по фильтрационному горению, Черногловка. – 18-21 июня 2013. – С. 97-99.
- [57-А]. Кабилов, М.М. Пространственная устойчивость волн ФГГ при замене скорости химической реакции ступенчатой функцией / М.М. Кабилов // Вторая конференция по фильтрационному горению, Черногловка. – 11-15 октября 2010. – С. 69-72.
- [58-А].Кабилов, М.М. Пространственная устойчивость неадиабатических волн фильтрационного горения газов / М.М.Кабилов // Международная конференции «Химическая и радиационная физика», посвященной 100-летию О.И. Лейпунского, Москва, Черногловка. – 2009. – С.157-160.
- [59-А].Кабилов, М.М. Скорость распространения фронта ФГГ в инертной пористой среде / М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов // Международная конференции «Химическая и радиационная физика», посвященной 100-летию О.И. Лейпунского, Москва, Черногловка. – 2009. – С.165-168.
- [60-А].Кабилов М.М. Скорость фронта ФГГ в модели воспламенения /М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов, П.Б.Садриддинов // Международная конференция MSS-14 «Трансформация волн, когерентные структуры и турбулентность», Москва. – 23 ноября 2009. – С.462-467.
- [61-А].Кабилов, М.М. Параметры волн фильтрационного горения газов на границе устойчивости / М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Н.И. Фатхуллоев //

- Международная конференция «Современные проблемы газовой и волновой динамики» посвященной к 100-летию со дня рождения академика Х.А. Рахматулина, Москва. – 21 апреля 2009. - С. 45-46.
- [62-А]. Кабилов М.М. О пространственной устойчивости стационарного режима фильтрационного горения газов/М.М. Кабилов, П.Б. Садриддинов, Б.К. Шокиров//Материалы международной научной конференции «Актуальные вопросы математического анализа, дифференциальных уравнений и информатики» посвященной 70-летию академика Академии наук Республики Таджикистан Усманова Зафара Джураевича. Душанбе. – 24-25 августа 2007. – С.47-49.
- [63-А]. Кабилов, М.М. Применение теории бифуркаций к пульсирующему распространению фильтрационного горения газов /М.М. Кабилов, Ф.Х. Хакимов, Х.Х. Муминов, Б.К. Шокиров // III Международная конференция «Фундаментальные вопросы физики», Казань. - 13-18 июня 2005. - С. 51-52.
- [64-А]. Кабилов М.М. К теории фильтрационного горения газов /М.М. Кабилов//Материалы республиканской научно-практической конференции молодых ученых и специалистов Таджикистана. –Тезисы докладов. Ленинабад, 1990. – С.171-173.
- [65-А]. Кабилов М.М. Исследование особых точек системы дифференциальных уравнений/М.М. Кабилов//Тезисы докладов республиканской научной конференции “Дифференциальные уравнения и их приложения”. Куляб. – 1991. – С. 80-81.
- [66-А]. Кабилов М.М. Определение скорости распространения волны горения в инертных пористых средах/М.М. Кабилов.–Деп. в ТаджНИНТИ. – №7(796) –Та92. – Вып. 2. – 7 с.
- [67-А]. Кабилов М.М. Влияние теплотерь на распространение фронта пламени/М.М. Кабилов//VIII Всероссийский съезд по теоретической и прикладной механике. Пермь. –23-29 август 2001.

- [68-А]. Кабилов М.М. Программный комплекс для сравнения основных параметров фильтрационного горения пропано-воздушной смеси /М.М.Кабилов, И.И.Халимов, О.А.Холов, А.С.Баротов//Материалы IV международной научно-практической конференции “Современное программирование”. Россия, г.Нижевартовск, 08.12.2021 г. С.186-191.
- [69-А]. Кабилов М.М. Компьютерное моделирование фильтрационного горения газов/М.М.Кабилов, И.И.Халимов, З.Б.Шерматова//Материалы Международной научно-практической конференции посвящённой 30-летию независимости РТ и 25-летию РТСУ «Роль Российско-Таджикского (Славянского) университета в становлении и развитии науки и инновационного образования в Республике Таджикистан» Часть I, Душанбе, 15-16 октября 2021 г. С. 46-52.
- [70-А]. Кабилов М.М. Горение пропановоздушной смеси в эквивалентной модели фильтрационного горения газов//Материалы международной научной конференции «Сингулярные интегральные уравнения и дифференциальные уравнения с сингулярными коэффициентами» Таджикистан, Душанбе, 30-31 января 2020 г. С.154-158.
- [71-А]. Кабилов М.М. Воспламенение смеси газов в инертной пористой среде/ М.М.Кабилов, А.С.Баротов//Материалы республиканской научно-практической конференции, посвящённой двадцатилетию изучения и развития естественных, точных и математических наук «Актуальные вопросы естественных наук и технологий». РТСУ. Душанбе, 28 октября 2020г. С 136-138.

Муаллиф ба роҳбари илмӣ ва мушовири худ, академики Академияи илмҳои Русия Р.И.Нигматулин ва профессор В.С.Бабкин барои кӯмак ва дастгирии ҳамешагӣ дар гузаронидани ин тадқиқот миннатдории самимӣ баён мекунад.

## АННОТАЦИЯ

диссертации Кабилова Маруфа Махмудовича на тему “Математическое моделирование стационарных волн фильтрационного горения газов и их устойчивости”, представленной на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 05.13.18 – Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ.

**Ключевые слова:** волна, горение, газовая смесь, пористая среда, скорость, установившаяся волна, условие неустойчивости, начало реакции, температура, температура воспламенения, стационарная волна, фильтрационное горение, бифуркация, равновесная температура, скорость реакции, диффузия, теплопроводность, число Льюиса.

**Объектом** исследования является стационарные волны ФГГ в инертной пористой среде в режимах низких скоростей.

**Цель исследования:** Основной целью настоящего диссертационного исследования является аналитическое и численное моделирование характеристик и структуры стационарных волн ФГГ в режимах низких скоростей, разработка теплодиффузионной модели ФГГ, моделирование воспламенения газа в инертной пористой среде и выработка критериев продольной и пространственной устойчивости фронта ФГГ по отношению к малым возмущениям.

**Научная новизна.** Все основные результаты диссертации являются новыми, представляют теоретический и практический интерес и состоят в следующем:

1. Выведены соотношения по определению скорости стационарной волны ФГГ.
2. Разработана и обоснована однотемпературная математическая модель ФГГ, в частности, описывающая горение конденсированных сред и теплодиффузионное горение газа без пористой среды.
3. Выбран и обоснован численный метод в исследовании структуры стационарной волны ФГГ.
4. Разработан и обоснован аналитически приближенный метод описания структуры стационарной волны ФГГ.
5. Разработана и обоснована критерия инициирования волны химической реакции при ФГГ.
6. К пульсирующему фронту ФГГ применена теория бифуркации.
7. Впервые получена формула максимальной температуры пористой среды при наличии теплопотерь и скорости вдува смеси к пористому блоку.
8. Разработан и обоснован новый метод учета диффузии компонентов смеси газов при определении основных характеристик волны ФГГ.
9. Определены условия продольной и пространственной устойчивости волн ФГГ.
10. Разработан и обоснован аналитически приближенный метод описания структуры нестационарной волны ФГГ.

**Практическая ценность** исследования заключается в следующем:

– Явные выражения функции температуры смеси газов, пористой среды и концентрации от координаты и времени позволяют инженерам легко рассчитать распределения температуры и концентрации в зонах горения при конструировании и разработки оборудования и устройств.

– Разработанная и обоснованная критерия инициирования волны химической реакции при ФГГ позволяет предсказать температуру воспламенения смеси в тех или иных случаях.

– В предсказании максимальной температуры пористой среды в зависимости от параметров системы.

– Полученные результаты могут быть использованы при формулировке способов повышения надёжности огнепреградителей и рекомендации об устойчивости фронтов фильтрационного горения газов, конденсированных сред и горения смеси газов без пористой среды.

– Полученные результаты также могут быть использованы в практике 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).

**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;

– зависимостей температуры инициирования химической реакции от коэффициентов межфазного теплообмена и теплоотдачи в окружающую среду;

– условия продольной устойчивости фронта фильтрационного горения газов, в частности, аппроксимирующего пульсирующий режим горения конденсированных сред;

– условия диффузионно-пространственной устойчивости фронта фильтрационного горения газов;

– аналитического решения нестационарной задачи ФГГ.



## АННОТАТСИЯ

**ба диссертатсияи Қобилов Маруф Махмудович “Моделсозии математикии мавҷҳои статсионари сӯзиши филтронаи газҳо ва устувори онҳо” барои дарёфти дараҷаи илмии доктори илмҳои физикаю математика аз рӯи ихтисоси 05.13.18 – “Амсиласозии математикӣ, методҳои ададӣ ва мучтамаъи барномаҳо” пешниҳод шудааст**

**Калимаҳои калидӣ:** мавҷ, сӯзиш, омехтаи газҳо, муҳити ковок, суръат, мавҷи устувор, шартҳои ноустуворӣ, оғози реактсия, ҳарорат, ҳарорати алангагирӣ, мавҷи статсионарӣ, сӯзиши филтрона, бифуркатсия, ҳарорати мувозинатӣ, суръати реактсия, диффузия, гармигузаронӣ, адади Люис.

Мақсади тадқиқот. Мақсади асосии тадқиқоти диссертатсионӣ ин моделсозии аналитикӣ ва ададии параметрҳои мавҷ ва сохтори мавҷҳои статсионари СФГ дар ҳолатҳои пасти суръати паҳншавии сатҳи сӯзиш, таҳияи модели гармию диффузии СФГ, моделсозии алангагирии газ дар муҳити ковок ва таҳияи меъёрҳои устувори тӯлонӣ ва фазогии сатҳи СФГ нисбат ба иловаҳои хурд мебошад.

**Навоариҳои илмӣ.** Ҳамаи натиҷаҳои илмии диссертатсия нав буда, характери назариявӣ амалӣ доранд ва аз инҳо иборатанд:

1. Барои муайян намудани суръати статсионари мавҷи СФГ таносубҳо ҳосил карда шудаанд.

2. Модели математикии якҳароратаи СФГ таҳия ва асоснок карда шудааст, алахусус барои сӯзиши моддаи конденсионӣ ва сӯзиши ҳароратию диффузии газ бидуни муҳити ковок тавсифкунанда мебошад.

3. Усули таҳмини-аналитикии тавсифи сохтори мавҷи статсионари СФГ таҳия ва асоснок карда шудааст.

4. Усули ададии тадқиқи сохтори мавҷи статсионари СФГ интихоб ва асоснок карда шудааст.

5. Меъёри оғози реаксияи химиявӣ ҳангоми СФГ таҳия ва асоснок карда шудааст.

6. Назарияи бифуркатсия ба сатҳи СФГ татбиқ карда шудааст.

7. Бори аввал формулаи ҳарорати максималии муҳити ковок ҳангоми талафи гармӣ ва суръати воридшавии омехтаи газҳо ба даст оварда шудааст.

8. Усули нави баҳисобгирии диффузияи таркибаҳои омехтаи газ ҳангоми муайян кардани характеристикаҳои асосии мавҷи СФГ таҳия ва асоснок карда шудааст.

9. Шартҳои устувори тӯлонӣ ва фазогии мавҷи СФГ муайян карда шудааст.

10. Усули таҳмини-аналитикии тавсифи сохтори мавҷи ғайримуқарарии СФГ таҳия ва асоснок карда шудааст.

**Арзиши амалии тадқиқот чунин аст:**

1. Ифодаҳои ошкори функсияҳои ҳарорати омехтаи газҳо, муҳити ковок ва концентратсия аз координата ва вақт ба муҳандисон имкон медиҳанд, ки ҳангоми тарроҳӣ ва таҳияи таҷҳизоту дастгоҳҳо, ҳарорат ва тақсимооти концентратсияро дар минтақаҳои сӯзиш бо осони ҳисоб кунанд.

2. Меъёри таҳия ва асоснокшудаи оғозшавии реаксияи химиявӣ ҳангоми СФГ имкон медиҳанд, ки ҳарорати алангагирии омехта дар ҳолатҳои муайян пешгӯӣ карда шавад.

3. Пешгӯии ҳарорати максималии муҳити ковок вобаста ба параметрҳои система.

4. Натиҷаҳоро барои таҳияи роҳҳои баланд бардоштани эътимоднокии оташнамонакҳо ва тавсияҳо оид ба устувории сатҳи сӯзиши филтронаи газҳо, моддаҳои конденсионӣ ва сӯзиши омехтаи газҳо бидуни муҳити ковок истифода бурдан мумкин аст.

5. Ба ғайр аз ин натиҷаҳоро дар таҷрибаи истехсоли таҷҳизотҳои муосир, ки дар онҳо усулҳои дигари ҷойгиркунонии шӯъла дар муҳити ковок пешбинӣ шудааст, нисбат ба усули анъанавӣ, истифода бурдан мумкин.

**Арзиши назариявӣ** тадқиқот иборат аз ёфтани:

– вобастагии байни градиенти ҳарорат ва консентратсияи таркибаи камтарини газ;

– шarti симметрии профилҳои ҳарорат ва консентратсияи таркибаҳои газ ва вобастагии байни онҳо;

– вобастагии ҳарорати оғози реаксияи кимиёвӣ аз коэффитсиентҳои додугирифти гармӣ байни газу заррачаҳои сахт ва байни муҳитҳои ковоку беруна;

– шarti устувории тӯлонии сатҳи СФГ, ки алалхусус, шarti ададан ёфташудаи сатҳи сӯзиши муҳити конденсиониро ифода мекунад;

– шarti устувории диффузӣ-фазогии сатҳи СФГ;

– ҳалли аналитикии масъалаи ғайримуқаррарӣ сӯхтани газҳо дар муҳити ковок.

## ANNOTATION

**dissertation by Kabilov Maruf Makhmudovich on the topic “Mathematical modeling of stationary waves of filtration combustion of gas and their stability”, presented for the degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences, specialty 05.13.18 - Mathematical modeling, numerical methods and software packages**

**Key words:** wave, combustion, gas mixture, porous medium, velocity, steady wave, instability condition, onset of reaction, temperature, ignition temperature, stationary wave, filtration combustion, bifurcation, equilibrium temperature, reaction rate, diffusion, thermal conductivity, Lewis number.

**Research objects.** The object of research is stationary and non-stationary FCG waves in an inert porous medium at low speeds.

**Purpose of the research:** The main goal of this dissertation research is analytical and numerical modeling of the characteristics and structure of stationary FGG waves in low-speed modes, the development of a heat-diffusion model of the FGG, modeling the ignition of a gas in an inert porous medium and the development of criteria for the longitudinal and spatial stability of the FGG front with respect to small perturbations.

**Scientific novelty.** All the main results of the dissertation are new, of theoretical and practical interest, and consist of the following:

1. Derived relations for determining the speed of the stationary FCG wave.
2. Developed and substantiated a one-temperature mathematical model of the FCG, in particular, describing the combustion of condensed media and thermal diffusion combustion of gas without a porous medium.
3. Selected and justified a numerical method in the study of the structure of a stationary FCG wave.
4. Developed and substantiated an analytically approximate method for describing the structure of a stationary FCG wave.
5. Developed and substantiated the criterion for the initiation of a chemical reaction wave in FCG.
6. The bifurcation theory is applied to the pulsating front of the FCG.
7. For the first time, the formula for the maximum temperature of a porous medium in the presence of heat loss and the rate of injection of the mixture to the porous block is obtained.
8. A new method of accounting for the diffusion of gas mixture components in determining the main characteristics of the FCG wave has been developed and justified.
9. The conditions for the longitudinal and spatial stability of the FGG wave are determined.
10. An analytically approximate method for describing the structure of a nonstationary FCG wave has been developed and substantiated.

The **practical value** of the study is as follows:

– Explicit expressions for the temperature function of a mixture of gases, a porous medium, and concentration versus coordinate and time allow engineers to easily calculate the temperature and concentration distributions in the combustion zones when designing and developing equipment and devices.

– The developed and substantiated criterion for the initiation of a chemical reaction wave during FGH allows predicting the ignition temperature of a mixture in certain cases.

– In predicting the maximum temperature of a porous medium depending on the parameters of the system.

– The results obtained can be used in the formulation of ways to increase the reliability of flame arresters and recommendations on the stability of the fronts of filtration combustion of gases, condensed media and combustion of a mixture of gases without a porous medium.

– The results obtained can also be used in the practice of manufacturing modern-type burners, where other methods of flame localization in porous bodies are used, compared to the traditional method (flame stabilization at the porous body-external medium interface).

The **theoretical significance** of the study lies in finding:

– connection of the temperature gradient with the concentration of the reacting gas component;

– conditions of symmetry of profiles of temperature and concentration of gas components and their dependence;

– dependences of the temperature of initiation of a chemical reaction on the coefficients of interfacial heat transfer and heat transfer to the environment;

– conditions for longitudinal stability of the front of filtration combustion of gases, in particular, approximating the pulsating mode of combustion of condensed media;

– conditions of diffusion-spatial stability of the front of filtration combustion of gases;

– analytical solution of the non-stationary problem of FCG.