

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ХИМИЧЕСКОЙ КИНЕТИКИ И ГОРЕНИЯ
ИМ. В.В. ВОЕВОДСКОГО
СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

На правах рукописи

МАНЖОС Евгений Витальевич

**ИНИЦИИРОВАНИЕ ВОЛН
ФИЛЬТРАЦИОННОГО ГОРЕНИЯ ГАЗА**

1.3.17. Химическая физика, горение и взрыв,
физика экстремальных состояний вещества

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук
Коржавин А.А.

Новосибирск – 2026

ОГЛАВЛЕНИЕ

ГЛАВА 1. ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗОВ.....	10
1.1. Явление ФГГ	10
1.2. Практическое применение процессов ФГГ	12
1.3. Нестационарные процессы.....	13
ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	16
2.1. Возможные методы исследования	16
2.1.1. Теоретический метод	16
2.1.2. Экспериментальный метод	17
2.2. Численное моделирование	17
2.3. Экспериментальное исследование	24
2.4. Влияние теплообмена с окружающей средой	32
ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	37
3.1. Моделирование формирования волны ФГГ открытым пламенем	37
3.2. Моделирование формирования волны ФГГ нагретым участком пористой среды	51
3.3. Экспериментальные исследования формирования волны ФГГ	62
3.4. Экспериментальные исследования формирования волны ФГГ в обедненной газовой смеси	68
ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ.....	75
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	78
СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	82
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	86
ПРИЛОЖЕНИЕ А «АКТ ВНЕДРЕНИЯ»	97

ВВЕДЕНИЕ

В диссертационной работе описано физическое явление, имеющее большую практическую ценность и широкую область применения: фильтрационное горение газов (ФГГ), представляющее собой процесс распространения волны газофазной экзотермической реакции в инертной пористой среде при фильтрации через нее газообразных реагентов.

Стационарный процесс ФГГ является достаточно изученным в настоящее время, но вопросы, связанные с нестационарными явлениями, происходящими при этом: формирование и гашение волн ФГГ, распространение в нестационарных условиях, изучены и описаны в современной литературе недостаточно.

Понимание закономерностей формирования волн ФГГ, знание управляющих параметров, имеющих влияние на процесс формирования волн ФГГ и его длительность, позволит не только оптимизировать конструкцию и повысить технологичность установок, использующих принцип ФГГ в работе, например, насадочных огнепреградителей с засыпкой из инертной пористой среды, но и разработать безопасные и эффективные методики работы с ними.

Актуальность работы. Волна ФГГ представляет собой единый, распространяющийся совместно, комплекс волны горения в газовой фазе и тепловой волны в пористой среде. При этом происходит подогрев масс поступающего газа пористой средой, затем само горение газа и распространение тепла по пористой среде.

В представленной работе изучается режим горения, происходящий с очень небольшой скоростью перемещения зоны экзотермической реакции ($\sim 10^{-4}$ м/с) и по классификации [1] носящий наименование режим низких скоростей (РНС).

Данный режим наблюдается, например, при работе засыпных огнепреградителей — устройств, защищающих технологический объем с горючим газом от проскока пламени в него [2]. При этом присутствует движение горючего газа через огнепреградитель, пламягасящий элемент

которого представляет собой участок, засыпанный инертным пористым веществом.

Такие огнепреградители предназначены для защиты трубопроводов, транспортирующих газообразные и пылевоздушные (аэрозольные) среды, и резервуаров с горючими жидкостями. Некоторыми отраслевыми документами предписывается установка огнепреградителей [3]. В силу их искро- и взрывобезопасности могут быть рекомендованы насадочные огнепреградители с засыпкой из инертной пористой среды.

Необходимость исследования ФГГ обусловлена его широкими возможностями применения, не только лишь для огнепреградителей: например, фильтрационные радиационные нагреватели дискового типа, очистка пористой среды от органических примесей методом встречных волн фильтрационного горения, термохимическая конверсия углеводородов в синтез – газ в режиме фильтрационного горения [4] и др.

Исследования фильтрационного горения были начаты Алдушиным А.П., Мержановым А.Г. в 1974 году, затем велись Бабкиным В.С. и Лаевским Ю.М. в 1980 – е годы. Далее большой вклад внесли исследователи Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Дробышев В.И. в 1990–2000 годы., Футько С.И., Жданок С.А. в начале 2000 годов. Исследователями M. Abdul Mujeebu, M.Z. Abdullah, Abdulmajeed Mohamad в 2009 году описаны вопросы математического моделирования волн фильтрационного горения и практического применения этого процесса. С 2010 года и по настоящее время изучение ФГГ проводилось A. Barra, G. Diepvens, J. L. Ellzey, M. R. Henneke, Dai, H., Zhu, H., Yang, P., Huang T, Ren X, Chen Y, Ma J, Yi D, Wan Z, Yu B, Zeng W, Yunqi Cao, Tong Su, Yifan Ding, Weidong Song, Li Yang, Fang Liu, Cheng Zhai, Фурсенко Р.В.

ФГГ является сформировавшимся разделом науки о горении, изучающим горение газа в условиях теплового и гидродинамического взаимодействия с твердой фазой [5]. Изучены закономерности стационарных процессов ФГГ: построены модели, позволяющие объяснить

экспериментально наблюдаемые явления и закономерности [6, 7]. Проведена классификация режимов ФГГ [1, 5, 8]. Установлены пределы распространения волн горения [6, 9] и их параметрические зависимости. Исследованы особенности протекания химических превращений в процессах ФГГ [4].

Исследуемые в настоящий момент времени вопросы ФГГ – изучение нестационарных явлений, наблюдаемых при горении в порах [10], исследование неустойчивости фронта волны горения [11]. Помимо этих вопросов одной из существующих и не описанных до сих пор проблем ФГГ является выяснение и уточнение факторов, влияющих на процесс формирования волны ФГГ и его длительность до появления сформировавшейся волны горения (время формирования волны ФГГ).

Описанная проблема возникает, например, при использовании пористых огнепреградителей при фильтрации через них горючего газа [12, 13]. В случае формирования волны ФГГ при случайном воспламенении газа может произойти прогорание огнепреградителя и распространение пламени в защищаемый объем. В связи с этим необходимо проводить исследование процесса формирования волн ФГГ, определить управляющие параметры и параметрические зависимости, влияющие на характер и длительность процесса формирования волны ФГГ.

Цель работы. Целью настоящей работы является исследование нестационарного процесса формирования волны ФГГ и определение параметров системы и параметрических зависимостей, влияющих на него, а также формулирование на основе полученных результатов научно обоснованных рекомендаций по расчету засыпных огнепреградителей.

Для достижения поставленной цели выполнены следующие **задачи**:

1. Численным методом проведены исследования нестационарных процессов ФГГ: формирование волны ФГГ при ее инициировании открытым пламенем или нагретым участком пористой среды;

2. Экспериментально исследован процесс формирования волны ФГГ при ее инициировании открытым пламенем и проведено сравнение с теоретическим моделированием;

3. Определены критически важные управляющие параметры системы газ – пористая среда, влияющие на процесс формирования волны горения;

4. Сформулированы научно обоснованные рекомендации по выбору конструктивных параметров засыпного огнепреградителя: материала, пористости, диаметра зерен инертной пористой засыпки.

Объекты и методы исследования.

Объектами исследования являются нестационарные процессы формирования волны ФГГ. Исследование проведено методами численного моделирования и лабораторного эксперимента.

Практически применимым и информативным методом исследования механизмов и закономерностей нестационарных процессов ФГГ, позволяющим оперативно отслеживать изменение характеристик и структуры волны ФГГ, служит метод численного моделирования.

При моделировании использована пористая среда, характеристики которой соответствовали справочным данным по электрокорунду и керамические шарики с характеристиками, приводимыми в соответствующем нормативном документе. В качестве горючего газа принимался газ с характеристиками, соответствующими стехиометрической метановоздушной смеси и газ с пониженным содержанием метана.

Методом лабораторного эксперимента изучался нестационарный процесс ФГГ, происходящий в системе, инертная пористая среда – горючий газ. Проведено сравнение данных, полученных численным моделированием, и данных лабораторного эксперимента.

Достоверность результатов исследования, в случае использования модели фильтрационного горения при численном моделировании, подтверждается применением классических уравнений горения, верифицированных методов решения. В случае физического моделирования

фильтрационного горения повторяемостью результатов эксперимента в фиксированных условиях, критическим анализом ошибок измерений и выполнением тепловых балансов, составленных на основе измеренных характеристик волн горения.

Научная новизна:

1. Впервые описана схемы формирования волн ФГГ при их инициировании открытым пламенем или нагретым участком инертной пористой среды.

2. Определены критически важные управляющие параметры пористых сред и горючих смесей, оказывающие влияние на процесс формирования волны ФГГ открытым пламенем;

3. Установлено качественное соответствие данных, полученных численным моделированием процессов формирования волн ФГГ, данным экспериментального исследования;

4. Разработаны научно обоснованные рекомендации по выбору конструктивных параметров засыпного огнепреградителя: материала, пористости, диаметра зерен инертной пористой засыпки.

Практическая ценность.

Формирование волны ФГГ служит начальной стадией работы любого устройства, имеющего в основе принцип работы ФГГ, не только лишь огнепреградителя. Описание стадий формирования волны ФГГ, длительности процесса и понимание влияющих на него параметров важны для прогнозирования работы таких устройств. Понимание стадий процесса формирования волны горения при прогорании огнепреградителя и научно обоснованные рекомендации по расчету, позволят обеспечить безотказность работы, увеличить надежность, оптимизировать конструкцию устройства, технологичность изготовления и методы работы с ним.

Положения, выносимые на защиту:

1. Результаты исследования стадий процесса формирования волны ФГГ при ее инициировании открытым пламенем или нагретым участком пористой среды.
2. Совокупность критических управляющих параметры системы газ – пористая среда, влияющих на процесс формирования волны горения.
3. Научно обоснованные рекомендации по выбору конструктивных параметров засыпного огнепреградителя: материала, пористости, диаметра зерен инертной пористой засыпки.

Личный вклад автора. Автор принимал активное участие в постановке и обосновании основной части исследований, изготовлении экспериментальной установки, получении и обработке экспериментальных данных, а также в обсуждении и формулировке выводов. Совместно с научным руководителем разработан метод определения характеристик волны ФГГ и параметров эксперимента.

Численный эксперимент выполнен автором в сотрудничестве с д.ф.-м.н. Н.А. Какуткиной. Экспериментальные исследования проведены в лаборатории физики и химии горения газов ИХКГ СО РАН. Разработка проекта конструкции экспериментальной установки и ее монтаж выполнены автором в сотрудничестве с д.т.н. А.А. Коржавиным.

Список публикаций.

Основные положения и результаты диссертации опубликованы в 8 научных работах, из них 1 научная статья в издании, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук (перечень ВАК), 2 – в изданиях, индексируемых в международных базах данных Scopus и Web of Science, 5 – в трудах всероссийских и международных конференций.

Внедрение результатов. Получен Акт внедрения от ООО НПО «Алзамир» о применении результатов диссертационного исследования Манжоса Е.В. «Инициирование волн фильтрационного горения газа» при

составлении научно-исследовательской программы деятельности для обеспечения безопасности работы на предприятиях угледобычи.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных литературных источников. Включает в себя 27 рисунков, 1 таблицу, 95 библиографических ссылок. Общий объем диссертации 97 страниц.

Во введении обоснована актуальность исследования, сформулированы цели работы, ее научная новизна и практическая значимость.

В первой главе проведен литературный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных обнаружению и выяснению свойств физического явления: процесса фильтрационного горения газов (ФГГ). Показано современное состояние исследований, касающихся нестационарных процессов ФГГ: устойчивость волн, формирование волн ФГГ. Обоснована актуальность численных и экспериментальных исследований этого процесса.

Во второй главе описана использованная при моделировании математическая модель распространения волны ФГГ. В этой же главе приводится описание экспериментальной установки и пористых сред, использованных в экспериментальном исследовании.

В третьей главе приведены результаты численного моделирования формирования волн ФГГ открытым пламенем и нагретым участком пористой среды в сравнении с результатами экспериментов. В этой же главе приведены результаты экспериментов горения смеси с пониженным объемным содержанием горючего газа в подаваемой газовой смеси в сравнении с численным экспериментом.

В четвертой главе приведены научно обоснованные рекомендации по расчету засыпного огнепреградителя.

ГЛАВА 1. ФИЛЬТРАЦИОННОЕ ГОРЕНИЕ ГАЗОВ

1.1. Явление ФГГ

Под фильтрационным горением, в общем случае, понимают различного рода процессы горения, в которых присутствует фильтрация в пористой среде одного или нескольких компонентов системы, способной к экзотермическим химическим реакциям.

В 80х годах XX века в результате экспериментов было обнаружено явление ФГГ ([1, 14 – 17]). Затем было опубликовано большое количество работ, касающихся обнаруженного процесса ([18 – 21 и др.]). Работа [22] может выступать как обзор публикаций, появившихся в первые несколько лет после обнаружения явления ФГГ. Интерес ученых к этой теме объясняется «богатой физикой» процесса и широким спектром неизученных свойств, и, конечно же, большим количеством возможных практических применений в различных областях. В частности, процесс ФГГ имеет самое непосредственное отношение к вопросам пожаровзрывобезопасности [23]. К исследованиям, касающиеся ФГГ в огнепреградителях, принадлежат, например, работы [12, 23 – 27].

Исследования различных режимов горения и зависимости характеристик процесса от технологических параметров необходимы для разработки и оптимизации, к примеру, работы экологически чистых пористых горелок, использующих низкокалорийные топлива и позволяющих значительно снизить объем выбросов вредных веществ в атмосферу [28 – 30]. Моделирование пористых горелок, наиболее эффективных и экономичных с точки зрения экологии и энергосбережения, являлось целью проводимых исследований [6].

В работе [31] приведен обзор статей, связанных с горением в пористых средах и его приложениями. Внимание в статье отводится исследованиям, касающихся различных горелочных устройств. Сходные по физическим

свойствам и соответствующим математическим моделям процессы реализуются в рамках химических технологий (см., например, [32, 33]).

Как уже было упомянуто выше явление ФГГ является богатым с точки зрения определяющих его физических механизмов, и может протекать в различных режимах [34]: в режиме низких скоростей (РНС), в режиме высоких скоростей (РВС), в режиме звуковых скоростей, низкоскоростной детонации, нормальной детонации. В [35] показан и экспериментально исследован режим ФГГ, реализующийся в пористых инертных средах и одиночных каналах с характерными размерами поровых каналов, при определенных скоростях вынужденной фильтрации газа, превышающих некоторые критические значения. При этом представляет интерес вопрос перехода от РНС к РВС. Аналитическое и экспериментальное исследование такого перехода представлено в [36]. Условия перехода от РНС к РВС в зависимости от давления показаны в [37]. В статье [38] численно продемонстрирована зависимость реализуемого режима горения от коэффициента интенсивности межфазного теплообмена. В случае достаточно интенсивного теплообмена между газом и каркасом фронт горения распространяется со скоростью, много меньшей скорости газа. В зависимости от скорости подачи горючего газа возможно движение фронта в направлении потока газа, против потока и стационарное состояние, когда фронт неподвижен. Именно эти режимы рассматриваются в работе.

Физический механизм режима низких скоростей ФГГ [22], включает три пространственных зоны: зону подогрева, в которой нагретая пористая среда подогревает поступающий газ, зону химической реакции, где происходит интенсивное тепловыделение, и зону тепловой релаксации, в которой разогретый газ передает тепло в пористую среду. Разогретая пористая среда путем кондуктивного переноса тепла передает его в зону подогрева, замыкая тем самым тепловой рецикл. Подобного рода возврат части тепла из зоны тепловой релаксации в зону подогрева приводит к избыточной энтальпии в области реакции. В результате возникают сверхадиабатические температуры

и высокие скорости химической реакции, не свойственные «обычному» гомогенному пламени. Типы горения, обладающие описанным свойством, получили название «пламена с избытком энтальпии». Одними из первых работ по исследованию таких пламен и возможности их практического применения являются статьи [39 – 41]. При этом указанные исследования ограничиваются лишь случаями стабилизированных пламен.

1.2. Практическое применение процессов ФГГ

На текущий момент времени обзор применения процессов ФГГ приведен в работах [4, 31], но появление за последнее время новых работ и исследований расширяет области возможного применения этого процесса.

Отмечено [4], что в отличие от традиционных технологий горения, в которых передача энергии от продуктов горения происходит на «макроуровне», процессы ФГГ протекают на «микроуровне», т.е. в масштабе пор в пористой среде. При этом основным отличием является то, что температура в области горения определяется главным образом не теплосодержанием используемого топлива, а является функцией параметров фильтрации и может регулироваться изменением пористости, физических свойств материала пористой среды, скоростью фильтруемого потока и геометрией рабочей зоны оборудования. Наряду с этим процесс ФГГ имеет характерно низкий индекс эмиссии NO_x , что безусловно является экологическим преимуществом использования процесса ФГГ. Вышеперечисленные особенности обуславливают значительный потенциал применений ФГГ [42].

Рассмотрим некоторые из них. Если локализовать зону реакции, в которой собственно происходит ФГГ благодаря конструктивному подбору размеров области фильтрации, свойств пористой среды, то становится возможным создание фильтрационного нагревателя дискового типа [43] с интенсивным тепловым излучением с поверхности для использования его в качестве нагревателя или бойлера для подогрева воды. Предлагается также

использование нагревателя подобного типа для бесконтактного нагрева материалов в промышленных процессах [44].

ФГГ имеет ряд важных приложений для решения задач в области переработки и вторичного использования промышленных отходов, например процесс десорбции углеводородов из пористой среды, реализуемый при ее тепловой очистке от органических примесей [45] или эффективный метод использования низкокалорийных видов топлива [46] или, например, таких как производные топлива из биомассы [47].

В связи с необходимостью получения синтетических топлив, создания эффективных генераторов H_2 для водородных топливных элементов, выявлена необходимость получения синтез-газа (смесей H_2 и CO). Для этого предложен метод парциального окисления сложных углеводородов на основе сверхадиабатического эффекта в условиях ФГГ. Свойства пористой среды как регенератора тепловой энергии индуцирует процесс химической конверсии углеводородов с минимальным содержанием кислорода в смеси [48].

Интересной является работа [49] рассматривающая использование процесса ФГГ для преобразования тепловой энергии, выделяющей при горении бедных метановоздушных смесей, в электрическую.

1.3. Нестационарные процессы

Проблема устойчивости волны ФГГ, отсутствии ее стационарности во времени, является предметом многих исследований. В частности, целью исследования [50] была попытка теоретически обосновать отмеченное ранее [16] наблюдение, что встречное движение фронта устойчиво, а спутное – неустойчиво. В [51] теоретически и экспериментально изучается вопрос устойчивости фронта фильтрационного горения газов. В работе [52] предлагается модель неустойчивости, основанная на уравнениях фильтрации. Вопросы устойчивости затрагивались во многих работах [53 – 56] и др.

В работе [5] внимание уделено анализу теплофизики процесса ФГГ: рассмотрены различные режимы горения, вопросы устойчивости фронта горения. Представленные в работе математические модели, использующие упрощенные постановки задач и полуэмпирические подходы, закладывают основу для последующего численного моделирования реальных систем и процессов. Монография опирается, в основном, на исследования, проведенные белорусскими исследователями, и обобщает результаты, опубликованные, в частности, в статьях [57 - 60].

В рамках исследования теплового воспламенения и горения высокоэнергетических топлив тема фильтрационного горения газов была также затронута в [61]. В предположении бесконечно интенсивного теплообмена между газом и каркасом в статье проведен асимптотический анализ процесса ФГГ при движении газа в полуограниченной пористой среде. Основной целью работы являлось определение влияния на процесс границы пористой среды и условий теплообмена на ней. Работа [62] посвящена экспериментальному исследованию переходных процессов при ФГГ в режиме низких скоростей, возникающих при изменении параметров газового потока или пористой среды.

Интересными и подлежащими изучению в настоящее время являются процессы ФГГ изменчивые во времени, то есть нестационарные процессы ФГГ, процессы формирования и гашения волн ФГГ. В частности, в работе [63] приводятся результаты исследований принципиально нестационарного процесса распространения сферических волн ФГГ. Различными исследователями проводилось изучение переходных процессов, наблюдаемых при переходе волн ФГГ в слоях пористых сред с различными характеристиками [62, 64 - 66].

Большое количество проводимых исследований включает в себя моделирование нестационарных процессов ФГГ, связанных с изменением свойств пористых материалов, процессами тепло- и массопереноса при ФГГ [67 - 69].

Процессы формирования и гашения волн ФГГ, являющиеся одним из видов нестационарных процессов, происходящих при ФГГ, наблюдаются в устройствах с противотоком (изменение направления движения газа на противоположное) [70, 71].

Закономерности инициирования волн ФГГ не изучены, поэтому оптимальные режимы формирования волн обычно находят эмпирически. Эксперименты показывают, что в ряде случаев инициирование волны ФГГ представляет собой некоторые трудности.

В настоящей работе изучается процесс ФГГ с формированием волны горения газа, движущейся навстречу поступающему газу. Логичным здесь является предположение, что возможны два типа зажигания газовой смеси: внешнее (при зажигании газа, вытекающего из пористой среды) и внутреннее (нагретым участком пористой среды). Целью настоящей работы было численное исследование формирования волн ФГГ как при внешнем зажигании фильтрующегося газа, так и нагретым участком пористой среды. Необходимость исследования вытекает, например, из проведенного ранее исследования прогорания огнепреградителей, показавшего, что именно стадия формирования волны ФГГ часто определяет огнестойкость огнепреградителя [12]. Метод численного моделирования, позволяющий оперативно отслеживать любые изменения характеристик и структуры волны горения, наиболее удобен для выявления механизмов и закономерностей нестационарных процессов формирования волн ФГГ. Чтобы абстрагироваться от частных параметров конкретного устройства на основе ФГГ, таких как, например, уровень теплопотерь и геометрические размеры, моделирование формирования волны ФГГ проводилось для идеального случая — адиабатической системы, полуограниченной пористой среды.

ГЛАВА 2. МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1. Возможные методы исследования

Как было упомянуто, ввиду «богатой физики» процесса, т.е. его явной сложности, необходимо подобрать оптимальный подход для исследования. Принятым является, что в основе методов исследования лежит единство эмпирической и теоретической сторон, что, как раз, и проведено в настоящей работе: теоретическое исследование и эксперимент.

Очевидно, что в настоящее время ни один из имеющихся методов исследований по отдельности не обладает возможностью точного и единственного предсказания исследуемых явлений. Более информативным будет, естественно, объединение результатов всех методов. В этом отношении лабораторные испытания не теряют своей значимости и оказываются наиболее удобными для быстрого выявления значимых причин.

2.1.1. Теоретический метод

Такой метод исследования позволяет с учетом ряда упрощений изучать систему с помощью моделирования, выявлять изменение характеристик и структуры волны ФГГ, анализировать механизмы и закономерности нестационарных процессов ФГГ и оперативно отслеживать изменение характеристик и структуры волн ФГГ [9, 72].

В задачах горения построение математической модели и соответствующего вычислительного алгоритма требует особенного аккуратности ввиду сложности физико-химического явления. В то же время стремительно развивающаяся вычислительная техника, появление кластеров и технологий параллельного вычисления открывают перед исследователями новые возможности в области численного моделирования.

Например, в обзоре [31] приведены результаты расчетов различных прикладных задач, включающих процессы ФГГ. Но остается невыясненным, насколько точно вычисляется, например, такая ключевая характеристика, как скорость распространения фронта ФГГ. Многие работы, касающиеся

численного моделирования процесса, не раскрывают механизм вычислений: описание алгоритмов остается за рамками публикации или же уравнения предложенной математической модели передаются на обработку стороннему специализированному программному обеспечению. В [73] рассматривается процесс ФГГ в приложении к работе керамической горелки цилиндрической кольцевой формы. В [74] рассматривалась задача фильтрационного горения метановоздушной смеси в инертной пористой среде. Решение было найдено как аналитически, так и численно. Приведены результаты сравнения аналитического и численного решения. К работам, в которых обсуждаемый процесс анализируется численно, можно отнести статьи [69, 75 - 79].

Математическое моделирование в последние годы находит широкое применение, но не всегда оправдывает ожидаемые прогнозы. Сдерживающим фактором является сложность описания процессов ФГГ, необходимость введения в расчеты большого количества параметров, достоверное определение которых возможно, как правило, в процессе натурных экспериментов.

2.1.2. Экспериментальный метод

Данный метод используется для проверки найденных путем моделирования закономерностей на конкретных объектах. Изучение движения и формирования волн ФГГ в условиях, приближенных к натурным. Таковыми являются, например, специально построенные установки [80, 62].

2.2. Численное моделирование

Согласно [5] наиболее общая модель ФГГ составляется из уравнений баланса тепла в твердой и газовой фазах, переноса массы газовых компонентов, уравнениях непрерывности, диффузионной гидродинамики или фильтрации и состояния газа. Кроме того, для формирования исходных членов уравнений баланса тепла и массы записываются уравнения химической кинетики рассматриваемых газовых компонентов, формулируются граничные условия.

При физико-математическом анализе ФГГ часто рассматривается одномерная задача: предполагается, что кинетика тепловыделения задается одним (недостающим) компонентом, пренебрегается градиентом давления в системе.

Широкое распространение получило однотемпературное приближение, при котором температуры газовой смеси T и пористой среды θ полагаются равными вследствие высокой интенсивности межфазного теплообмена.

Такое приближение предполагает бесконечно быстрое протекание реакции горения при достижении газом некоторой температуры. При этом температура зажигания является также и максимальной температурой в волне ФГГ.

Существенным недостатком такого приближения является то, что допускаются решения с различными максимальными температурами в волне. Чтобы избежать этого, характерная температура в волне должна быть определена из дополнительных физических моделей и допущений. В качестве характерной температуры выбирают температуру пористой среды, соответствующую зажиганию горючей смеси.

Аналитические выражения, получаемые при использовании последовательного двухтемпературного решения задачи, оказываются неявными и требуют решения нелинейных уравнений и систем уравнений при определении температуры зажигания и других параметров. Для практических расчетов и физического анализа интерес представляют модели, приводящие к явным выражениям.

В данном исследовании применена одномерная двухтемпературная модель ФГГ. При этом тепловое взаимодействие горючей смеси и пористой среды осуществляется на основе ньютоновского теплообмена по линейному закону. Рассматривается три уравнения: два уравнения теплового баланса в пористой среде и горючей газовой смеси и уравнение сохранения массы недостающего компонента горючего газа. В двухтемпературной модели температура газа в зоне химической реакции существенно отрывается от

температуры пористой среды и имеет характерный пик. В основе изучения такой модели, сводящегося к получению нелинейных уравнений для определения скорости фронта и равновесной температуры, лежат методы, используемые при исследовании ламинарных пламен (молекулярно-пучковая масс-спектрометрия, газовая хроматография, измерение температуры пламен) [81].

Дополнительное упрощение, широко используемое при моделировании ФГГ, состоит в пренебрежении теплопроводностью газа. В этом случае меняется физический механизм распространения фронта горения – разогрев смеси происходит только благодаря теплообмену с пористой средой. Отсутствующий в такой модели механизм распространения волны, основанный на кондуктивном прогревании зоны перед фронтом пламени, заменен на механизм воспламенения горючей смеси при наличии теплообмена с пористой средой, аналогичный случаю неадиабатического теплового взрыва. При помощи такой модели изучен вопрос о тепловых пределах распространения стационарных волн ФГГ в РНС. Такая модель ФГГ, наряду с моделями, описанными выше, была рассмотрена в обзорной статье [21].

В настоящей работе использована одномерная математическая модель, с пренебрежимо малым градиентом давления, включающая в себя уравнения переноса тепла по газовой смеси (1), переноса тепла по пористой среде (2), переноса и расхода массы недостающего компонента газовой смеси (3), сохранения полного количества вещества в потоке газовой смеси (4) и уравнение состояния газа (5):

$$m\rho_g c_g \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_f \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(m\lambda_g \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \alpha S_c (\theta - T) + Qm\rho_g \eta \cdot W, \quad (1)$$

$$\rho_s(1-m) c_s \frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left((1-m) \lambda_{eff} \frac{\partial \theta}{\partial x} \right) + \alpha S_c (T - \theta) + \frac{\alpha_w}{D_t} (T_0 - \theta), \quad (2)$$

$$m\rho_g \left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + v_f \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) = \frac{\partial}{\partial x} \left(m\rho_g D \frac{\partial \eta}{\partial x} \right) - m\rho_g \eta \cdot W, \quad (3)$$

$$\frac{\partial m\rho_g}{\partial t} + \frac{\partial m\rho_g v_f}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

$$\rho_g T = const \quad (5)$$

Здесь T и θ – температуры газа и инертной пористой среды; η – относительная массовая концентрация недостающего компонента газа (компонента, сгорающего в результате химической реакции); v_f – скорость фильтрации газа; ρ_g и ρ_s – плотности газа и материала пористой среды; c_g и c_s – удельные теплоемкости газа и пористой среды; λ_g – коэффициент теплопроводности газовой смеси; λ_{eff} – эффективная теплопроводность пористой среды, определяемая по формуле:

$$\lambda_{eff} = (A + B \operatorname{Re}) \lambda_s, \quad (6)$$

где A , B – эмпирические константы. Типичными значениями λ_{eff} являются: песок в литейных формах – $\lambda_{eff} = 0,3\text{--}0,5$ Вт/(м·К) (важно для охлаждения отливок); керамические катализаторы – $\lambda_{eff} = 0,5\text{--}1,0$ Вт/(м·К) (влияет на эффективность реакторов); металлические порошки в теплообменниках – $\lambda_{eff} = 5\text{--}20$ Вт/(м·К) (при прессовке) [83]. Эффективная теплопроводность λ_{eff} может изменяться в широких пределах от 0,01 Вт/(м·К) до 52,7 Вт/(м·К) [84]. Далее в системе уравнений (1 – 5): m – пористость; D – коэффициент диффузии недостающего компонента газовой смеси; $Q = c_g(T_b - T_0)$ – тепловой эффект реакции; T_b – адиабатическая температура горения газовой смеси; T_0 – начальная температура газовой смеси; $W = k_0 \exp(-E/(RT))$ – скорость обобщенной одностадийной химической реакции, где k_0 – предэкспоненциальный множитель, E – энергия активации, R – универсальная газовая постоянная; α_w – коэффициент внешней теплоотдачи;

D_t – диаметр трубы установки; α – коэффициент межфазного теплообмена, который рассчитывался по соотношениям, рекомендованным в [82] для засыпных пористых сред при числах Re от 0,2 до 2000, где $Re = \frac{v_f d_{eff} \rho_g}{\mu}$. Здесь: Nu , Re и Pr – числа Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля; μ – динамическая вязкость газа; S_c – удельная поверхность пористой среды.

Граничные условия для системы (1 – 5) задаются далее. При моделировании использовалась скорость подачи газовой смеси v . Скорость фильтрации газовой смеси определялась как $v_f = v/m$. На левой границе трубы: $v = v_0$, $T = T_0$, $\eta = \eta_0$, где соответственно указаны входные значения скорости, температуры газа и концентрации недостающего реагирующего компонента в газовой смеси. На правой границе задаются “мягкие” краевые условия: $\frac{\partial T}{\partial x} = 0$, $\frac{\partial \eta}{\partial x} = 0$. Начальные условия ($t=0$): $v = v_0(x)$, $T = T_0(x)$, $\theta = \theta_0(x)$, $\eta = \eta_0$. Зажигание волны ФГГ моделировалось заданием в начальный момент времени ступенчатого профиля температуры газа снаружи от пористого блока (при исследовании формирования волны ФГГ открытым пламенем) либо пористой среды внутри блока (при исследовании формирования волны ФГГ нагретым участком).

Для численного решения системы (1 – 5) использовалась конечно-разностная схема, основанная на Лагранжевой аппроксимации конвективных членов. Система уравнений (1 – 5) записывалась в векторном виде и решалась с помощью векторной прогонки. Поскольку протяженность зоны горения очень мала, то для достаточно точного расчета параметров течения в ней использовалась неравномерная адаптивная разностная сетка, максимальное сгущение которой имело место в окрестности максимума функции тепловыделения. По мере перемещения этого максимума разностная сетка перестраивалась. Для переинтерполяции параметров течения использовались локальные В-сплайны.

Верификация программы проводилась путем ее тестирования на нескольких задачах с заведомо известными решениями. В частности, были

пламя моделируется ступенчатым профилем температуры газа, показанным на рисунке 1б. На входе в участок пористой среды газ имеет температуру T_0 , за участком с пористой средой газ имеет температуру T_b , соответствующей температуре горения стехиометрической смеси.

Для моделирования зажигания нагретым участком пористой среды применялась расчетная схема, показанная на рисунке 2а с профилем температуры пористой среды, показанным на рисунке 2б.

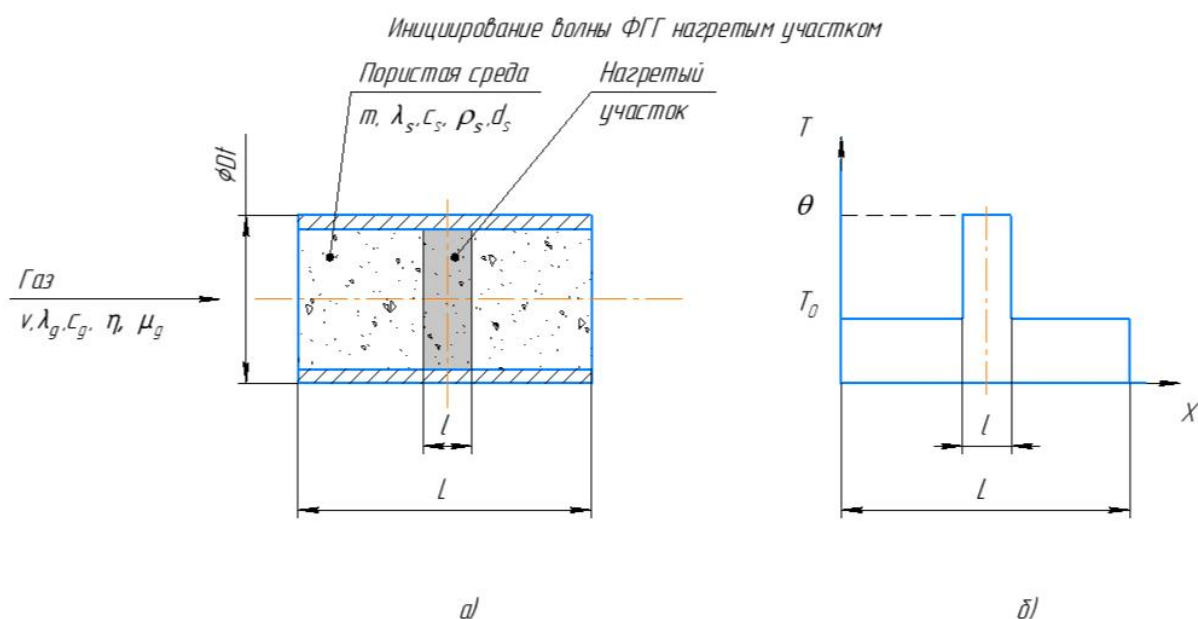


Рисунок 2 – Иницирование волны ФГГ нагретым участком пористой среды:

а) – схема моделируемой системы;

б) – профиль температуры участка пористой среды

В трубе диаметром D_t и длиной L , полностью заполненной пористой средой, посередине располагается участок пористой среды длиной l , нагретый до температуры θ . Газ подается слева со скоростью v , проходит через пористую среду и зажигается нагретым участком, формируя волну ФГГ.

Моделирование, в обоих случаях, проводилось для стехиометрической метановоздушной смеси со следующими параметрами [9, 85]: теплоемкость газа при постоянном давлении $c_g = 1 \cdot 10^3$ Дж/(кг·К), коэффициент теплопроводности $\lambda_g = 0,1$ Вт/(м·К), адиабатическая температура горения газа

$T_b=2320$ К. Значения параметров скорости эффективной химической реакции оценивались из результатов лабораторных экспериментов по фильтрационному горению метано-воздушных смесей [86] и приняты равными $k_0=1 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1}$, $E=2,26 \cdot 10^5$ Дж/моль. При моделировании зажигания волны ФГГ открытым пламенем и зажигания нагретым участком теплопотерями от пористой среды пренебрегалось ($\alpha_w=0$, адиабатический случай). При сравнении результатов расчета с результатами экспериментов использовались значения коэффициентов внешней теплоотдачи $\alpha_w = 100 \dots 380 \text{ Вт/(м}^2 \cdot \text{К)}$, согласующиеся с определенным в п. 2.3 значением коэффициента внешней теплоотдачи. Программа рассчитывает в каждый момент времени профили температуры газа и пористой среды, профиль концентрации недостающего компонента газовой смеси и определяет координату пламени как точку максимума температуры газа.

Теплофизические свойства пористых сред описаны далее в каждом конкретном случае моделирования формирования волны ФГГ.

2.3. Экспериментальное исследование

Экспериментальная установка, использованная для проведения экспериментального исследования зажигания волн ФГГ показана на рисунке 3.

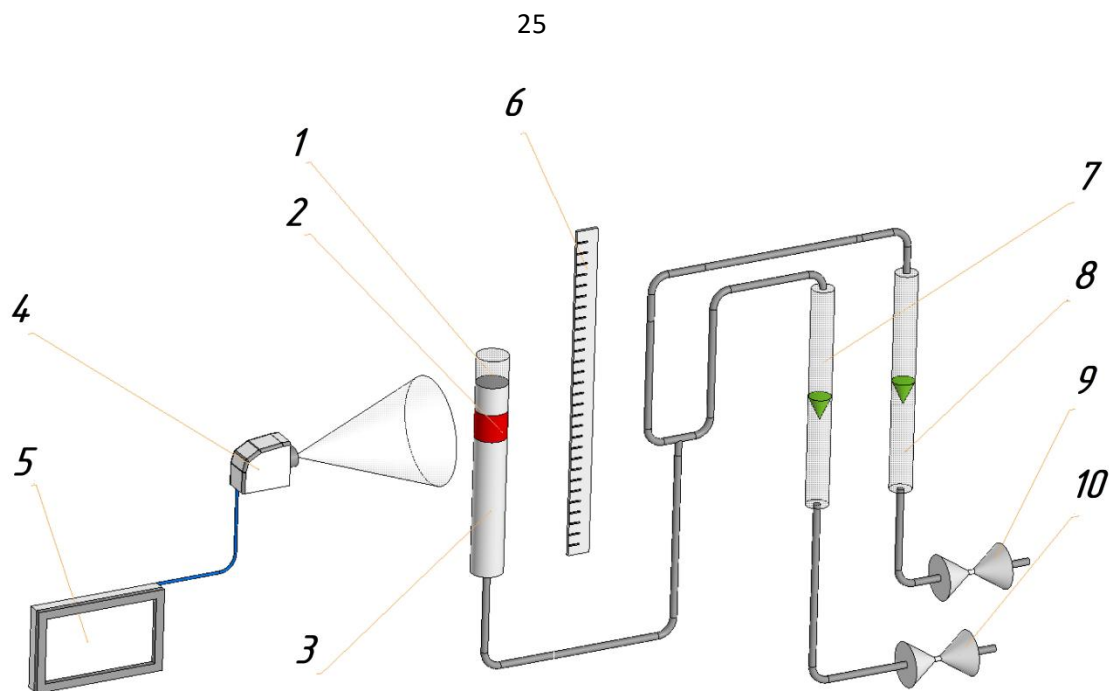


Рисунок 3 – Схема экспериментальной установки:

1 – кварцевая труба; 2 – зона горения; 3 – пористая среда; 4 – цифровая фотокамера; 5 – компьютер; 6 – линейка; 7, 8 – расходомеры горючего газа и воздуха; 9, 10 – входы воздуха и горючего газа

Экспериментальная установка, использованная для исследования формирования волн ФГГ, состоит из горелки и системы регистрации характеристик волны горения. Горелка представляет собой вертикальную кварцевую трубу длиной $l_t = 500$ мм с толщиной стенки $\delta_1 = 2$ мм и внешним диаметром $D_t = 50$ мм. Труба заполнялась пористой средой – зернистым электрокорундом. Использовались засыпки из электрокорунда со средним размером зерен $d_s = 4$ и 5 мм и керамическими шариками диаметром 6,2 мм (Рисунок 4а, 4б, 4в), теплофизические свойства которых приведены в таблице 1.



Рисунок 4а – Зерна электрокорунда ГОСТ 28818-90
со средним размером 4 мм



Рисунок 4б – Зерна электрокорунда ГОСТ 28818-90
со средним размером 5 мм



Рисунок 4в – Керамические шарики ГОСТ 20419-83
со средним диаметром 6,2 мм

Таблица 1 – Теплофизические свойства пористой среды

Свойство	Пористая среда (электрокорунд, ГОСТ 28818-90)
Плотность гранул пористой среды, ρ_s , кг/м ³	3900 [87]
Удельная теплоемкость пористой среды, c_s , Дж/(кг·К)	1000 [87]
Коэффициент теплопроводности пористой среды, λ_s , Вт/(м·К)	3,02 [87]
Средний размер зерна, d_s , мм	4; 5
Пористость, m	0,56; 0,54
Свойство	Пористая среда (керамические шары, ГОСТ 20419-83)
Плотность гранул пористой среды, ρ_s , кг/м ³	3500 [88]
Удельная теплоемкость пористой среды, c_s , Дж/(кг·К)	1000 [88]
Коэффициент теплопроводности пористой среды, λ_s , Вт/(м·К)	10 [88]
Средний размер зерна, d_s , мм	6,2
Пористость, m	0,4

Горючие смеси составлялись по расходам горючего газа и воздуха, измерявшихся образцовыми ротаметрами типа РМС-04, обеспечивающих подачу смеси с погрешностью $\pm 2,5\%$. Газ с воздухом смешивался до входа в горелку в месте соединения подводов газа и воздуха и подавался в кварцевую трубу снизу со скоростью v . Горючая смесь зажигалась в верхней части трубы открытым пламенем. Пламя прогревало верхний слой пористой среды, формируя волну горения. Визуально волна горения наблюдалась как плоская, ярко светящаяся зона, перемещающаяся по пористой среде (рисунок 5).

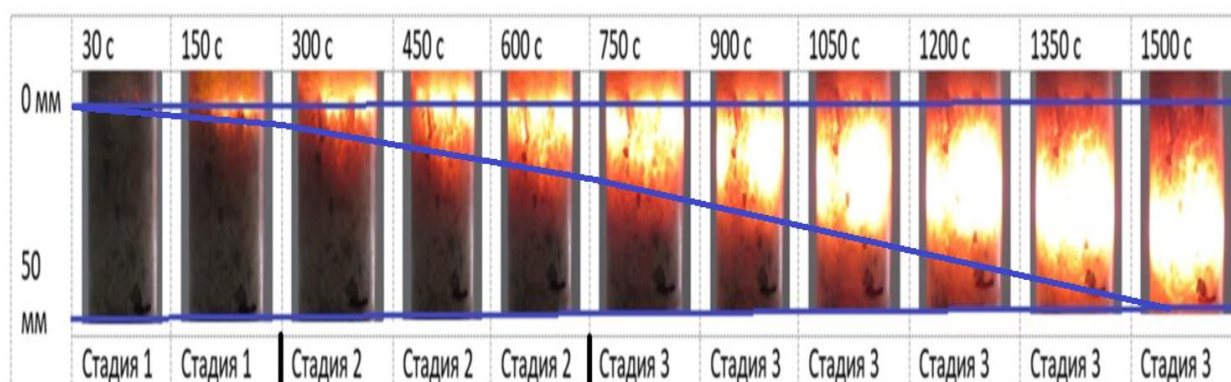


Рисунок 5 – Стадии формирования волны ФГГ:

Стадия 1 – формирование волны ФГГ; Стадия 2 – начало стационарного движения волны ФГГ; Стадия 3 – стационарное движение волны ФГГ.

Распространение волны горения регистрировали с помощью цифровой фотокамеры Canon Power Shot SX510HS. Горелка с распространяющейся в ней волной ФГГ автоматически фотографировалась через равные промежутки времени (60 с) с сохранением изображений в памяти компьютера. Полученные снимки обрабатывались в прикладной программе, позволяющей определять координаты объектов на изображениях. Для определения координат волны горения рядом с горелкой устанавливалась мерная линейка с погрешностью $\pm 1,0$ мм. В результате обработки данных эксперимента составлялись зависимости изменения координаты фронта волны ФГГ от времени.

Для обработки получаемых при эксперименте данных, явилось необходимым установить критерий момента времени формирования волны ФГГ. Пример определения характеристик процесса горения во время проведения эксперимента показан на рисунке 6.

Было принято считать временем зажигания t_{ign} промежуток времени, отсчитываемый от начала процесса до пересечения аппроксимирующих прямых, а скоростью перемещения сформировавшегося фронта пламени – наклон второй прямой. Таким образом, на графике точками в виде квадратов показаны координаты фронта пламени при входе в пористую среду и формирование волны горения ФГГ, затем, после плавного спуска, также точками в виде квадратов – координаты фронта пламени в сформировавшейся волне горения.

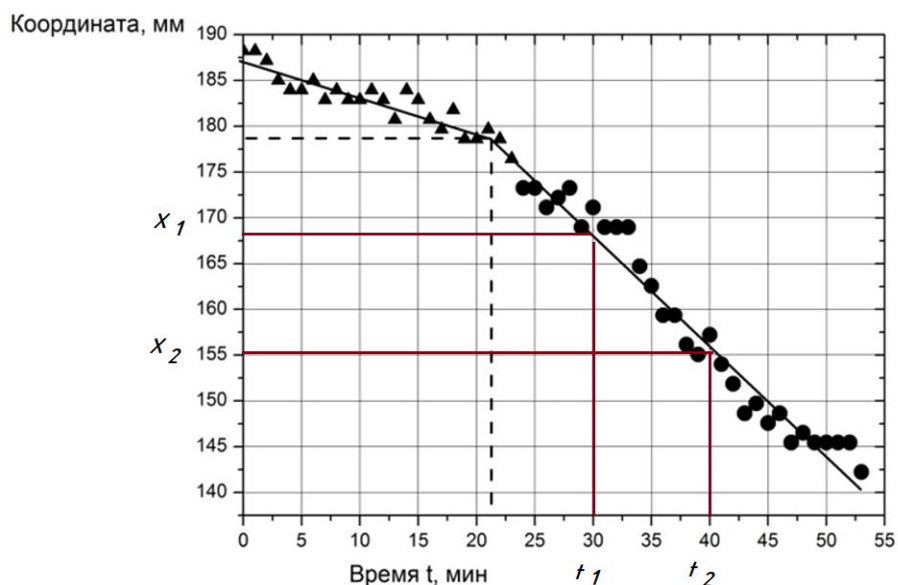


Рисунок 6 – Пример определения характеристик процесса горения.

Время зажигания волны ФГГ $t_{ign} = 1260$ с; скорость стационарной волны горения $u = (x_2 - x_1)/(t_2 - t_1) = (155 - 168)/(2400 - 1800) = -0,022$ мм/с; скорость подачи газовой смеси – $v = 17,8$ см/с. Средний диаметр зерна пористой среды $d_s = 4$ мм. Погрешность измерения положения фронта пламени: $\pm d_s = \pm 4$ мм.

После обработки данных экспериментов, согласно приведенному выше примеру, были получены зависимости, показанные на рисунке 7. Принималось, что скорость подаваемого газа имеет положительные значения, а скорость волны горения, поскольку волна ФГГ встречная, имеет отрицательные значения на графике скорости волны ФГГ от скорости подачи газа. Поэтому, например, при увеличении коэффициента внешней теплоотдачи скорость волны ФГГ уменьшится по модулю и на графике сместится вверх к оси абсцисс.

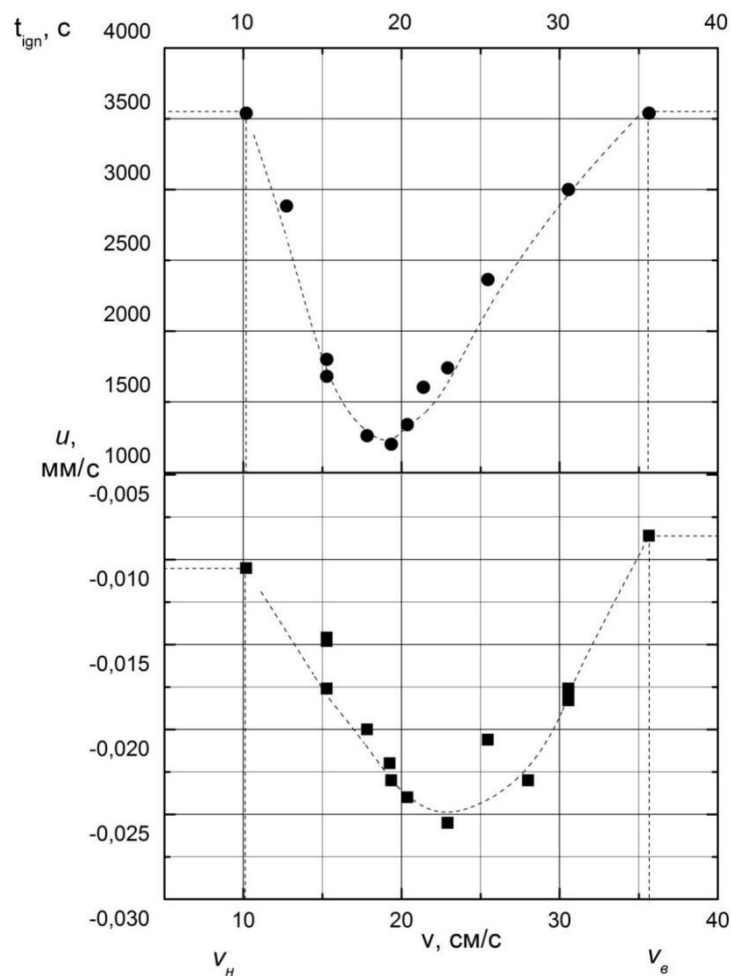


Рисунок 7 – Зависимости времени зажигания t_{ign} и скорости волны ФГГ u от скорости подачи газовой смеси v при среднем диаметре зерна пористой среды $d_s = 4$ мм:

• – время зажигания смеси (с); ■ – скорость волны ФГГ (мм/с)

В крайних точках (см. рисунок 7 при скоростях подачи газовой смеси меньших, чем $v_n = 10$ см/с и больших, чем $v_g = 37$ см/с) формирования волны горения не произошло и значения времени зажигания и скорости волны ФГГ были интерпретированы как предельные.

Значения времени зажигания при этих экспериментальных данных были выбраны пределами зажигания волны горения по скорости подачи газовой смеси при данном составе смеси, теплофизических свойствах пористой среды и размере ее зерен.

2.4. Влияние теплообмена с окружающей средой

Многие численные эксперименты и расчеты процессов ФГГ затрагивают вопросы внешнего теплообмена с окружающей средой [9, 6]. Если ставить целью исследования именно эксперимент, то обойти влияние внешнего теплообмена, исключить теплообмен с внешней средой, не представляется возможным. Следовательно, необходимо ввести коэффициент внешнего теплообмена в математическую модель для того, чтобы получить какое-либо соответствие эксперимента и расчета.

Различие условий внешней теплоотдачи от трубы экспериментальной установки достигались путем применения тепловой изоляции (каолиновой ваты толщиной $\sim 20...30$ мм), размещаемой вокруг трубы. Для того, чтобы внести коэффициент внешнего теплообмена в расчетную модель проведены необходимые оценки. Для определения коэффициента внешнего теплообмена α_w воспользуемся зависимостями и методами расчета, приведенными в [89].

Рассмотрим задачу, расчетная схема которой показана на рисунке 8.

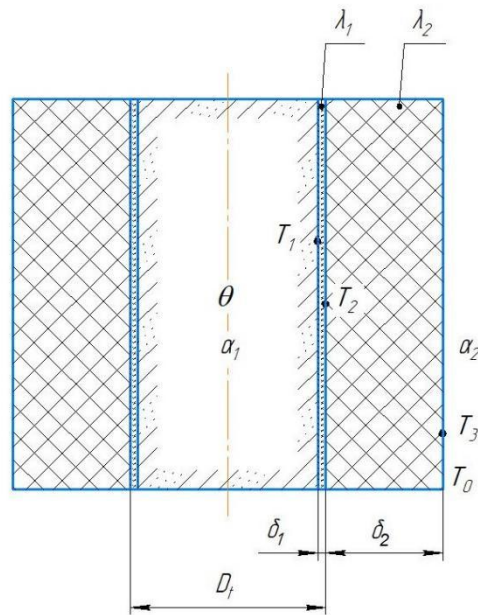


Рисунок 8 – Схема тепловой изоляции трубы с пористой средой

α_1 – коэффициент теплоотдачи от пористой среды к стенке трубы,
20 Вт/(м²·К);

α_2 – коэффициент теплоотдачи от теплоизолированной трубы к воздуху,
10 Вт/(м²·К);

λ_1 – коэффициент теплопроводности стенки трубы, 0,76 Вт/(м·К);

λ_2 – коэффициент теплопроводности теплоизоляции трубы, 0,03 Вт/(м·К);

δ_1 – толщина стенки трубы, мм;

δ_2 – толщина слоя теплоизоляции, мм;

D_t – диаметр трубы установки, мм;

T_1 – температура внутренней стенки кварцевой трубы установки, К;

T_2 – температура наружной поверхности кварцевой трубы, К;

T_3 – температура наружной поверхности теплоизолированной трубы, К;

θ – температура участка пористой среды с волной горения ФГГ, определена экспериментально, с помощью термопары хромель-алюмель и принята равной 1473 К;

T_0 – температура окружающей среды, определена экспериментально с помощью поверенного ртутного термометра, 291 К.

Кварцевая труба установки диаметром $D_t = 50$ мм и толщиной стенки $\delta_t = 2$ мм заполнена пористой средой с температурой в области волны ФГГ θ и теплоизолирована слоем каолиновой изоляции $\delta_2 = 30$ мм.

В расчетах теплопередачи через стенку цилиндрической формы удобно использовать тепловой поток, отнесенный к единице длины цилиндрической стенки – линейную плотность теплового потока

$$Q_h = Q_h/l_t, \quad (7)$$

где: Q_h – тепловой поток, Вт, l_t – длина цилиндрической стенки трубы, м.

В нашем случае расчет линейной плотности теплового потока при теплопередаче через цилиндрическую стенку, состоящую из 2 слоев разной толщины и с разными физическими свойствами, рассчитываем по формуле:

$$q_l = \frac{\pi(\theta - T_0)}{\frac{1}{\alpha_1(D_1 - 2\delta_1)} + \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_1}{D_1 - 2\delta_1} + \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{(D_t + 2\delta_2)}{D_1} + \frac{1}{\alpha_2 D_2}} = \quad (8)$$

$$= k_l \pi(\theta - T_0) = \frac{\pi(\theta - T_0)}{R_l},$$

где: k_l – линейный коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку, Вт/(м·К); R_l – линейное термическое сопротивление теплопередачи через цилиндрическую стенку, (м·К)/Вт.

Определим термические сопротивления элементарных участков:

- Участок 1 (теплоотдача от пористой среды к кварцевой трубе)

$$R_1 = \frac{1}{\alpha_1(D_t - 2\delta_1)} = \frac{1}{20 \cdot (50 - 2 \cdot 2) \cdot 10^{-3}} = 1,086 \text{ (м·К)/Вт};$$

- Участок 2 (передача тепла внутри кварцевой трубы)

$$R_2 = \frac{1}{2\lambda_1} \ln \frac{D_t}{D_t - 2\delta_1} = \frac{1}{2 \cdot 0,76} \ln \frac{50}{50 - 2 \cdot 2} = 2,025 \text{ (м·К)/Вт};$$

- Участок 3 (передача тепла внутри слоя изоляции)

$$R_3 = \frac{1}{2\lambda_2} \ln \frac{(D_t + 2\delta_2)}{D_t} = \frac{1}{2 \cdot 0,03} \ln \frac{110}{50} = 13,14 \text{ (м·К)/Вт};$$

- Участок 4 (теплоотдача от изоляции в окружающую среду)

$$R_4 = \frac{1}{\alpha_2(D_t + 2\delta_2)} = \frac{1}{10 \cdot 110 \cdot 10^{-3}} = 9,09 \text{ (м·К)/Вт}.$$

Определим линейный коэффициент теплопередачи:

$$k_l = \frac{1}{R_l} = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3 + R_4} = \frac{1}{1,086 + 2,025 + 13,14 + 9,09} = \frac{1}{17,2} = 5,83 \cdot 10^{-2} \text{ Вт/(м·К)}.$$

Рассчитаем линейную плотность теплового потока:

$$q_l = \frac{\pi(\theta - T_0)}{R_l} = \frac{3,14(1473 - 291)}{17,2} = 215,88 \text{ Вт/м}.$$

Необходимо определить температуры T_1 , T_2 , T_3 , что возможно сделать следующим образом: поскольку $q_l = \frac{\pi(\theta - T_1)}{R_1}$, тогда

$$T_1 = \theta - \frac{q_l \cdot R_1}{\pi} = 1473 - \frac{215,88 \cdot 1,086}{3,14} = 1400 \text{ К}.$$

Аналогичным образом могут быть определены остальные температуры:

$$T_2 = T_1 - \frac{q_l \cdot R_2}{\pi} = 1400 - \frac{215,88 \cdot 2,025}{3,14} = 1260 \text{ К},$$

$$T_3 = T_2 - \frac{q_l \cdot R_3}{\pi} = 1260 - \frac{215,88 \cdot 13,14}{3,14} = 354 \text{ К}.$$

Для проверки расчета возможно таким же образом определить T_0 :

$$T_0 = T_3 - \frac{q_l \cdot R_4}{\pi} = 354 - \frac{215,88 \cdot 9,09}{3,14} = 291 \text{ К}. \text{ Расчет верен.}$$

Для случая отсутствия теплоизоляции определим максимальное значение числа Рэлея по формуле

$$Ra = \frac{g \cdot l^3 \cdot (\theta - T_0)}{\nu^2} \cdot \beta \cdot Pr, \quad (9)$$

где: g – ускорение свободного падения, $9,81 \text{ м/с}^2$; l – длина трубы экспериментальной установки, $0,5 \text{ м}$; θ – температура нагретого участка пористой среды с волной ФГГ, 1473 К ; ν – кинематическая вязкость воздуха при средней температуре между горячей и холодной средами, $7,93 \cdot 10^{-5} \text{ м}^2/\text{с}$; β – термический коэффициент объемного расширения воздуха $= 1/273 \text{ К}^{-1}$; Pr – число Прандтля, $= 0,73$ для воздуха.

$$Ra = \frac{9,81 \cdot 0,5^3 \cdot (1473 - 291)}{7,93^2 \cdot 10^{-10} \cdot 273} \cdot 0,73 = 6,15 \cdot 10^8,$$

Оценим конвективную составляющую α_k суммарного коэффициента теплоотдачи

$$\langle Nu \rangle = 0,55 Ra^{1/4} = 0,55 \cdot (6,15 \cdot 10^8)^{\frac{1}{4}} = 86,6$$

Тогда $\alpha_K = \frac{\langle Nu \rangle \cdot \lambda_B}{l}$, где $\lambda_B = 0,0259$ Вт/(м·К) – теплопроводность воздуха при температуре T_0 , $\alpha_K = \frac{86,6 \cdot 0,0259}{0,5} = 4,49$ Вт/(м²·К).

Радиационную составляющую α_p суммарного коэффициента теплоотдачи определяется с учетом степени черноты, которая в нашем случае принята равной $\varepsilon = 0,95$:

$\alpha_p = \varepsilon \cdot \sigma_0 \frac{(\theta^4 - T_0^4)}{(\theta - T_0)}$, где $\sigma_0 = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴) – постоянная Стефана-Больцмана. Тогда $\alpha_p = 0,95 \cdot 5,67 \cdot 10^{-8} \frac{(1473^4 - 300^4)}{(1473 - 300)} = 214,2$ Вт/(м²·К).

Суммарный коэффициент теплоотдачи α составит $\alpha_{\text{сум}} = \alpha_K + \alpha_p = 4,49 + 214,2 = 219$ Вт/(м²·К).

Как видим, для экспериментальной установки значительная часть теплоотдачи осуществляется излучением. С помощью тепловой изоляции возможно существенно снизить температуру внешней стенки трубы с пористой средой и уменьшить коэффициент внешней теплоотдачи. В дальнейшем, в численном эксперименте, использовались значения коэффициентов внешней теплоотдачи $\alpha_w = 100 \dots 380$ Вт/(м²·К), что согласуется с определенным здесь значением α .

ГЛАВА 3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

3.1. Моделирование формирования волны ФГГ открытым пламенем

Моделировалась система, показанная на рисунке 1. В качестве параметров системы приняты следующие: диаметр трубы $D_t = 50$ мм, длиной $L = 250$ мм, внутри которой расположен пористый блок длиной $l = 180$ мм. Такая длина пористой среды существенно превышает толщину тепловой волны в пористой среде для типичных значений параметров, что позволяет интерпретировать получаемые результаты как зажигание в полуограниченной пористой среде. Слева и справа от пористого блока имеются незаполненные участки трубы. Слева подается метановоздушная смесь заданного состава со скоростью v . Зажигание осуществляется справа от пористого блока “открытым пламенем”, т.е. на некотором расстоянии от пористого блока в начальный момент задается ступенчатый профиль температуры в газовой фазе с температурой, равной адиабатической температуре горения для заданной газовой смеси.

Если скорость течения газа ниже нормальной скорости горения смеси, пламя распространяется против течения и стабилизируется на поверхности пористой среды. Стабилизированный факел пламени постепенно прогревает пористую среду, и в какой-то момент времени пламя входит в нее, формируя волну ФГГ.

Программа рассчитывает в каждый момент времени профили температуры газа и пористой среды, профиль концентрации и определяет координату пламени как точку максимума температуры газа.

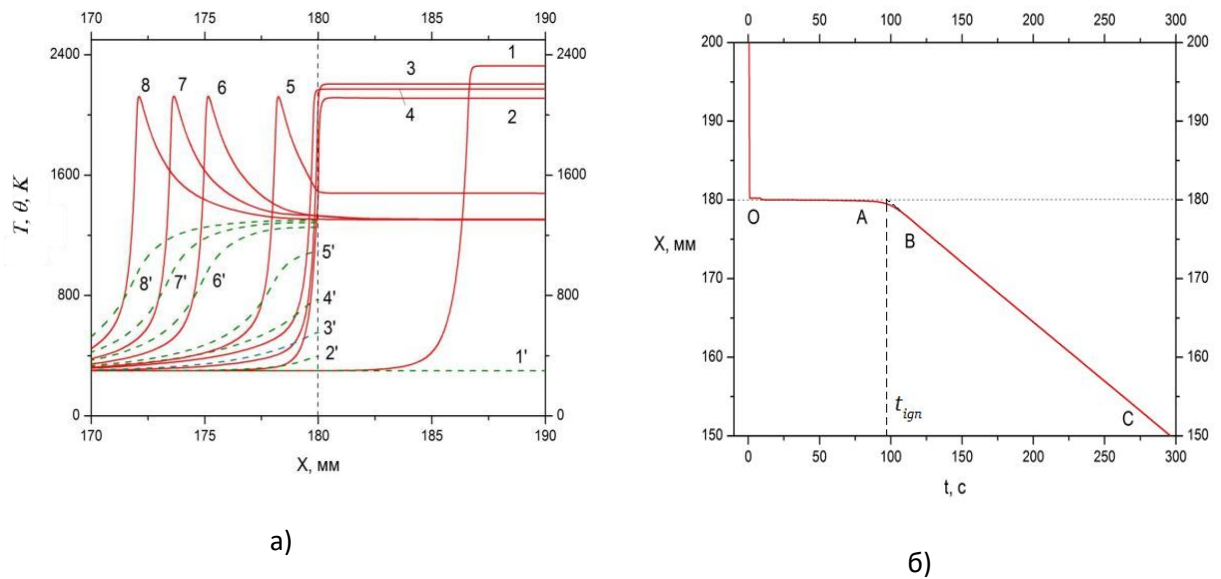


Рисунок 9 – Формирование волны ФГГ открытым пламенем:

а) – типичные изменения температурных профилей газа (тонкие линии) и пористой среды (толстые линии) в процессе зажигания волны ФГГ.

Время с момента зажигания 0.1 с (1), 1 с (2), 30 с (3), 90 с (4), 130 с (5), 140 с (6), 150 с (7);

б) – соответствующее изменение координаты пламени от времени, параметры системы: $c_s=800$ Дж/(кг·К), $\rho_s=3900$ кг/м³, $d_s=3,7$ мм, $v=0,2$ м/с, $\lambda_{eff}=20$ Вт/(м·К), $T_b=2320$ К, $m=0,5$

На рисунке 9 показан пример моделирования зажигания и распространения волны ФГГ. Температурные профили газовой смеси представлены сплошными линиями, профили пористой среды показаны штриховыми линиями в осях X , T и θ , где X – координата, T – температура газа, θ – температура пористой среды. В качестве нулевой координаты принята поверхность пористой среды. Рассматривалась пористая среда со следующими параметрами: $\rho_s=3,9 \cdot 10^3$ кг/м³, $m=0,5$, $c_s=800$ Дж/(кг·К). В качестве среднего размера зерна было принято значение $d_s=3,7$ мм.

Теплопроводность пористой среды λ_{eff} , поскольку не равна теплопроводности отдельного зерна, в данном примере опытным путем

(результаты моделирования наиболее информативны) принята равной 20 Вт/(м · К). В качестве горючей смеси взята стехиометрическая метановоздушная смесь с $T_b=2320$ К, $c_g=10^3$ Дж/(кг·К), $\lambda_g=0,1$ Вт/(м·К).

Согласно рисунку 9 после зажигания газа справа от пористого блока пламя, пробежав незаполненную часть трубы от точки зажигания газа со скоростью $S_u - v$ (S_u – нормальная скорость пламени, а v – скорость течения газа в свободной от засыпки части трубы), останавливается на границе пористого блока. Постепенно высокотемпературное газовое пламя, стабилизированное на границе пористой среды, разогревает поверхностные слои пористого блока. Теплотери от пламени в узкой поре с прогретыми стенками меньше, чем с холодными, и в результате пламя входит в пористую среду. Из рисунка 9б видно, что в приведенном примере эта стадия заняла около 2 минут, ей соответствуют кривые 2-4 на рисунке 9а и участок ОА на траектории движения волны (рисунок 9б). Все это время координата фронта пламени практически не менялась и совпадала с координатой правой границы пористого блока. После входа пламени в пористую среду достаточно быстро формируется структура волны горения, характерная для волн ФГГ. Этой стадии соответствуют кривые 5-7 на рисунке 9а и участок АВ на траектории движения (рисунок 9б). В приведенном примере, согласно рисунку 9б, эта стадия заняла около 20 с. В течение этого времени в основном завершается формирование стационарной волны ФГГ. Наконец, участок ВС на рисунке 9б соответствует распространению стационарной волны ФГГ. Эта стадия характеризуется постоянной скоростью распространения и неизменностью температурных профилей газа и пористой среды.

Время зажигания волны ФГГ определялось как время, когда координата максимума температуры газа станет меньше координаты поверхности пористой среды. Помимо времени зажигания определялась температура поверхности пористой среды в момент входа пламени.

Моделирование показало, что температура поверхности пористой среды θ_s , по достижении которой пламя входит в нее, не является величиной постоянной. При этом от скорости газа θ_s зависит слабо. Во всем диапазоне скоростей подачи газа, в котором возможно зажигание, θ_s изменялось на 100-150 градусов. Рисунок 10 демонстрирует влияние параметров пористой среды: диаметра зерна пористой среды d_s , пористости m и теплопроводности пористой среды λ_s на θ_s . При моделировании этого случая принималось $\lambda_{eff} = \lambda_s$.

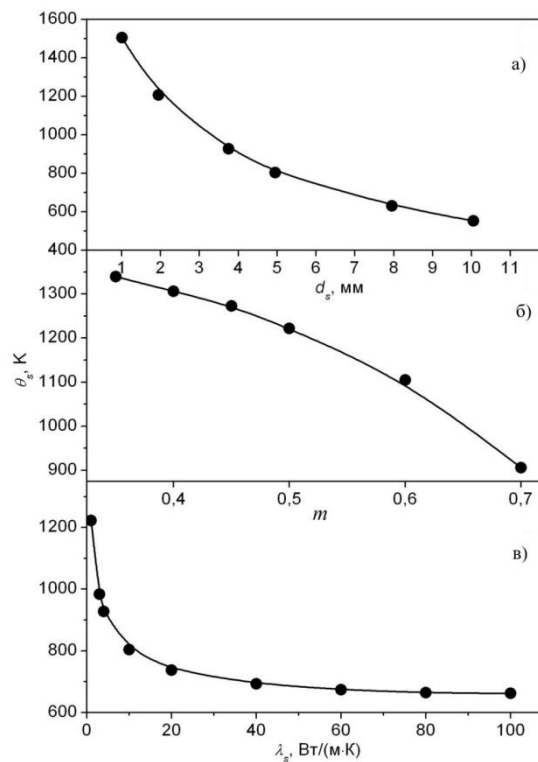


Рисунок 10 – Зависимости температуры поверхности пористой среды, соответствующей входу пламени в пористую среду, от среднего размера зерна (а), пористости (б) и теплопроводности пористой среды (в).

(а, б, в) – $T_b=2320$ К, $c_s=800$ Дж/(кг·К), $\rho_s=3900$ кг/м³, $v = 0,2$ м/с;

(а, в) – $m = 0,5$; (б, в) – $d_s=3,7$ мм; (а) – $\lambda_s=4$ Вт/(м·К); (б) – $\lambda_s=1$ Вт/(м·К)

Данные приведены для стехиометрической метановоздушной смеси и скорости газа на входе в пористую среду 0,2 м/с. Диапазоны изменения

параметров выбирались исходя из реальной возможности изменения каждого параметра в эксперименте. Видно, что при реальном изменении этих параметров θ_s может меняться на 500 – 900 К. Увеличение диаметра пор и пористости приводит к снижению θ_s во всем диапазоне изменения параметров. Увеличение теплопроводности при малых λ_s , соответствующих зернистым пористым средам, резко снижает θ_s , а дальнейшее увеличение теплопроводности в области, соответствующей канальным пористым средам, практически не влияет на θ_s . Совершенно нечувствительно θ_s к изменению произведению $c_s \rho_s$, т.е. объемной теплоемкости пористой среды.

Рисунок 11 демонстрирует типичные зависимости времени зажигания от скорости течения газа. Зависимости $t_{ign}(v)$ имеют U-образную форму. Существует значение скорости фильтрации, при котором зажигание осуществляется наиболее быстро. Для приведенных примеров это значение составляет 15–18 см/с. При малых и больших скоростях фильтрации время зажигания стремится к бесконечности, то есть зажигания не происходит. Таким образом, можно говорить о верхнем и нижнем пределах зажигания по скорости фильтрации газа и минимальном времени зажигания t_{min} , соответствующем минимуму зависимости $t_{ign}(v)$.

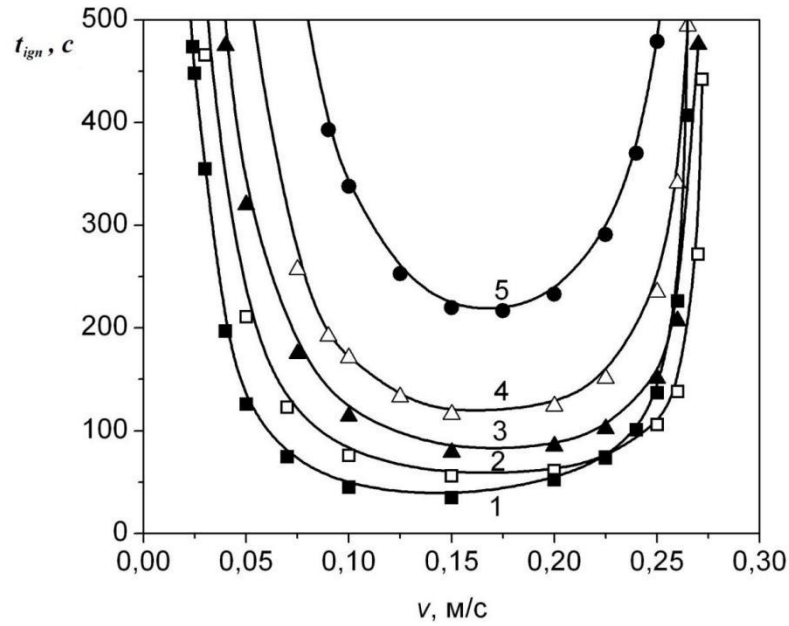


Рисунок 11 – Зависимости минимального времени зажигания волны ФГГ от скорости течения газа.

Параметры системы: $\lambda_s=4$ Вт/(м·К), $d_s=3,7$ мм (1); $\lambda_s=4$ Вт/(м·К), $d_s=7$ мм (2); $\lambda_s=10$ Вт/(м·К), $d_s=3,7$ мм (3); $\lambda_s=20$ Вт/(м·К), $d_s=3,7$ мм (4); $\lambda_s=50$ Вт/(м·К), $d_s=3,7$ мм (5). $T_b=2320$ К, $c_s=800$ Дж/(кг·К), $\rho_s=3900$ кг/м³, $v_0=0,2$ м/с, $m=0,5$

Из рисунка 11 следует, что как t_{min} , так и пределы зажигания зависят от параметров пористой среды. Расчеты показывают, что пределы зажигания слабо зависят от среднего размера зерна d_s (d_s варьировалось в диапазоне от 1 до 7 мм) и от объемной теплоемкости пористой среды $c_s \rho_s$ (в диапазоне изменения от $1 \cdot 10^6$ до $6 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К)). Более чувствительны пределы зажигания к изменению пористости m и теплопроводности пористой среды λ_s (рисунок 12).

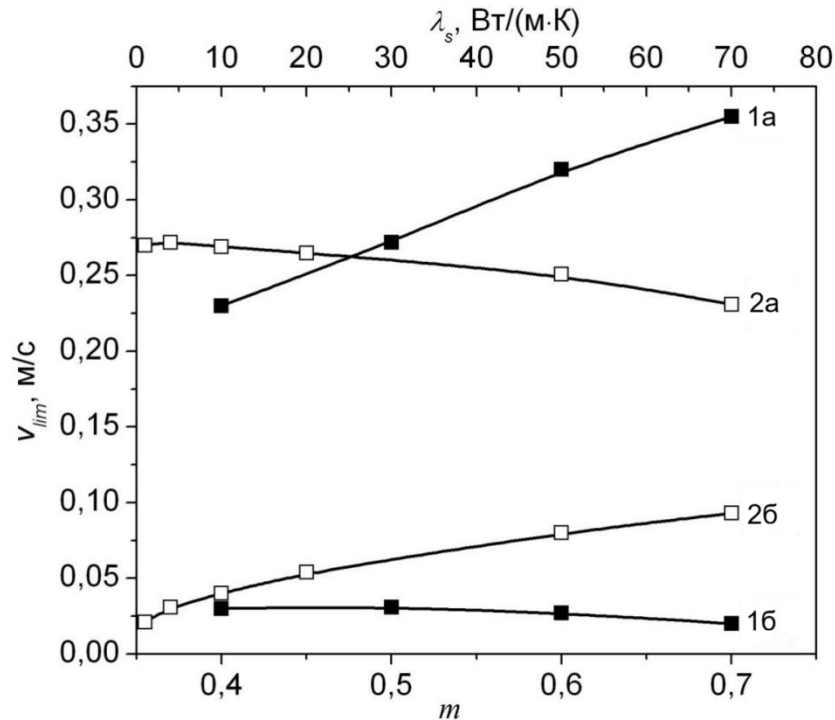


Рисунок 12 – Зависимости верхнего (а) и
нижнего (б) пределов зажигания (v_{lim})

от пористости (1) и теплопроводности (2) пористой среды

Параметры системы: $T_b=2320$ К, $c_s=800$ Дж/(кг·К), $\rho_s=3900$ кг/м³, $v=0,2$ м/с; $\lambda_s=4$ Вт/(м·К) (1), $m=0,5$ (2).

С увеличением пористости существенно увеличивается верхний предел зажигания и соответственно расширяется диапазон скоростей, в котором возможно формирование волны ФГГ (рисунок 12, кривые 1а и 1б). Увеличение теплопроводности пористой среды приводит к сужению области зажигания, причем как за счет увеличения нижнего предела, так и за счет снижения верхнего предела зажигания (кривые 2а и 2б на рисунке 12).

Минимальное время зажигания t_{ign} , в отличие от пределов, сильно зависит от всех параметров пористой среды (рисунок 13).

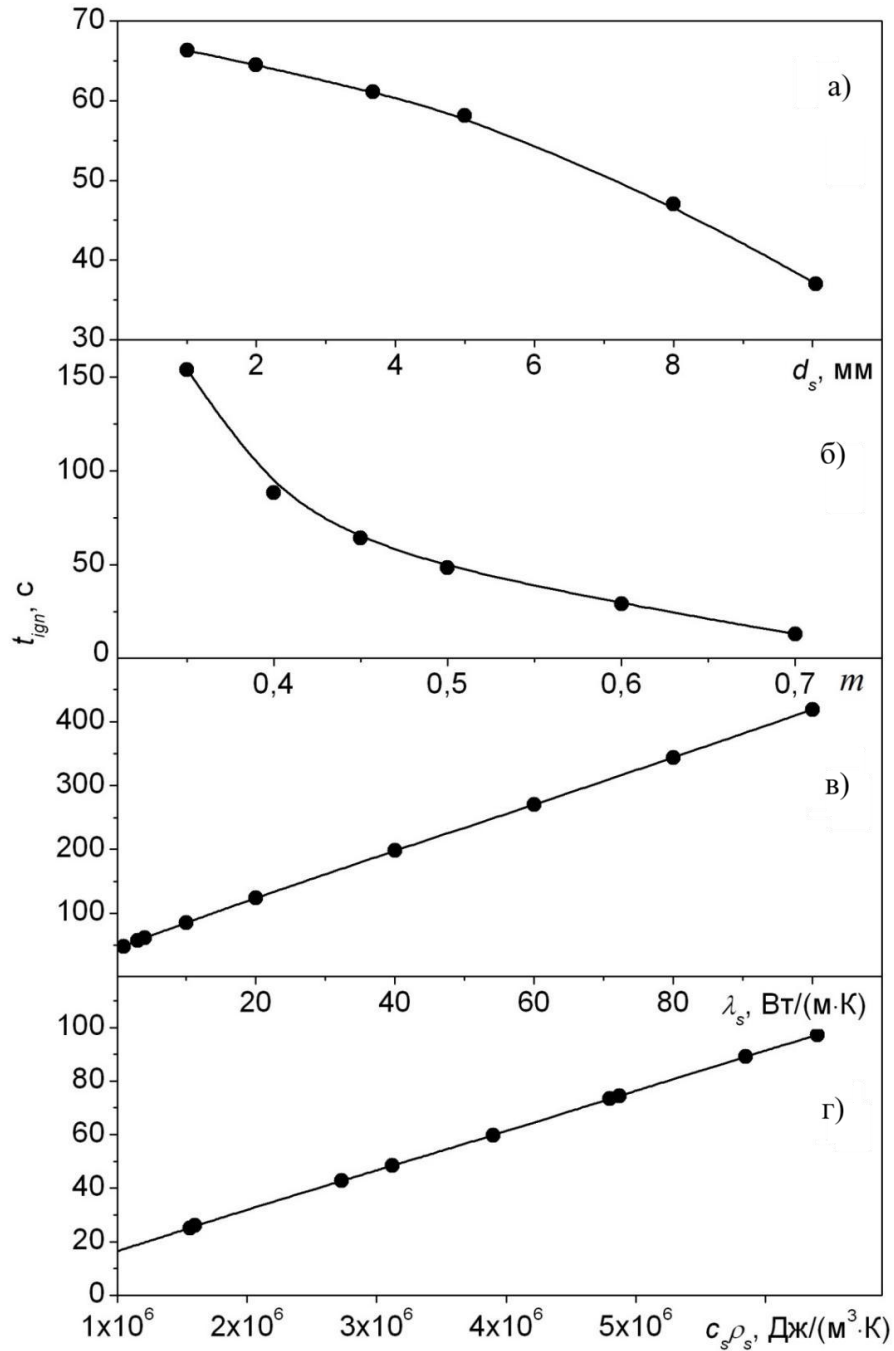


Рисунок 13 – Зависимости минимального времени зажигания волны ФГГ от среднего размера зерна (а), пористости (б), теплопроводности (в) и объемной теплоемкости (г) пористой среды

Параметры системы: (а, б, в, г) – $T_b=2320$ К, $v_0=0,2$ м/с, $m=0,5$; (а, б, в) – $c_s=800$ Дж/(кг·К), $\rho_s=3900$ кг/м³; $d_s=3,7$ мм – (б, в, г); (а) – $\lambda_s=4$ Вт/(м·К); (б, г) – $\lambda_s=1$ Вт/(м·К).

Рост среднего диаметра зерна d_s и пористости m приводит к ускорению зажигания, а увеличение теплоемкости и теплопроводности пористой среды – напротив, к увеличению времени зажигания.

Рисунок 9 позволяет понять механизмы и закономерности, действующие в стадии зажигания волны ФГГ в пористой среде. Распространение пламени по пористой среде с размером пор меньшим критического возможно только в связке с тепловой волной в твердой фазе. Поэтому на стадии зажигания пламя должно прогреть близлежащие участки пористой среды и сформировать волну ФГГ. Рисунок 9а показывает изменение со временем профилей температуры газа и пористой среды в процессе формирования волны ФГГ в пористой среде. Профиль температуры газа 1 представляет собой профиль ламинарного адиабатического газового пламени, распространяющегося стационарно по участку трубы, свободному от пористой среды. Далее пламя подходит к границе пористого блока и останавливается. Стабилизация происходит за счет того, что, когда пламя подходит вплотную к пористому блоку, часть зоны подогрева пламени оказывается в поровом пространстве (см. рис. 9а, профиль температуры газа 2). При этом снижается температура пламени (сравнить профили температуры газа 1 и 2 на рисунке 9а), что обусловлено теплопотерями от пламени в пористую среду. Согласно [81] это приводит к снижению нормальной скорости пламени, которая уравнивается скоростью потока фильтрующегося газа. Если бы температура пористой среды не менялась (случай бесконечно большой теплопроводности пористой среды), то пламя так и осталось бы стабилизированным на границе пористого блока. Однако пористая среда прогревается за счет межфазного теплообмена с газом в поровом пространстве (см. рисунок 9а, профиль температуры пористой среды 2). Сначала прогрев пористой среды идет очень медленно за счет того, что в поровом пространстве располагается только низкотемпературная часть пламени. По мере прогрева приповерхностных слоев пористой среды становится заметным действие теплопроводности пористой среды, которая

переносит тепло вглубь нее. В результате уже через 0,5 минут (рисунок 9а, кривые 3) в структуре волны горения появляется область, где температура пористой среды выше, чем газа (область отрицательного температурного напора). При этом возникает положительная обратная связь. Новые порции газа, проходя область с отрицательным температурным напором, подогреваются, увеличивая энтальпию горящего газа. Это приводит к повышению температуры горения (сравнить профили температуры газа 2 и 3) и незначительному смещению пламени вглубь пористой среды. По мере входа в пористую среду высокотемпературной зоны пламени теплотери от пламени увеличиваются, что приводит к снижению максимальной температуры газа (рисунок 9а, кривая 5). Одновременно ускоряется прогрев пористой среды. Когда температура поверхности пористой среды достигает некоторой величины θ_s , пламя входит в пористую среду, то есть координата максимума температуры газа оказывается в области пористой среды. Вход высокотемпературной зоны газового горения в поровое пространство приводит к резкому увеличению разницы температур газа и пористой среды и, как следствие, быстрому разогреву пористой среды. После этого начинается быстрое формирование волны ФГГ с характерным пиком температуры газа и распространение зоны горения по пористой среде.

Попытаемся протестировать возможные физические модели зажигания волн ФГГ с точки зрения их способности объяснить полученные параметрические зависимости. Одна из моделей зажигания волн ФГГ состоит в том, что пламя, стабилизированное на поверхности пористой среды, прогревает приповерхностные слои до температуры, обеспечивающей самовоспламенение газовой смеси при ее течении через пористую среду. В этом случае θ_s должно быть, по крайней мере, выше температуры самовоспламенения соответствующей газовой смеси. Согласно справочным данным температура самовоспламенения стехиометрической метановоздушной смеси составляет 810 К [90]. Из рисунка 10 видно, что θ_s в ряде случаев значительно меньше этой величины, по крайней мере, при

больших значениях d_s и λ_s . Это обстоятельство указывает на несостоятельность модели самовоспламенения при зажигании волн ФГГ.

В основе другой возможной модели лежит предположение, что зажигание волны ФГГ происходит, когда в приповерхностных слоях пористой среды реализуются условия, обеспечивающие возможность горения газа в порах. Согласно классической теории предела [81] горение газа в канале (поре) возможно, когда число Пекле $Pe = S_u d / \kappa$ больше известного критического значения Pe_{cr} (согласно [91] $Pe_{cr} = 76$). Здесь S_u – нормальная скорость горения газовой смеси, d – эквивалентный диаметр порового канала, κ – температуропроводность газовой смеси. Данный критерий получен из рассмотрения критического уровня теплотерь от пламени в стенки канала. Модель предполагает однородную вдоль пламени температуру стенки канала θ , совпадающую с начальной температурой газа. Чтобы адаптировать модель для условий горения в пористой среде, здесь под температурой пористой среды θ будем понимать усредненную по толщине пламени температуру приповерхностных слоев пористой среды $\overline{\theta}_s$ в момент входа пламени в пористую среду. Начальную температуру газа также будем считать равной $\overline{\theta}_s$, что имеет смысл, по крайней мере, при сильном теплообмене. Выразим Pe через параметры системы. Воспользуемся температурной зависимостью нормальной скорости пламени в степенном виде [92] $S_u = S_{u0} (\overline{\theta}_s / T_H)^n$. Здесь S_{u0} – нормальная скорость горения при температуре $T_H = 291$ К, n – температурный показатель ($1 < n < 3$) [9]. Температуропроводность $\kappa \approx \kappa_0 (\overline{\theta}_s / T_H)^{1.5}$ [9]. Эквивалентный диаметр порового канала d выразим через диаметр зерна d_s в предположении сферической формы зерна: $d = 2d_s m / 3(1 - m)$ [5]. Тогда условие, обеспечивающее возможность горения газа в поре, приобретает вид:

$$Pe = \frac{2S_{u0}d_sm}{3\kappa_0(1-m)} \left(\frac{\overline{\theta}_s}{T_0} \right)^{n-1,5} > Pe_c. \quad (10)$$

Принимая $n=2$ [92], получим выражение для $\overline{\theta_s}$, обеспечивающее возможность горения газа в пористой среде:

$$\frac{\overline{\theta_s}}{T_0} = \left(\frac{3Pe_c k_0 (1-\varepsilon)}{2S_{u0} d_s \varepsilon} \right)^2. \quad (11)$$

Осталось выразить $\overline{\theta_s}$ через θ_s . Произведем разложение температуры пористой среды вблизи поверхности и усредним ее по толщине зоны пламени δ :

$$\overline{\theta_s} = \left(\theta_s + \left(\theta_s - \frac{d\theta_s}{dx} \delta \right) \right) / 2 = \theta_s - \frac{\delta}{2} \frac{d\theta_s}{dx}. \quad (12)$$

Здесь $\frac{d\theta_s}{dx}$ - градиент температуры пористой среды на поверхности.

Объединяя (9) и (10), получим

$$\theta_s = T_0 \left(\frac{3Pe_c k_0 (1-\varepsilon)}{2S_{u0} d_s \varepsilon} \right)^2 + \frac{\delta}{2} \frac{d\theta_s}{dx}. \quad (13)$$

Второй член в (13) существен только когда температура пористой среды вблизи поверхности заметно меняется в пределах толщины пламени. Крутизна температурного профиля определяется величиной теплопроводности пористой среды λ_s : чем меньше λ_s , тем круче температурный профиль и тем больше градиент $d\theta_s/dx$. Поэтому вклад второго члена в (13) возрастает с уменьшением λ_s . Расчеты показывают, что второй член становится заметен при $\lambda_s < 10$ Вт/(м·К).

Из (13) следует, что θ_s должна падать с ростом d_s и m в соответствии с рисунком 10а и 10б. От плотности и теплоемкости стенок канала теплотери не зависят, поэтому понятно отсутствие зависимости θ_s от $c_s \rho_s$. От теплопроводности пористой среды теплотери от пламени в пористую среду также не зависят. Однако, как показано выше, с уменьшением λ_s растет второй член в (13). Поэтому θ_s должно падать с ростом λ_s при малых значениях λ_s и стремиться к постоянной величине при больших λ_s , определяемой первым членом в (13). Именно такое поведение зависимости $\theta_s(\lambda_s)$ демонстрирует рисунок 10в. Таким образом, модель, основанная на критическом уровне теплотери от пламени в пористую среду, дает

параметрические зависимости, качественно совпадающие с результатами численного моделирования. Это позволяет использовать ее как основу для разработки аналитической модели зажигания волн ФГГ.

Выводы

1. Проведено математическое моделирование формирования волны ФГГ в полуограниченной адиабатической пористой среде при ее инициировании открытым пламенем.
2. Описана схема формирования волны ФГГ при ее инициировании открытым пламенем.
3. Показано наличие нижнего и верхнего пределов зажигания по скорости подачи горючего газа. Установлены параметрические зависимости температуры поверхности и минимального времени зажигания от пористости, среднего размера зерна пористой среды, ее объемной теплоемкости и теплопроводности. Проведен анализ результатов на основе двух возможных моделей зажигания.

3.2. Моделирование формирования волны ФГГ нагретым участком пористой среды

Использованная при численном моделировании математическая модель описана в п. 2.1. Примененная расчетная схема приведена там же на рисунке 2. В качестве пористой среды принят электрокорунд, со следующими характеристиками [9, 87]: теплоемкость $c_s=800$ Дж/(кг·К), плотность $\rho_s=3900$ кг/м³, пористость $m=0,5$; диаметр зерна $d_s=3,7$ мм. Коэффициент теплопроводности пористой среды принят $\lambda_s=2$ Вт/(м·К). Длина участка с пористой средой $L=200$ мм. Диаметр моделируемой трубы $D_t=50$ мм.

В начальный момент времени задавался прямоугольный профиль температуры пористой среды с температурой θ_{ign} и длиной l , которые варьировались в численных расчетах.

Типичные результаты моделирования процесса формирования волны ФГГ приведены на рисунке 14 (а, б, в). Температурные профили газовой смеси представлены сплошными линиями, профили пористой среды показаны штриховыми линиями в осях X , T и θ , где X – координата, T – температура газа, θ – температура пористой среды. Источником воспламенения газовой смеси служит участок пористой среды со ступенчатым температурным профилем и начальной температурой θ_{ign} (кривая 1, рис. 14а).

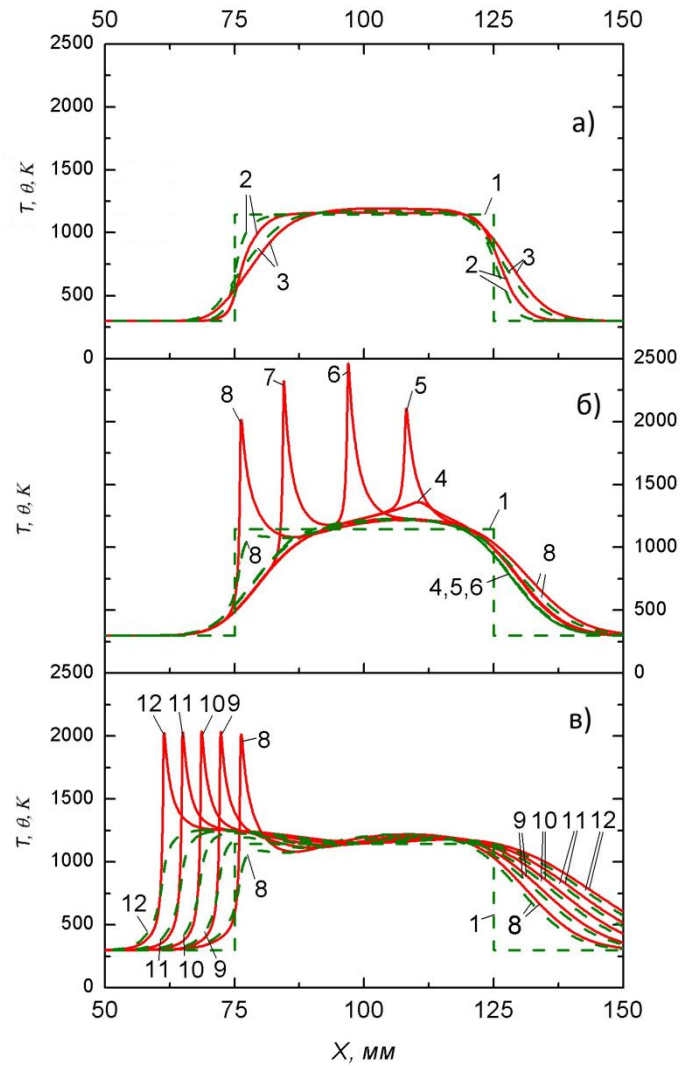


Рисунок 14 – Температурные профили газовой смеси (сплошные линии) и пористой среды (штриховые линии) в процессе формирования волны ФГГ нагретым участком пористой среды.

Время от начала подачи газовой смеси: 1 – 0 с; 2 – 3 с; 3 – 20 с; 4 – 33,2 с; 5 – 33,4 с; 6 – 34 с; 7 – 35 с; 8 – 50 с; 9 – 75 с; 10 – 100 с; 11 – 125 с; 12 – 150 с;
 $l=50$ мм, $v=17,3$ см/с, $\theta_{ign}=1145$ К

Согласно рисунку 14 процесс формирования волны ФГГ может быть разделен на несколько стадий. Сначала газ прогревается от нагретого участка пористой среды и в нем активируются химические реакции (кривые 2, 3, рисунок 14а). Температура газа на переднем фронте нагретого участка (по

ходу движения газа) ниже температуры пористой среды, но в середине и на заднем фронте участка температура газа превышает температуру пористой среды. Это указывает на активацию химических реакций. На второй стадии происходит вспышка газа (кривые 4, 5, рисунок 14б), о чем свидетельствует появление пика температуры газовой фазы. В данном примере вспышка происходит вблизи заднего фронта температурного профиля нагретого участка пористой среды. Затем пламя перемещается со скоростью около 1 см/с по нагретому участку пористой среды (кривые 6 – 8, рисунок 14б) с последующей стабилизацией на переднем фронте нагретого участка (кривые 8, рисунок 14б). Перемещение пламени по нагретому участку пористой среды обусловлено тем, что нормальная скорость пламени в условиях повышенной температуры газа на прогретом участке превышает скорость набегающего потока. По мере распространения пламени в более холодные области пористой среды снижается нормальная скорость его распространения. В результате происходит стабилизация пламени на участке пористой среды, где обеспечивается уравнивание скорости горения и скорости встречного потока газа. На третьей стадии происходит прогрев пористой среды от стабилизированного пламени и квазистационарное распространение сформировавшейся волны ФГГ (кривые 9 – 12, рисунок 14в) по пористой среде навстречу потоку газовой смеси. При этом температурные профили пористой среды некоторое время имеют двугорбую форму (кривые 8 – 11, рисунок 14в), обусловленную тем, что на переднем фронте идет прогрев пористой среды сместившимся пламенем газа, а на заднем фронте еще не успело произойти ее охлаждение вследствие кондуктивного отвода тепла в пористую среду.

Описанные фазы формирования волны также можно отследить на рисунке 15, на котором приведены изменения максимальных температур газа и пористой среды и изменение координат, соответствующих максимумам температур газа и пористой среды в процессе формирования волны ФГГ.

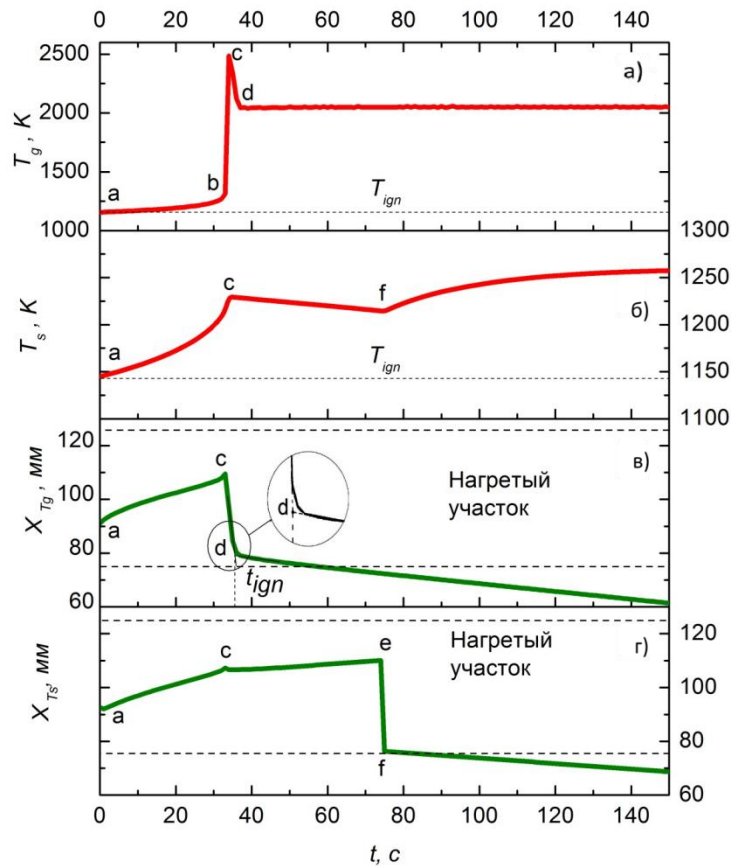


Рисунок 15 – Изменение максимальных температур газа (а), пористой среды (б), координат максимумов температур газа (в) и пористой среды (г) в процессе формирования волны ФГГ.

Параметры системы: $l=50$ мм, $v=17,3$ см/с и $\theta_{ign} = 1145$ К,
время зажигания $t_{ign} = 38$ с.

Участок $a - b$ на рисунке 15 соответствует первой стадии формирования волны ФГГ. За счет теплообмена с пористой средой идет постепенный прогрев газовой смеси и активируются химические реакции в газе. При этом растет температура газовой смеси (рисунок 15а) и температура пористой среды (рисунок 15б). Координаты максимума температуры газа (рисунок 15в) и пористой среды (рисунок 15г) смещаются в сторону заднего фронта первоначально нагретого участка.

На участке $b - c$ (рисунок 15а) происходит вспышка газовой смеси. Пламя достигает максимальной температуры (момент времени c , рисунок 15а)

и распространяется по нагретому участку пористой среды к более холодным областям (участок $c - d$, рисунок 15в), что сопровождается снижением его температуры (рисунок 15а). После смещения пламени возникает двугорбость температурных профилей пористой среды. Координата максимума температуры пористой среды продолжает некоторое время смещаться по ходу движения газа (участок $c-e$, рисунок 15г), находясь в области заднего фронта температурного профиля пористой среды. Ее резкое изменение (участок $e - f$, рисунок 15в) обусловлено тем, что сместившееся пламя прогрело холодную пористую среду в области переднего фронта и температура первого максимума температурного профиля пористой среды становится большей, чем температура второго. После перемещения пламени к переднему фронту начинается формирование стационарной волны ФГГ и ее дальнейшее стационарное распространение, на что указывает линейный участок перемещения максимума температуры газовой смеси по времени (рисунок 15в).

Количественной характеристикой процесса формирования (зажигания) волны ФГГ выбрано время t_{ign} – время от начала процесса моделирования до возникновения стационарной волны ФГГ. Моментом появления такой волны принята координата по оси абсцисс (рисунок 15в) точки пересечения аппроксимирующих прямых (точка d): прямой, аппроксимирующей участок перемещения максимума температуры газа по нагретой области пористой среды (участок $c - d$) и прямой, аппроксимирующей линейное перемещение максимума температуры (см. выноски на рисунке 15в).

На рис. 16, 17, 18 показаны типичные зависимости времени зажигания волны ФГГ t_{ign} от параметров газовой смеси и пористой среды.

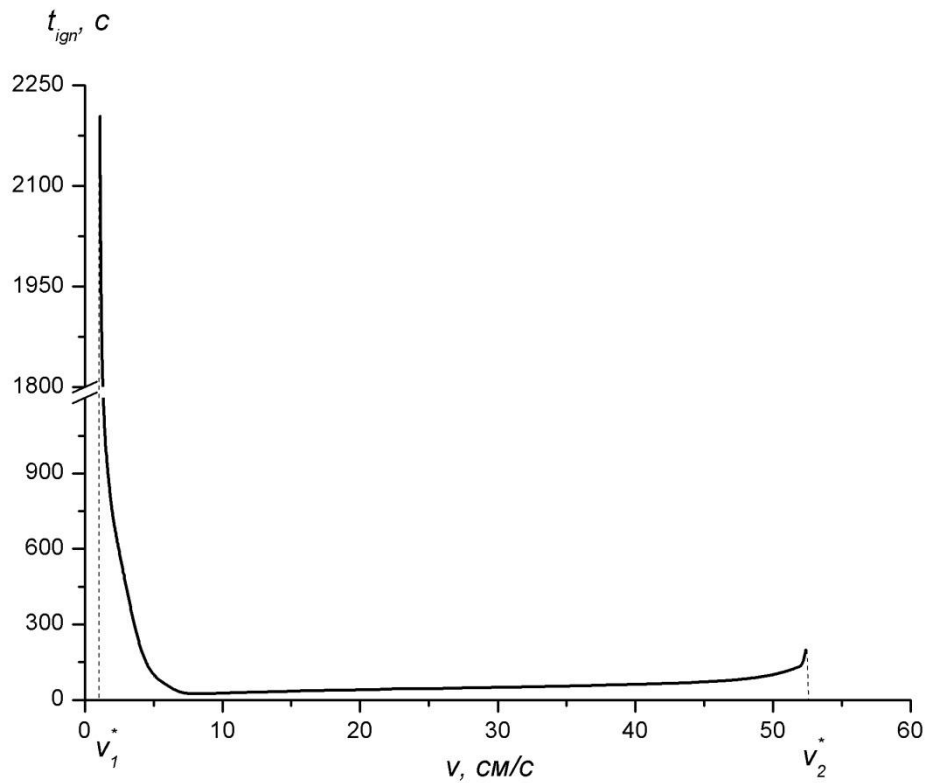


Рисунок 16 – Зависимость времени зажигания волны ФГГ
от скорости подачи газа при $\theta_{ign}=1145\text{K}$, $l=50$ мм

Зависимость t_{ign} от скорости подачи газа v носит U-образный характер (рисунок 16). Со стороны низкой и высокой скоростей подачи газа наблюдаются два предельных значения v_1^* , и v_2^* , ниже и выше которых зажигания волны ФГГ не происходит.

Предположительно нижний предел зажигания по скорости подачи газа обусловлен конкуренцией между скоростью поступления тепла за счет химической реакции и скоростью его отвода из зоны горения за счет теплопроводности пористой среды. При v меньшей, чем v_1^* , начиная с некоторого момента времени, скорость отвода тепла превышает скорость его поступления. Верхний предел по скорости подачи вероятно связан с необходимостью прогрева газа до температуры вспышки. При больших, чем v_2^* скоростях газ проходит через нагретый участок, не успевая нагреться.

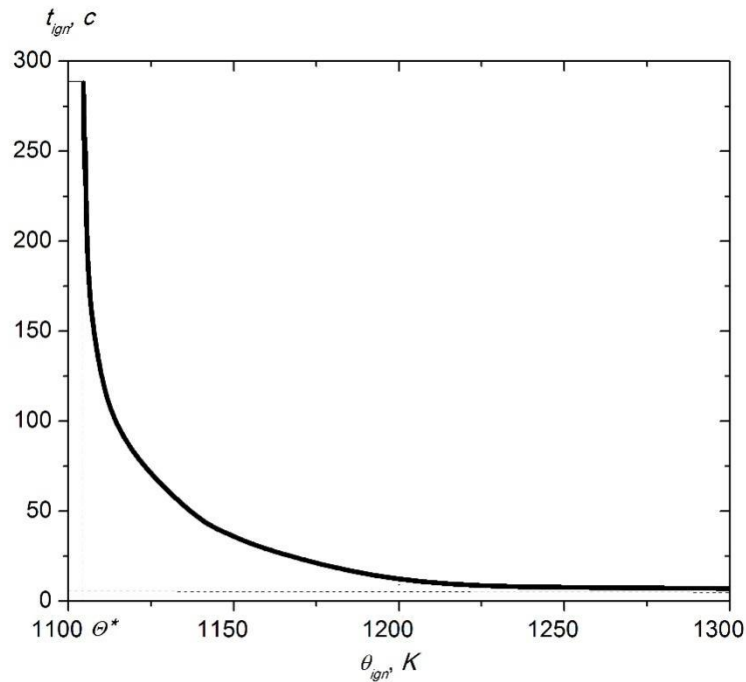


Рисунок 17 – Зависимость времени зажигания волны ФГГ
от температуры инициирующего участка пористой среды θ_{ign}
при $v = 17,3$ см/с, $l=50$ мм

Зависимость t_{ign} от температуры инициирующего участка пористой среды θ_{ign} имеет вид ниспадающей кривой (рисунок 17). Значение $\theta_{ign} = \theta^*$ является предельным значением. При температуре нагретого участка ниже θ^* зажигание волны ФГГ не происходит. При больших значениях θ_{ign} время зажигания t_{ign} изменяется слабо, стремясь к некоторому минимальному значению.

Предположительно предел зажигания по температуре нагретого участка обусловлен тем, что при $\theta_{ign} < \theta^*$ газ не успевает нагреться до необходимой для вспышки температуры.

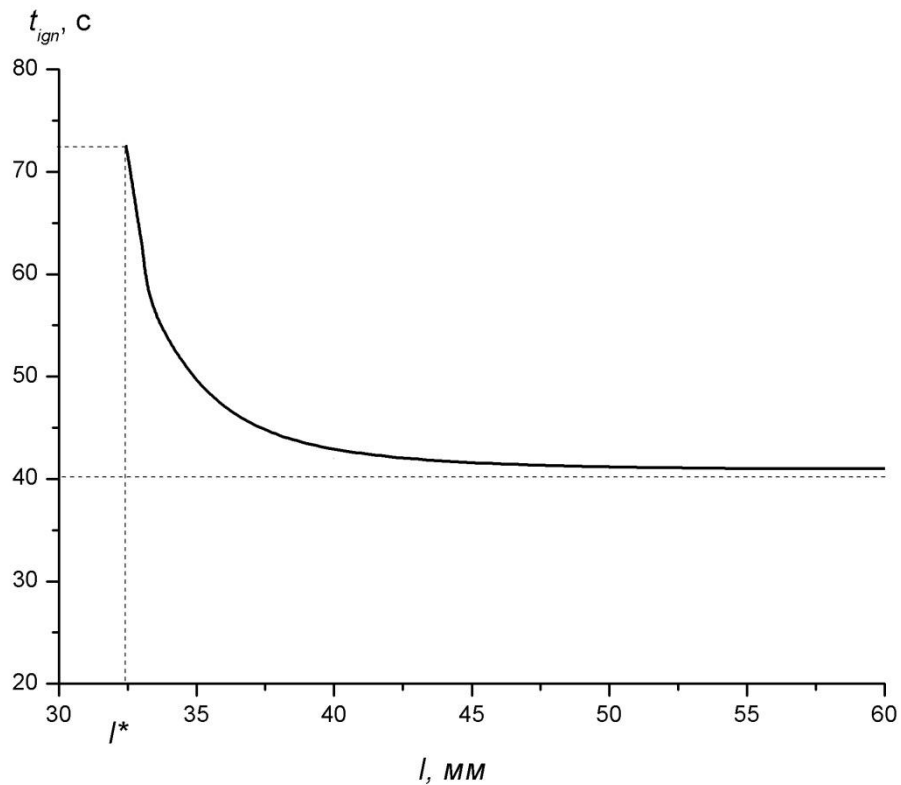


Рисунок 18 – Зависимость времени зажигания волны ФГГ
от длины нагретого участка пористой среды l
при $v = 17,3 \text{ см/с}$, $\theta_{ign} = 1145\text{K}$

Зависимость t_{ign} от длины нагретого участка пористой среды l (рисунок 18) также имеет вид ниспадающей кривой. Ниже определенного значения l^* зажигание волны ФГГ не происходит, что позволяет говорить о пределе зажигания по длине нагретого участка. При увеличении l время зажигания волны ФГГ стремится к некоторому значению.

Предел зажигания по длине нагретого участка, вероятно, также обусловлен необходимостью нагрева газа до температуры вспышки.

Из обнаруженных пределов наибольший интерес представляет предел по температуре инициирующего нагретого участка и зависимости этого предела от параметров системы. На рисунках 19 и 20 приведены зависимости предельной температуры нагретого участка θ_{ign} , обеспечивающей зажигание,

от скорости подачи газа v (рисунок 19) и длины нагретого участка пористой среды l (рисунок 20).

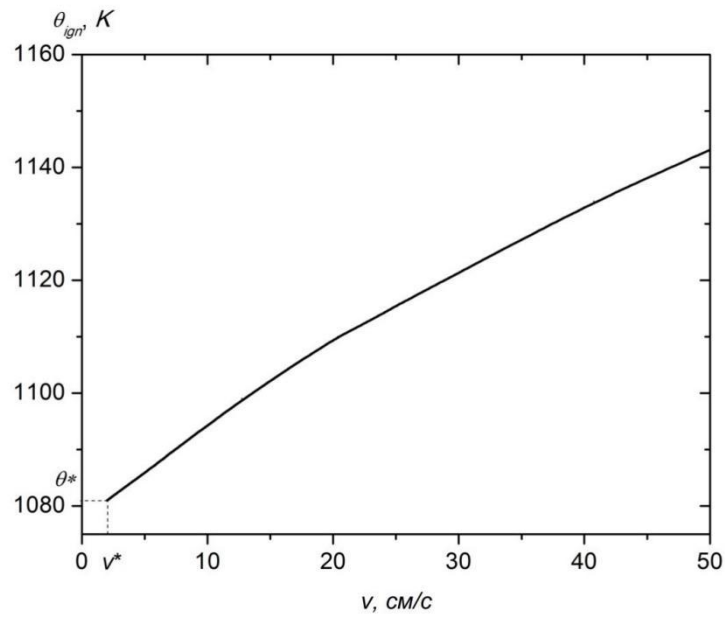


Рисунок 19 – Зависимость температуры нагретого участка пористой среды от скорости подачи газа при $l = 50$ мм

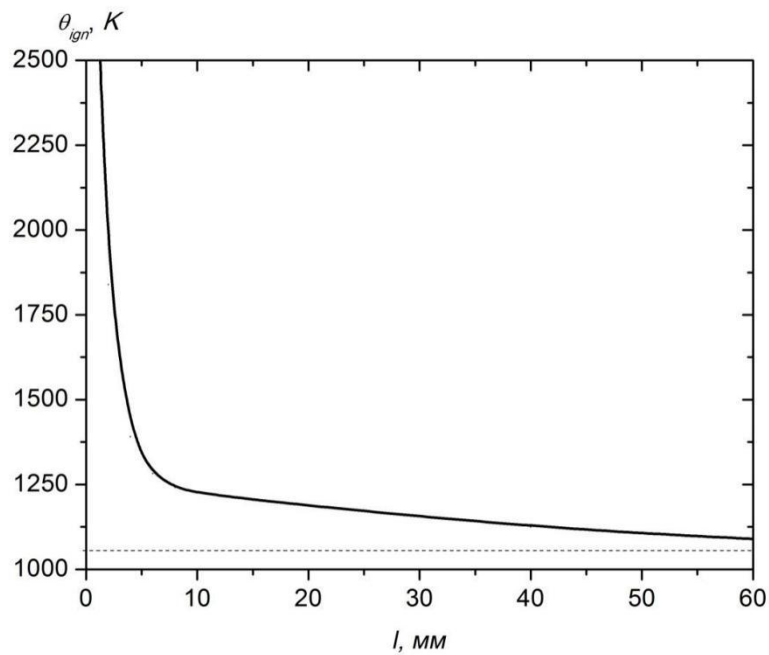


Рисунок 20 – Зависимость температуры нагретого участка пористой среды от длины нагретого участка при $v = 17,3$ см/с

θ_{ign} слабо растет с ростом v . Такое поведение объяснимо в рамках предположенной выше природы предела. С увеличением скорости течения газа уменьшается время его пребывания в области нагретого участка. Поэтому температура нагретого участка должна увеличиться, чтобы обеспечить нагрев поступающего газа для протекания химических реакций. Но так как зависимость степени превращения от температуры экспоненциальная, а от времени линейная, то значительное, в несколько раз, увеличение скорости течения газа требует весьма незначительного увеличения температуры нагретого участка. Это объясняет слабую зависимость $\theta_{ign}(v)$.

Эти же рассуждения объясняют слабое увеличение θ_{ign} с уменьшением длины нагретого участка l при $l > 10$ мм (рисунок 20). Однако дальнейшее уменьшение l приводит к резкому росту температуры зажигания. Согласно рисунку 20 при $l < 10$ θ_{ign} возрастает примерно во столько же раз, во сколько уменьшается длина нагретого участка. Это обстоятельство указывает на то, что при малых l лимитирует не протекание химических реакций, а прогрев газа от пористой среды до температуры активации химических реакций. Тепло, получаемое газом при течении по прогретому участку пористой среды, пропорционально разнице температур газа и пористой среды и времени нахождения газа в области нагретого участка. При уменьшении длины нагретого участка пропорционально падает время теплообмена. Поэтому для того чтобы обеспечить нагрев газа до температуры химических реакций требуется пропорциональное увеличение температуры нагретого участка.

Выводы

1. Проведено математическое моделирование формирования волны ФГГ при ее инициировании нагретым участком инертной пористой среды.
2. Описана схема течения процесса формирования волны ФГГ при ее инициировании нагретым участком пористой среды и его особенности.
3. Получены зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости потока газовой смеси, от температуры нагретого участка пористой среды, его длины. Установлено наличие пределов зажигания волны ФГГ по скорости подачи горючего газа.

3.3. Экспериментальные исследования формирования волны ФГГ

Полученные при экспериментальном исследовании на установке, описанной в п. 2.2. зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи исходной газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен 4 мм представлен на рисунке 21.

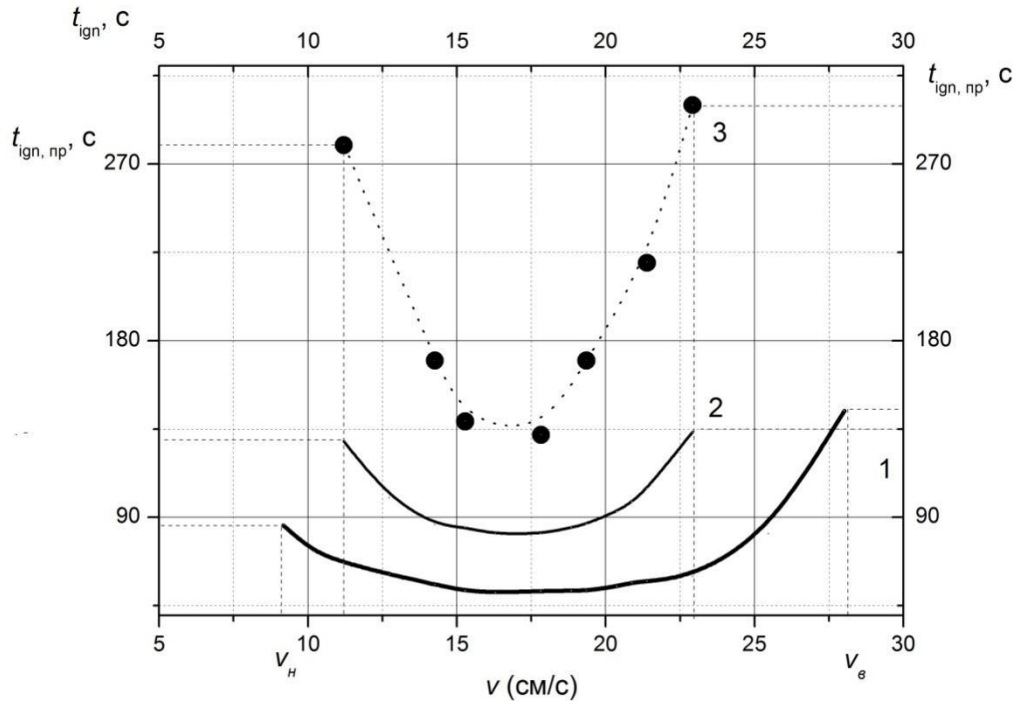


Рисунок 21 – Зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен $d_s = 4$ мм.

Расчетные и экспериментальные данные:

1 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 0 \frac{Вт}{м^2 К}$;

2 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 250 \frac{Вт}{м^2 К}$;

3 – экспериментальные данные

На рисунке 21 показан аналогичный график зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен $d_s = 5$ мм.

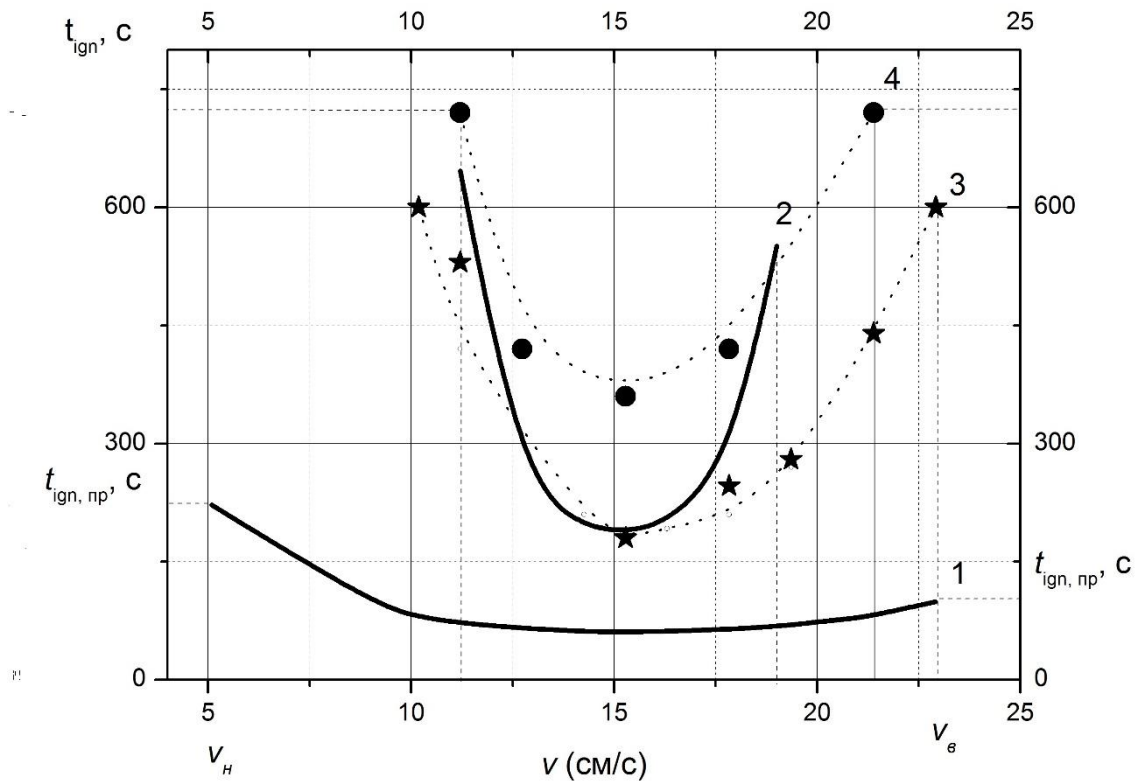


Рисунок 22 – Зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости подачи газовой смеси для пористой среды со средним диаметром зерен $d_s = 5$ мм.

Расчетные и экспериментальные данные:

1 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 0 \frac{Вт}{м^2 K}$;

2 – коэффициент внешней теплоотдачи $\alpha_w = 380 \frac{Вт}{м^2 K}$;

3 – экспериментальные данные при использовании тепловой изоляции;

4 – экспериментальные данные без использования тепловой изоляции

Одним из полученных результатов экспериментального исследования является обнаружение предельных значений скорости подачи горючего газа v_H и $v_с$ при которых формирования волны ФГГ не происходит (рисунок 21, рисунок 22).

Наличие этих пределов предположительно обусловлено конкуренцией между скоростью поступления тепла за счет химической реакции и

скоростью его отвода из зоны горения за счет теплопроводности пористой среды. При v меньшей, чем v_n , скорость отвода тепла превышает скорость его поступления. Верхний предел по скорости подачи газа v_g обусловлен высоким конвективным выносом тепла за пределы пористой среды. При скоростях подачи газа больших, чем v_g , горячий прореагировавший газ прогревает только тонкий слой твердой фазы до температуры, недостаточной для входа пламени.

Полученные зависимости показывают влияние коэффициента внешней теплоотдачи на время зажигания волны ФГГ (рисунок 21, рисунок 22). При наличии отвода тепла во внешнюю среду время зажигания волны ФГГ t_{ign} увеличивается, о чем свидетельствуют различные предельные значения $t_{ign, пр.}$. Наличие этих пределов также обусловлено конкуренцией между скоростью поступления тепла за счет химической реакции и скоростью его отвода из зоны горения во внешнюю среду.

Сравнение рисунков 21 и 22 указывает на несущественное влияние среднего диаметра зерна пористой среды d_s на время зажигания волны ФГГ t_{ign} , что согласуется с данными, приведенными в работе [9] и полученными численным моделированием.

Отличие значений скорости подачи газа v , соответствующих минимальному времени зажигания волны ФГГ t_{ign} и максимальной скорости волны горения ФГГ u , показанное на рисунке 7, обусловлено изменением характера теплообмена с пористой средой. На этапе формирования волны ФГГ происходит нагрев тонкого слоя пористой среды (порядка характерного размера зерна) вблизи места входа волны горения. При увеличении скорости потока горючей смеси нагрев зерен уменьшается и скорость передачи тепла вперед, в пористую среду, падает. Время входа пламени в пористую среду при этом возрастет. При перемещении сформировавшейся волны ФГГ вглубь пористой среды при той же скорости потока время прогрева зерен определяется не временем теплообмена между горячими продуктами горения и зерном, а процессами теплопередачи через пористую среду вперед по ходу

движения волны ФГГ. Теплоотвод из зоны горения происходит только вперед по ходу движения волны горения, что позволяет волне горения и далее увеличивать свою скорость с увеличением скорости потока.

Полученные зависимости (см. рисунки 21, 22) указывают на качественное соответствие теоретической модели процесса зажигания волны ФГГ экспериментально наблюдаемому процессу.

Об этом также свидетельствуют данные, приводимые на рисунке 23

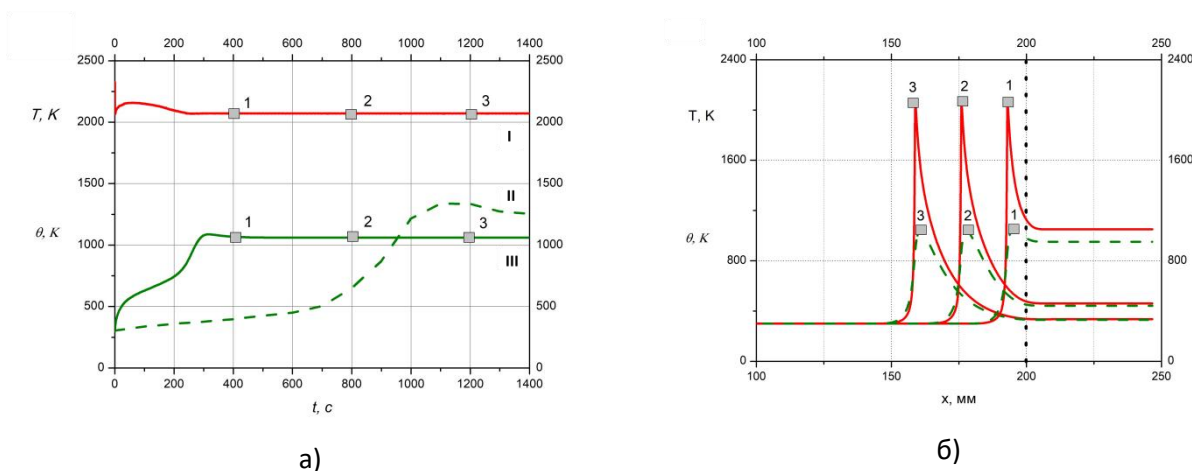


Рисунок 23 – Зависимости значений максимальной температуры газовой смеси пористой среды (1, 2, 3)

от времени процесса формирования волны ФГГ (12а)

и по длине участка с пористой средой (12б):

расчетные (I, III) и экспериментальные данные (II).

Обозначения: T – температура газовой смеси, К; θ – температура пористой среды, К; t – время процесса формирования волны ФГГ; x – координата моделируемого участка, L ; l – правая граница участка пористой среды.

Параметры системы: средний диаметр зерен $d_s = 5$ мм; Скорость подачи смеси $v = 15$ см/с; использована тепловая изоляция .

Зависимость, полученная экспериментально (II) соответствует показаниям термопары от времени процесса формирования и

распространения волны ФГГ и установлена на 40 мм вглубь пористой среды. Зависимости максимальной температуры газа (I) и пористой среды (III) также от времени процесса являются теоретическими, полученными численным моделированием с использованием значения коэффициента внешней теплоотдачи $\alpha_w = 380 \frac{Вт}{м^2 К}$.

Колебания значений температуры газа (I) и пористой среды (III) наблюдаются во время формирования волны ФГГ. Затем значения температур становятся постоянными во времени, что соответствует началу стационарного перемещения сформировавшейся волны ФГГ по пористой среде с постоянной скоростью движения (см. рисунок 23б). Экспериментально наблюдаемая температура пористой среды при этом (II, рисунок 23а) имеет разумное значение между значениями теоретической температуры газа и пористой среды.

Выводы

1. Предложен метод определения момента времени формирования волны ФГГ, необходимый для обработки данных, получаемых в процессе исследования формирования волны ФГГ.
2. Проведено сравнение полученных экспериментально и полученных математическим моделированием пределов распространения волн ФГГ в зависимости от скорости подачи газовой смеси – установлено наличие верхнего и нижнего пределов формирования волны ФГГ по скорости подачи газовой смеси.
3. Зависимости времени входа пламени от расхода газовой смеси имеют U – образную форму, что качественно соответствует расчетным данным.
4. Установлено качественное соответствие теоретической модели горения газа в пористой среде практическому процессу зажигания и горения волны ФГГ.
5. Показано влияние коэффициента внешней теплоотдачи при проведении численного моделирования процесса зажигания волны ФГГ. Также показано влияние на время зажигания волны ФГГ среднего диаметра зерен пористой среды.

3.4. Экспериментальные исследования формирования волны ФГГ в обедненной газовой смеси

Поскольку одним из возможных применений процесса ФГГ является сжигание низкокалорийных газовых смесей, т.е. с пониженным содержанием горючего компонента, следовательно, актуальным является исследование горения обедненного газа.

Эксперименты с пониженным содержанием природного газа проведены на той же установке (см. п. 2.2.) с пористой средой со следующими характеристиками: (см. Таблица 1) керамические шары диаметром 6,2 мм, пористость $m = 0,4$.

Расходы подаваемого газа (см. п. 2.2) контролировались с помощью образцовых ротаметров, по показаниям которых были составлены смеси с объемным содержанием горючего компонента (природного газа) 8% и 9,5%.

Данные, полученные при проведении экспериментов, показаны на рисунке 24. На рисунке 24 показаны предельные значения по скорости подачи газовой смеси v_n и $v_в$, полученные для смесей с различным содержанием горючего газа. Предположительно природа этих пределов аналогична, описанной ранее в п. 3.3 и обусловлена конкуренцией между поступлением тепла от химической реакции и его отводом за счет теплопроводности пористой среды. Установлено также, что при снижении содержания горючего компонента в газовой смеси происходит увеличение времени зажигания волны ФГГ t_{ign} (кривые 1а и 2а) с одновременным сужением по скорости подачи газовой смеси области возможного формирования волны ФГГ, что связано, скорее всего, с уменьшением поступления количества тепла при горении обедненной газовой смеси. Аналогичная картина наблюдается и по скорости движения сформировавшейся волны ФГГ u : снижение объемного содержания горючего компонента в поступающей газовой смеси ведет к уменьшению скорости движения сформировавшейся волны ФГГ.

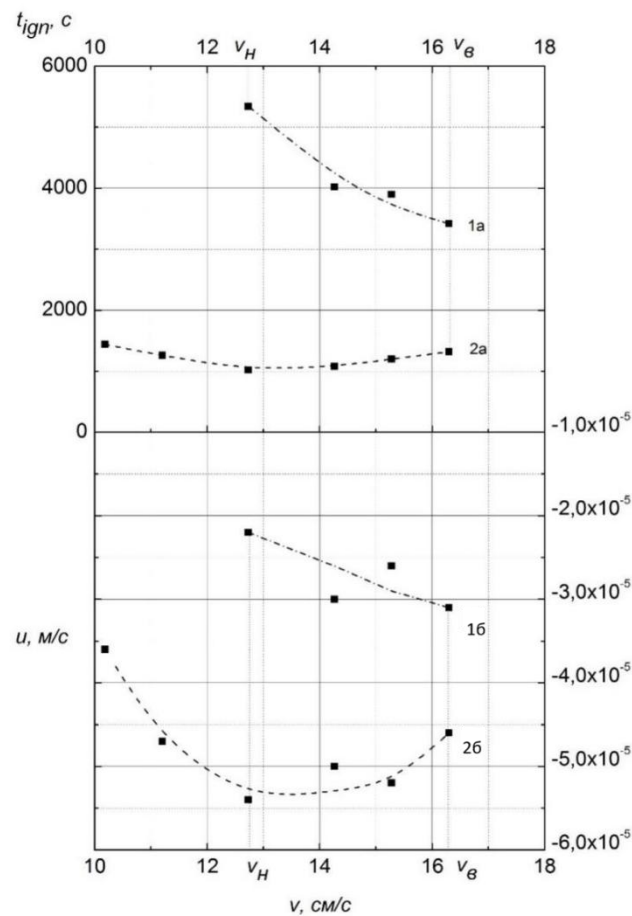


Рисунок 24 – Зависимости времени зажигания
и скорости движения волны ФГГ от скорости подачи горючего газа
от содержания горючего газа в газовой смеси.

Экспериментальные данные:

- 1а – Время зажигания t_{ign} для смеси с объемным содержанием природного газа 8 %;
- 2а – Время зажигания t_{ign} для смеси с объемным содержанием природного газа 9,5 %;
- 1б – Скорость волны ФГГ u при объемном содержании природного газа 8 %;
- 2б – Скорость волны ФГГ u при объемном содержании природного газа 9,5 %.

Далее было проведено численное исследование с использованием предлагаемой в настоящей работе математической модели. Результаты численного исследования в сравнении с экспериментальным исследованием для смеси с объемным содержанием горючего компонента 8% показаны на рисунке 25.

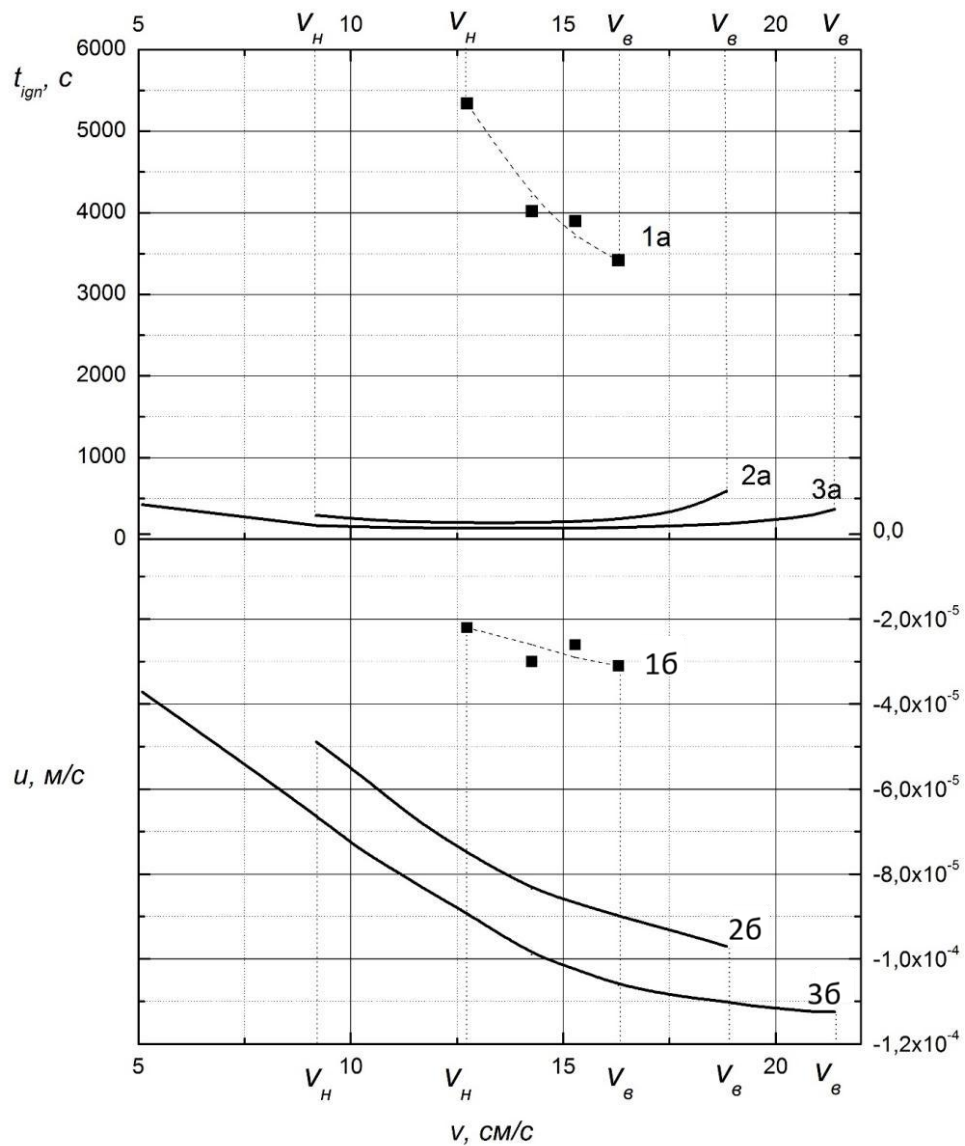


Рисунок 25 – Зависимости времени зажигания и скорости движения волны ФГГ при объемном содержания горючего газа в газовой смеси 8 %.

Обозначения:

1a – Время зажигания t_{ign} для смеси с объемным содержанием природного газа 8 %, экспериментальные данные;

2а – Время зажигания t_{ign} для смеси с объемным содержанием природного газа 8 %, численный эксперимент, $\alpha_w = 100 \frac{Br}{M^2 K}$;

3а – Время зажигания t_{ign} для смеси с объемным содержанием природного газа 8 %, численный эксперимент, $\alpha_w = 0 \frac{Br}{M^2 K}$;

1б – Скорость волны ФГГ u для смеси с объемным содержанием природного газа 8 %, экспериментальные данные;

2б – Скорость волны ФГГ u для смеси с объемным содержанием природного газа 8 %, численный эксперимент, $\alpha_w = 100 \frac{Br}{M^2 K}$;

3б – Скорость волны ФГГ u для смеси с объемным содержанием природного газа 8 %, численный эксперимент, $\alpha_w = 0 \frac{Br}{M^2 K}$;

Рисунок 25 демонстрирует качественное соответствие данных, полученных математическим моделированием (кривые 2а, 2б, 3а, 3б) данным экспериментального исследования (кривые 1а, 1б) и роль коэффициента внешнего теплообмена в численном эксперименте (кривые 2а, 2б).

Результаты исследования для смеси со стехиометрическим содержанием горючего компонента (принято 9,5%) показаны на рисунке 26.

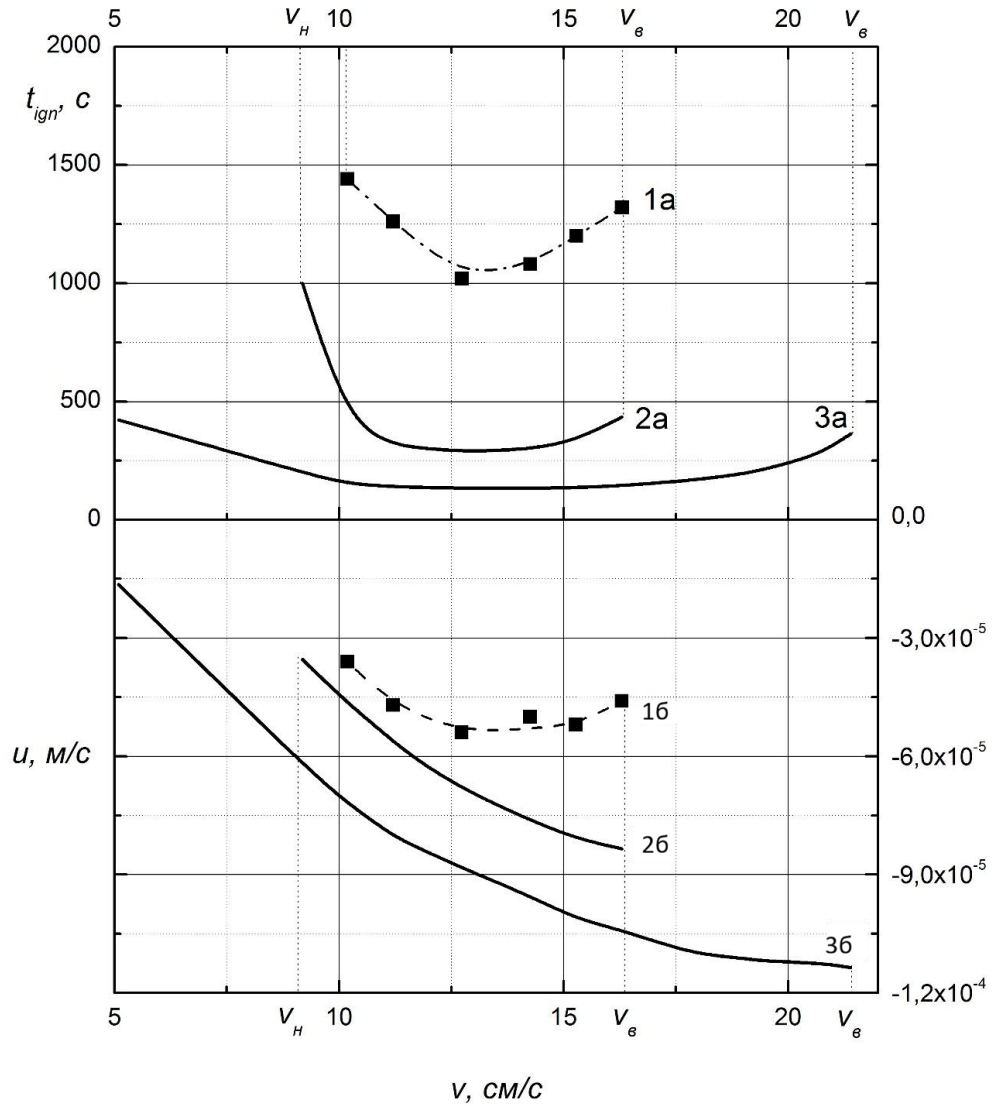


Рисунок 26 – Зависимости времени зажигания t_{ign} и скорости движения волны ФГГ u при объемном содержании горючего газа в газовой смеси 9,5 %

Обозначения:

1а – Время зажигания t_{ign} для смеси с объемным содержанием природного газа 9,5 %, экспериментальные данные;

2а – Время зажигания t_{ign} для смеси с объемным содержанием природного газа 9,5 %, численный эксперимент, $\alpha_w = 150 \frac{BT}{M^2 K^2}$;

3а - Время зажигания t_{ign} для смеси с объемным содержанием природного газа 9,5 %, численный эксперимент, $\alpha_w = 0 \frac{BT}{M^2 K^2}$;

1б – Скорость волны ФГГ u для смеси с объемным содержанием природного

газа 9,5 %, экспериментальные данные;

2б – Скорость волны ФГГ *и* для смеси с объемным содержанием природного

газа 9,5 %, численный эксперимент, $\alpha_w = 150 \frac{B_T}{M^2 K}$.

3б – Скорость волны ФГГ *и* для смеси с объемным содержанием природного

газа 9,5 %, численный эксперимент, $\alpha_w = 0 \frac{B_T}{M^2 K}$.

Рисунок 26 также демонстрирует качественное соответствие данных, полученных математическим моделированием, данным экспериментального исследования и влияние коэффициента внешнего теплообмена.

Выводы

1. Проведено экспериментальное исследование ФГГ с различным содержанием горючего компонента в подаваемой в область горения газовой смеси.
2. Показано влияние коэффициента внешней теплоотдачи при проведении численного моделирования процесса зажигания волны ФГГ в сравнении с экспериментальными данными.
3. Показано влияние объемного содержания горючего компонента в подаваемой в область ФГГ газовой смеси на время зажигания волны ФГГ t_{ign} и скорость ее движения u .
4. Установлено качественное соответствие теоретической модели горения газа в пористой среде практическому процессу зажигания и горения волны ФГГ.

ГЛАВА 4. РЕКОМЕНДАЦИИ ПО КОНСТРУИРОВАНИЮ ОГНЕПРЕГРАДИТЕЛЕЙ

Расчет надежной конструкции огнепреградителя и его оптимальное производство является важной задачей в обеспечении безопасности на различных производственных объектах, особенно в угольной и нефтяной промышленности.

Основным расчетным параметром огнепреградителя является критический диаметр канала огнепреграждающего элемента, определяемый критерием Пекле, с использованием формулы Я.Б. Зельдовича [93] и дополненный данными о необходимости учета длины пламягасящего канала [94]. Для засыпной пористой среды диаметр пламягасящего канала может быть определен по формуле: $d_{eff} = \frac{2md_s}{3(1-m)}$.

При этом при в материалах по проектированию не даются конкретные рекомендации о влиянии параметров конструкции огнепреградителя. При их выборе приходится опираться на опытные, статистические данные.

Численным моделированием установлены зависимости времени формирования волны ФГГ от параметров системы (см. рисунок 27): среднего диаметра зерна пористой среды (а), пористости (b), теплопроводности (с) и теплоемкости (d) пористой среды.

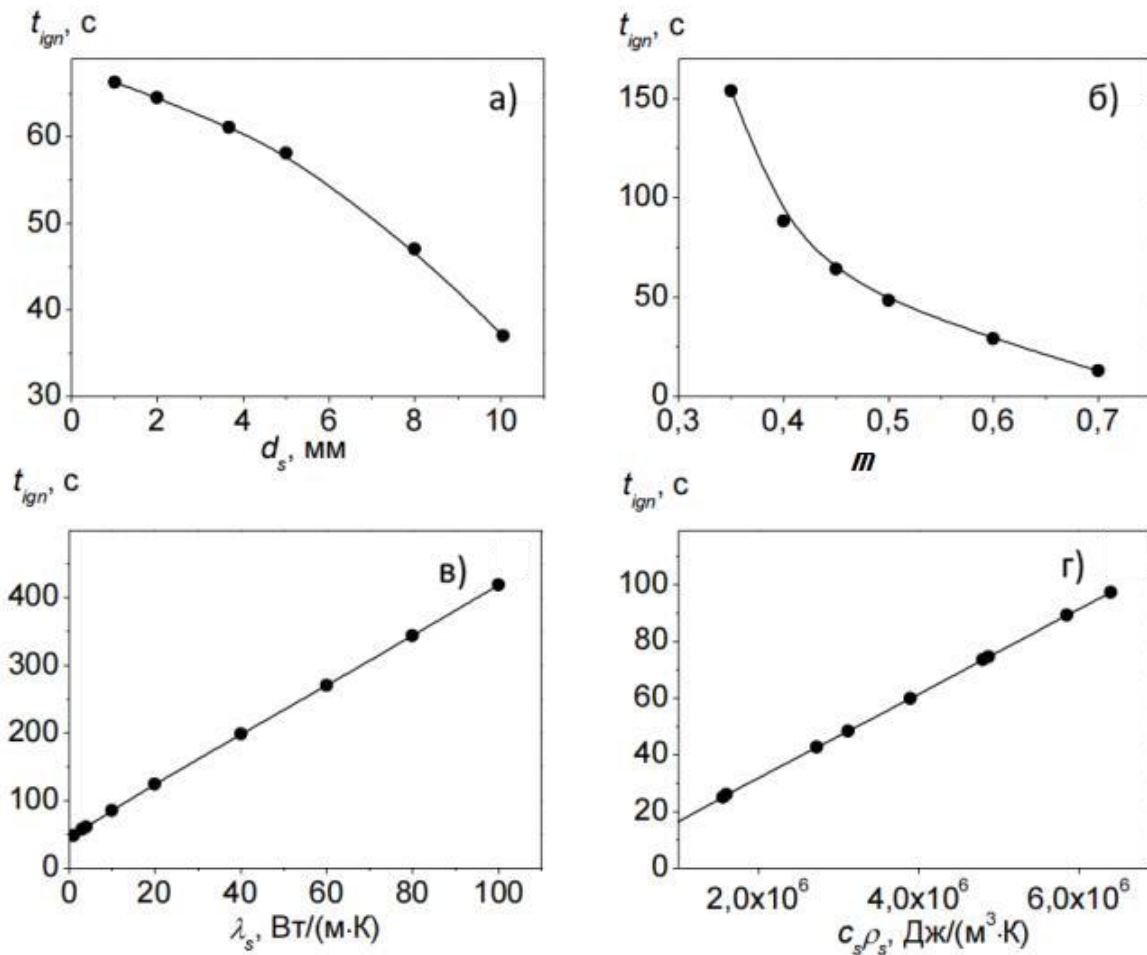


Рисунок 27 – Зависимости времени формирования волны ФГГ от среднего размера зерна (а), пористости (б), теплопроводности (в) и теплоемкости (г) пористой среды

Параметры системы: $T_b=2320$ К, $v_0=0,2$ м/с, $m=0,5$ – (а, в, г); $c_s=800$ Дж/(кг·К), $\rho_s=3900$ кг/м³ – (а, б, в); $d_s=3,7$ мм – (б, в, г); $\lambda_s=4$ Вт/(м·К) – (а); $\lambda_s=1$ Вт/(м·К) – (б, г).

Установлено, что при увеличении среднего диаметра зерна пористой среды от 1 до 10 мм (обычно используются зерна диаметром от 2 до 5 мм, что может варьироваться в зависимости от конструкции огнепреградителя) время формирования волны ФГГ уменьшается почти в два раза.

Установлено также влияние пористости засыпки на время формирования волны ФГГ: при увеличении пористости от 0,35 до 0,7

(пористость засыпок сухих огнепреградителей обычно варьируется от 0,25 до 0,5.) время формирования волны ФГГ сокращается более чем в три раза.

Зависимости времени формирования волны ФГГ от теплопроводности материала пористой засыпки и ее объемной теплоемкости носят практически линейный характер. При увеличении теплопроводности материала зерен пористой засыпки от 0,1 Вт/(м·К) – пенобетон до 100 Вт/(м·К) – металл время формирования волны горения увеличивается в почти четыре раза. При увеличении объемной теплоемкости от $1 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К) до $7 \cdot 10^6$ Дж/(м³·К), что соответствует материалам песок и электрокорунд, время формирования волны ФГГ также увеличивается почти в пять раз.

Согласно нормативному документу [95] по параметру «время сохранения работоспособности при воздействии пламени» огнепреградители делятся на два класса:

I класс — время сохранения работоспособности не менее 1 часа.

II класс — время сохранения работоспособности менее 1 часа.

При этом для коммуникационных огнепреградителей время сохранения работоспособности должно соответствовать требованиям, указанным в технической документации на изделие, но не менее 10 минут.

Для определения требуемой длины участка пористой засыпки из электрокорунда возможно использовать экспериментально установленные предельные значения скорости перемещения волны ФГГ для засыпки из электрокорунда.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результатами проведенного исследования являются сведения о нестационарных процессах формирования волны ФГГ в инертной пористой среде, полученные благодаря численным исследованиям и натурным экспериментам. В настоящей работе описаны стадии процесса формирования волны ФГГ при ее инициировании (зажигании) открытым источником пламени или нагретым участком пористой среды. Приводятся данные о параметрах пористой среды и содержании горючего компонента в газовой смеси, влияющих на процесс инициирования волны ФГГ и время ее формирования.

В главе 1 диссертационного исследования описано само физическое явление ФГГ и проведен литературный обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных обнаружению и выяснению свойств ФГГ. Показано современное состояние исследований, посвященных стационарным процессам распространения волн ФГГ и особое внимание уделено нестационарным процессам ФГГ: устойчивость волн горения, формирование волн ФГГ. Обоснована актуальность численных и экспериментальных исследований. Далее, в главе 2 описана использованная при моделировании математическая модель распространения волны ФГГ. В этой же главе приводится описание экспериментальной установки и пористых сред, использованных в экспериментальных исследованиях. В главе 3 настоящей работы приведены результаты численного моделирования формирования волн ФГГ открытым пламенем и нагретым участком пористой среды в сравнении с результатами экспериментов. Здесь же представлены результаты экспериментов при горении смеси с пониженным объемным содержанием горючего газа в подаваемой газовой смеси в сравнении с численным исследованием. В Главе 4 приводятся научно обоснованные рекомендации по выбору конструктивных параметров насадочного

огнепреградителя и показано их влияние на важный параметр работы – время прогорания.

Формирование волны ФГГ является начальной стадией работы любого устройства, имеющего в основе принципа работы ФГГ. Таким образом описание этапов формирования волн ФГГ и знание имеющих влияние на этот процесс параметров является ключевым для понимания процесса. В настоящем исследовании новыми являются: описание схемы формирования волн ФГГ при их инициировании открытым пламенем и нагретым участком инертной пористой среды с указанием основных параметров пористых сред и горючих смесей, имеющих влияние на процессы формирования волн ФГГ. Также в настоящей работе показано установленное качественное соответствие полученных экспериментальных данных математической модели, использованной для численного моделирования процессов формирования волн ФГГ.

Благодаря «богатой физике» процесса и широким спектром неизученных свойств, ФГГ обладает большим количеством возможных практических применений в различных областях. Например, процесс ФГГ имеет самое непосредственное отношение к вопросам пожаро-взрывобезопасности (огнепреградители). Применение ФГГ возможно в радиационных нагревателях. ФГГ имеет ряд важных приложений для решения задач в области переработки и вторичного использования промышленных отходов, для получения синтез-газа для водородной энергетики и других, например, при производстве электрической энергии.

При этом открытыми остаются многие вопросы ФГГ: при исследовании инициирования волн ФГГ необходимо более точное решение внешней газодинамической задачи с учётом кинетики высокотемпературных структурных превращений в пористой среде. Также немаловажным аспектом является объёмное реагирование пористых систем – здесь при численных расчётах нужно учитывать реальную кинетику и многостадийность

химического взаимодействия компонентов, а также сложный характер межфазного тепломассообмена в высокотемпературных пористых системах.

В настоящей работе прояснены некоторые вопросы инициирования волн ФГГ, в частности, проведено математическое моделирование процесса формирования волны ФГГ открытым пламенем и описаны этапы этого процесса. При этом установлены зависимости от параметров пористой среды и скорости подачи фильтрующегося газа. Далее проведено математическое моделирование процесса инициирования волны ФГГ нагретым участком пористой среды. Описаны этапы формирования волны ФГГ при ее инициировании нагретым участком пористой среды и показаны его особенности: получены зависимости времени зажигания волны ФГГ от скорости потока газовой смеси, от температуры нагретого участка пористой среды и его длины.

Наряду с численными исследованиями предложен способ определения момента времени формирования волны ФГГ, необходимый для обработки данных, получаемых в процессе.

Проведено сравнение полученных экспериментально и полученных математическим моделированием пределов распространения волн ФГГ в зависимости от скорости подачи газовой смеси – установлено наличие верхнего и нижнего пределов формирования волны ФГГ по скорости подачи газовой смеси.

Установлено качественное соответствие теоретической модели горения газа в пористой среде практическому процессу зажигания и горения волны ФГГ. При этом показано влияние коэффициента внешней теплоотдачи на время формирования волны ФГГ.

Показано также влияние объемного содержания горючего компонента в поступающей газовой смеси и его влияние на время зажигания волны ФГГ и скорость ее движения.

Проведенные исследования дополняют знания о процессах инициирования волн ФГГ, возникающих при работе различных устройств, не

только лишь, огнепреградителей: устройств с реверсивными потоками подачи газов, каталитических нагревателей и реформеров, установок для подземной газификации угля, систем получения синтез-газа. Понимание управляющих критических параметров процесса ФГГ, их оптимизация в прикладных задачах позволяет привести научно обоснованные рекомендации по конструированию таких устройств, повысить их эффективность и надежность, упростить технологичность изготовления, разработать безопасные и эффективные методы эксплуатации. Актуальность проведенных работ подтверждается многочисленными исследованиями процесса ФГГ в мире.

СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

Обозначение	Размерность	Физический смысл
t_{ign}	с	Время формирования волны фильтрационного горения газа (ФГГ)
T	К	Температура газовой смеси
θ	К	Температура пористой среды
η	—	Относительная массовая концентрация недостающего компонента газовой смеси
v_f	м/с	Скорость движения (фильтрации) газовой смеси в инертной пористой среде
ρ_g	кг/м ³	Плотность газовой смеси
ρ_s	кг/м ³	Плотность гранул пористой среды
c_g	Дж/(кг·К)	Удельная теплоемкость газовой смеси при постоянном давлении
c_s	Дж/(кг·К)	Удельная теплоемкость пористой среды
λ_g	Вт/(м·К)	Коэффициент теплопроводности газовой смеси
λ_{eff}	Вт/(м·К)	Коэффициент эффективной теплопроводности пористой среды
λ_s	Вт/(м·К)	Коэффициент теплопроводности зерен пористой среды
m	—	Пористость - отношение свободного объема к общему объему тела
D	м ² /с	Коэффициент диффузии недостающего компонента газовой смеси
Q	Дж/кг	Тепловой эффект реакции

T_b	К	Адиабатическая температура горения газовой смеси
T_0	К	Начальная температура газовой смеси
W	1/с	Скорость обобщенной одностадийной химической реакции
k_0	1/с	Предэкспоненциальный множитель
E	Дж/моль	Энергия активации
R	Дж/(моль·К)	Универсальная газовая постоянная
α_w	Вт/(м ² ·К)	Коэффициент внешней теплоотдачи
D_t	м	Диаметр трубы установки
α	Вт/(м ² ·К)	Коэффициент межфазного теплообмена
S_c	1/м	Удельная поверхность пористой среды
Nu	—	Число Нуссельта.
Re	—	Число Рейнольдса.
Pr	—	Число Прандтля.
d_{eff}	м	Эффективный диаметр поры
μ	Па·с	Динамическая вязкость газа
v	м/с	Скорость подачи газовой смеси
L	м	Длина моделируемой трубы
l	м	Длина участка пористой среды
t	с	Время
u	м/с	Скорость волны фильтрационного горения газа
α_1	Вт/(м ² ·К)	Коэффициент теплоотдачи от пористой среды к стенке трубы
α_2	Вт/(м ² ·К)	Коэффициент теплоотдачи от теплоизолированной трубы к воздуху
λ_1	Вт/(м·К)	Коэффициент теплопроводности стенки трубы

λ_2	Вт/(м·К)	Коэффициент теплопроводности теплоизоляции трубы
δ_1	м	Толщина стенки трубы
δ_2	м	Толщина слоя теплоизоляции
T_1	К	Температура внутренней стенки трубы установки
T_2	К	Температура наружной поверхности трубы установки
T_3	К	Температура наружной поверхности теплоизолированной трубы
q_l	Вт/м	Линейная плотность теплового потока
Q_h	Дж/с	Тепловой поток
l_t	м	Длина цилиндрической стенки трубы
k_l	Вт/(м·К)	Линейный коэффициент теплопередачи через цилиндрическую стенку
R_l	(м·К)/Вт	Линейное термическое сопротивление теплопередачи через цилиндрическую стенку
Ra	—	Число Рэлея.
g	м/с ²	Ускорение свободного падения
ν	м ² /с	Кинематическая вязкость
β	К ⁻¹	Термический коэффициент объемного теплового расширения
α_k	Вт/(м ² ·К)	Конвективная составляющая суммарного коэффициента теплоотдачи
α_p	Вт/(м ² ·К)	Радиационная составляющая суммарного коэффициента теплоотдачи
$\alpha_{сум}$	Вт/(м ² ·К)	Суммарный коэффициент теплоотдачи
λ_B	Вт/(м·К)	Теплопроводность воздуха

σ_0	Вт/(м ² ·К ⁴)	Постоянная Стефана-Больцмана
ε	—	Степень черноты
S_u	м/с	Нормальная скорость распространения пламени
$\overline{\theta_s}$	К	Усредненная по толщине пламени температура поверхностных слоев пористой среды
θ_s	К	Температура поверхности пористой среды в момент входа пламени в нее
Pe	$S_u d / \kappa$	Число Пекле
d	м	Эквивалентный диаметр порового канала
κ	м ² /с	Температуропроводность газовой смеси
θ_{ign}	К	Начальная температура участка пористой среды, инициирующего формирование волны ФГТ

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алдушин А.П., Мержанов А.Г. Теория фильтрационного горения: общие представления и состояние исследований / В сб. трудов: распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука. 1988. с. 9-52.
2. Промышленные огнепреградители / И. И. Стрижевский, В. Ф. Заказнов. — 2-е изд., перераб. и доп. — Москва : Химия, 1974.
3. Приказ Ростехнадзора от 01.12.2011 N 679 (ред. от 08.08.2017) Об утверждении Инструкции по дегазации угольных шахт (Зарегистрировано в Минюсте России 29.12.2011 N 22811).
4. Футько С.И. Химия фильтрационного горения газов / С.И. Футько, С.А. Жданок — Мн.: Бел. Навука, 2004.
5. Доброго К.В. Физика фильтрационного горения газов / Доброго К.В., Жданок С.А. Минск: Национальная Академия наук Беларуси. Институт тепло-массообмена им. Лыкова А.В., 2002.
6. Палесский Ф.С. Моделирование фильтрационного горения газов в цилиндрической пористой горелке с учетом радиационного теплообмена / Ф.С. Палесский, Р.В. Фурсенко, С.С. Минаев // Физика горения и взрыва. 2014. — Т. 50, №6. — С. 3-10.
7. Laevsky. Yu. Multidimensional computational models of gas combustion in heterogeneous porous medium / Laevsky. Yu & Nosova. T., (2021). Journal of Physics: Conference Series. 2099.
8. 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. — Т25, №4. — С. 75-85.
9. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Манжос Е.В., Рычков А.Д. Зажигание волн фильтрационного горения газа пламенем фильтрующегося газа / Физика горения и взрыва. — 2014. — Т. 50, № 3. — С. 43-50.

10. Fursenko R. V., E. S. Odintsov, S. S. Minaev Pore-scale flame dynamics in a one-layer porous burner / *Combustion and Flame*. – 2021. – Vol. 232. – P. 111711.
11. Zhongshan Chen, Yu Han, Hongsheng Liu, Junrui Shi, Shaoyi Suo, Linsong Jiang, Maozhao Xie. Numerical investigation on the effect of porosity distribution on the flame characteristics / *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 2023.
12. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Рычков А.Д. Особенности прогорания пористых огнепреградителей засыпного и канального типа / *Физика горения и взрыва*. – 2009. – Т. 45, № 3. – С. 35-43.
13. Dennis P. Nolan, *Handbook of Fire and Explosion Protection Engineering Principles for Oil, Gas, Chemical, and Related Facilities (Fourth Edition)* / Gulf Professional Publishing, 2019.
14. Бабкин В.С., Бунев В.А., Коржавин А.А. Распространение пламени в пористых инертных средах // *Горение газов и натуральных топлив*. Черноголовка. 1980. С. 87–89.
15. Бабкин В.С., Дробышев В.И., Лаевский Ю.М., Потытняков С.И. О механизме распространения волн горения в пористой среде при фильтрации газа // *Докл. АН СССР*. – 1982. – Т. 265, №5. – С. 1157–1161.
16. Бабкин В.С., Дробышев В.И., Лаевский Ю.М., Потытняков С.И. Фильтрационное горение газов // *Физика горения и взрыва*. – 1983. – Т. 19, №2. – С. 17–26.
17. Коржавин А.А., Бунев В.А., Абдуллин Р.Х., Бабкин В.С. О зоне пламени при горении газа в инертной пористой среде // *Физика горения и взрыва*. – 1982. – Т. 18, №6. – С. 20–23.
18. Лаевский Ю.М. О существовании решения системы уравнений, описывающих фильтрационное горение газов // *Журнал прикладной математики и теоретической физики*. – 1983. – №6. – С. 67–71.

19. Потытняков С.И., Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Влияние тепловых потерь на распространение стационарных волн при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. – 1984. – №1. – С. 19–26.
20. Бабкин В.С., Бунев В.А., Коржавин А.А., Клименко А.С., Зубков В.И., Григорьев В.М. Горение газа в сосуде с высокопористой инертной средой // Физика горения и взрыва. – 1985. – Т. 21, №5. – С. 17–22.
21. Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Фильтрационное горение газов // Распространение тепловых волн в гетерогенных средах. Новосибирск: Наука. 1988. С. 108–145.
22. Бабкин В.С., Лаевский Ю.М. Фильтрационное горение газов // Физика горения и взрыва. – 1987. – Т. 23, № 5. – С. 27–44.
23. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Намятов И.Г., Рычков Д.А. Закономерности распространения пламени через насадку коммуникационных огнепреградителей. // Физика горения и взрыва. – 2007. – Т.43, №4. – С.23–37.
24. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Намятов И.Г., Рычков А.Д. Экспериментальное и теоретическое исследование процесса прогорания засыпных огнепреградителей // Пожарная безопасность. – 2006. – №5. – С. 59–72.
25. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Рычков А.Д. Математическое моделирование работы пористых огнепреградителей в режиме прогорания // Вычислительные технологии. – 2008. – Т. 13. – С. 212–219.
26. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Рычков А.Д. Особенности прогорания пористых огнепреградителей засыпного и канального типа // Физика горения и взрыва. – 2009. – Т. 45, №3. – С. 35–43.
27. Коржавин А.А., Какуткина Н.А., Намятов И.Г., Рычков А.Д., Сеначин П.К. Моделирование работы огнепреградителя в режиме прогорания // Проблемы безопасности и ЧС. – 2008. – №3. – С. 36–52.

28. Trimis D., Durst F. Combustion in a porous medium - advances and applications // *Combustion Science and Technology*. – 1996. – Vol. 121, Is. 1-6. – P. 153–168.
29. Князева А.Г., Чумаков Ю.А. Двухтемпературная модель горения газа в модельном горелочном устройстве цилиндрической формы // *Известия Томского политехнического университета*. – 2007. – Т. 311, №4. – С. 24–30.
30. Чумаков Ю.А., Князева А.Г. Режимы сжигания газа в пористом теле теплогенератора цилиндрической формы // *Физика горения и взрыва*. – 2009. – №1. – С. 18–29.
31. Abdul Mujeebu M.A., Abdullah M.Z., Abu Bakar M.Z., Mohamad A.A., Muhad R.M.N., Abdullah M.K. Combustion in porous media and its applications – A comprehensive survey // *Journal of Environmental Management*. – 2009. – Vol. 90, Is. 8. – P. 2287–2312.
32. Герасев А.П. Гибридные автоволны при фильтрационном горении газов в слое катализатора // *Физика горения и взрыва*. – 2008. – Т. 44, №2. – С. 3–13.
33. Toledo M.G., Utría K.S., González F.A., Zuñiga J.P., Saveliev A.V. Hybrid filtration combustion of natural gas and coal // *International Journal of Hydrogen Energy*. – 2012. – Vol. 37, Is. 8. – P. 6942–6948.
34. Бабкин В.С., Коржавин А.А., Лаевский Ю.М. О множественности режимов фильтрационного горения газов // *Доклады Академии Наук*. – 2011. – Т. 436, №6. – С. 756–759.
35. Замащиков В.В., Козлов Я.В., Коржавин А.А., Лаевский Ю.М., Бабкин В.С. Особый режим фильтрационного горения газов // *Доклады Академии Наук*. – 2009. – Т. 428, №4. – С. 484–486.
36. Dobrego K.V., Zhdanok S.A., Khanevich E.I. Analytical and experimental investigation of the transition from low-velocity to high-velocity regime of filtration combustion // *Experimental Thermal and Fluid Science*. – 2000. – Vol. 21, Is. 1–3. – P. 9–16.

37. Доброго К.В., Жданок С.А., Крауклис А.В, Ханевич Э.И., Заруба А.И. Переход от режима низких к режиму высоких скоростей фильтрационного горения газов при повышении давления // Инженерно-физический журнал. – 1999. – Т. 72, №3. – С. 440–449.
38. Laevsky Yu.M., Nosova T.A. Computational models of filtration gas combustion // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2017. – Vol. 32, Is. 2. – P. 115–125.
39. Weinberg F.J. Combustion temperature: the future? // Nature. – 1971. – Vol. 233. – P. 239–241.
40. Takeno T., Sato K. An Excess Enthalpy Flame Theory // Combustion Science and Technology. – 1979. – Vol. 20. – P. 73–84.
41. Deshaies B., Joulin G. Asymptotic Study of an Excess-Enthalpy Flame // Combustion Science and Technology. – 1980. – Vol. 22. – P. 281–285.
42. Malico, I. & Mujeebu, M. Abdul. (2015). Potential of Porous Media Combustion Technology for Household Applications. International Journal of Advanced Thermofluid Research. 1. 50-69.
43. С. И. Футько, К. В. Доброго, С. А. Жданок, Э. И. Ханевич. Локализация фронта горения в фильтрационном нагревателе дискового типа в условиях интенсивной внешней теплоотдачи // Физика горения и взрыва. 2000. – Т.36, №3 – С. 17 – 24.
44. Dats, E. & Minaev, Sergey. (2022). Numerical modeling of filtration gas combustion in a cylindrical radiation burner for contactless heating of materials. International Journal of Heat and Mass Transfer. 195.
45. Futko, Sergey & Dobrego, Kirill & Shmelev, Evgeniy & Suvorov, Alexander & ZHDANOK, SERGEY. (2007). Thermal recovery of sorbents by filtration combustion. Combustion Science and Technology. 179. 883-903. 10.1080/00102200600713146.
46. Dai, Huaming & Zou, Chongxue & Wang, Xinyi & Guo, Zhaoxing & Yang, Yi & Lv, Shuailin & Jiang, Zhuang. (2024). Flame Propagation of Premixed

Gas with Enhanced Heat Recirculation: Dynamic Characteristics of Lean and Rich Combustion. *Energy Technology*. 12. 10.1002/ente.202400872.

47. Barcellos, W. & Araújo, W. & Alves, G. & Alves, J. & Filho, L.. (2023). NO_x emission on reciprocal filtration combustion of biogas: a case study. *Revista de Engenharia Térmica*. 21. 22. 10.5380/reterm.v21i3.89666.
48. Яковлев, И. А., Замбалов, С. Д., & Скрипняк, В. А. (2014). Математическое моделирование процесса получения синтез-газа в реакторе фильтрационного горения при повышенных давлениях. *Вестник Томского государственного университета. Математика и механика*, (6 (32)), 103-120.
49. Bubnovich, Valeri & San Martín, Pedro & Henríquez, Luis & Lemos, Marcelo. (2018). Filtration Gas Combustion in a Porous Ceramic Annular Burner for Thermoelectric Power Conversion. *Heat Transfer Engineering*. 40. 1-55. 10.1080/01457632.2018.1457278.
50. Вайнштейн П.Б. Об устойчивости газового пламени в пористых средах // *Физика горения и взрыва*. – 1992. – Т. 28, №1. – С. 28–34.
51. Минаев С.С., Потытняков С.И., Бабкин В.С. О неустойчивости фронта пламени при фильтрационном горении газов // *Физика горения и взрыва*. 1994. – Т. 30 , №3. – С. 49–54.
52. Доброго К.В., Жданок С.А. К теории термогидродинамической неустойчивости фронта фильтрационного горения газа // *Физика горения и взрыва*. – 1999. – Т. 35, №5. – С. 14–20.
53. Kennedy L.A., Fridman A.A., Saveliev A.V. Super-adiabatic combustion in porous media: wave propagation, instabilities, new type of chemical reactor // *Fluid Mech. Res.* – 1995. – Vol. 22, Is. 2. – P. 1–26.
54. Какуткина Н.А., Бабкин В.С. Характеристики стационарных сферических волн горения газа в инертных пористых средах // *Физика горения и взрыва*. – 1998. – Т. 34, №2. – С. 9–19.

55. Какуткина Н.А. Некоторые аспекты устойчивости горения газа в пористых средах // Физика горения и взрыва. – 2005. – Т. 41, №4. – С. 39–49.
56. Кабилов М.М. О неустойчивости фронта фильтрационного горения газов в неадиабатическом режиме // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48, №2. – С.15–23.
57. Доброго К.В., Жданок С.А. Инженерный расчет характеристик волны фильтрационного горения на основе двухтемпературной одномерной модели // Инженерно-физический журнал. – 1998. – Т. 73, №3. – С. 424–432.
58. Доброго К.В., Жданок С.А., Крауклис А.В., Ханевич Э.И., Заруба А.И. Переход от режима низких к режиму высоких скоростей фильтрационного горения газов при повышении давления // Инженерно-физический журнал. – 1999. – Т. 72, №3. – С. 440–449.
59. Доброго К.В. Характеристики пламени фильтрационного горения газа. Минск, 2001 (Препринт // Институт тепло- и массообмена НАНБ, №2)
60. Dobrego K.V., Zhdanok S.A., Zaruba A.I. Experimental and analytical investigation of the gas filtration combustion inclination instability // Int. J. Heat and Mass Transfer. – 2001. – Vol. 44, Is. 11. – P. 2127–2136.
61. Буркина Р.С. Фильтрационное горение газа в полуограниченной пористой среде // Физика горения и взрыва. – 2000. – Т. 36, №4. – С. 3–15.
62. Какуткина Н.А., Мбарава М. Переходные процессы при фильтрационном горении газов // Физика горения и взрыва. – 2004. – Т. 40, №5. – С. 62–73.
63. Какуткина Н.А., Бабкин В.С. Закономерности распространения сферических волн фильтрационного горения газа в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва. – 1999. – Т. 35, № 1. – С. 17-21.

64. Дробышев В.И. Численное исследование процессов горения в цилиндрической пористой горелке // Физика горения и взрыва. – 2008. – Т. 44, № 3. – С. 17-21.
65. Лаевский Ю.М., Яушева Л.В. Моделирование процессов фильтрационного горения газов в неоднородных пористых средах // Сибирский журнал вычислительной математики. – 2009. – Т.12, № 2. – С. 171-187.
66. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Закономерности фильтрационного горения газа в неоднородной пористой среде // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46. № 4. – С. 13-24.
67. Barra A.J., Diepvens G., Ellzey J.L., Henneke M.R. Numerical study of the effects of material properties on flame stabilization in a porous burner // Combustion and Flame. – 2003. – V. 134. – P. 369-379.
68. Barra A.J., Ellzey J.L. Heat recirculation and heat transfer in porous burners // Combustion and Flame. – 2004. – V. 137. – P. 230-241.
69. Какуткина Н.А., Рычков А.Д. Моделирование нестационарных процессов фильтрационного горения газа // Физика горения и взрыва. – 2010. – Т. 46, № 3. – С. 44-51.
70. Fabiano Contarin, Alexei V. Saveliev, Alexander A. Fridman and Lawrence A. Kennedy. A reciprocal flow filtration combustor with embedded heat exchangers: numerical study // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2003. – V. 46, No. 6. – P. 949-961.
71. Hoffman J.G., Echigo R., Yoshida H., Tada S. Experimental Study on Combustion in Porous Media with a Reciprocating Flow System // Combustion and Flame. – 1997. – V. 111. – P. 32-46.
72. Манжос Е.В., Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Рычков А.Д., Сеначин П.К.. Формирование волны фильтрационного горения газа нагретым участком пористой среды. Физика горения и взрыва. – 2019. – Т. 55, № 6. – С. 25-31

73. Bubnovich V.I., San Martin P.I., Henriquez L. Filtration Gas Combustion in a Porous Ceramic Annular Burner for Thermoelectric Power Conversion // Papers presented to the 12th International Conference on Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics, Costa de Sol, Spain on 11-13 July 2016.
74. Bubnovich V.I., Toledo M. Analytical modelling of filtration combustion in inert porous media // Applied Thermal Engineering. – 2007. – Vol. 27, Is. 7. – P. 1144–1149.
75. Рабинович О.С., Гуревич И.Г. Распространение волн фильтрационного технологического горения в пористой среде с неоднородным составом // Инженерно-физический Журнал. – 1998. – Т. 71, № 1. – С. 46–50.
76. Drobyshevich V.I., Mathematical modelling of hybrid combustion waves // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2004. Vol. 19, Is. 6. – P. 495–505.
77. Лаевский Ю.М., Яушева Л.В. Численное моделирование фильтрационного горения газа на основе двухуровневых полунявных разностных схем // Вычислительные технологии. – 2007. – Т. 12, № 2. – С. 90–103.
78. Mohammadi A., Jazayeri A., Ziabasharhagh M., Numerical Simulation of Combustion with Porous Medium in I.C. Engine // International Journal of Automotive Engineering. – 2012. – Vol. 2, Is. 4. – P. 228–241.
79. Liu Yi, Fan Aiwu, Yao Hong, Liu Wei. Numerical investigation of filtration gas combustion in a mesoscale combustor filled with inert fibrous porous medium // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2015. – Vol. 91. – P. 18–26.
80. Liu, H.-S & Xu, Z.-J & Xie, Mao-zhao & Jiang, L.-S. (2015). An experimental study of filtration combustion of gas and liquid fuel in porous medium. Shanghai Jiaotong Daxue Xuebao/Journal of Shanghai Jiaotong University. 49. 122-128. 10.16183/j.cnki.jsjtu.2015.01.021.
81. Зельдович Я.Б., Баренблатт Г.И., Либрович В.Б., Махвиладзе Г.М. Математическая теория горения и взрыва // М.: Наука, 1980.

82. Аэров М.Э., Тодес О.М., Наринский Д.А. Аппараты со стационарным зернистым слоем.- Ленинград: “Химия”, 1979, 176 с.
83. Ingenieure, VDI-Gesellschaft. (2002). VDI-Wärmeatlas: Berechnungsblätter für den Wärmeübergang. 10.1007/978-3-662-10743-0.
84. Теплофизические свойства пористых материалов / Л. Л. Васильев, С. А. Танаева ; АН БССР. Ин-т тепло- и массообмена. — Минск : Наука и техника, 1971. — 266 с.
85. Н.Б. Варгафтик. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. – М.: Наука, 1972.
86. Какуткина Н.А., Коржавин А.А., Мбарав М. Особенности фильтрационного горения водородо-, пропано- и метановоздушных смесей в инертных пористых средах // Физика горения и взрыва. – 2006. – Т. 42, № 4. – С. 8-20.
87. Чиркин В. С. Теплофизические свойства материалов. Справочник. М.: ФИЗМАТГИЗ., 1959.
88. ГОСТ 20419-83. Материалы керамические электротехнические. Классификация и технические требования
89. Кутателадзе С. С. Теплопередача и гидродинамическое сопротивление : Справ. пособие / С. С. Кутателадзе. – Москва : Энергоатомиздат, 1990.
90. Пожаровзрывоопасность веществ и материалов и средства их тушения: Справ. изд.: кн. 1 / Ред. Баратов А.Н., Корольченко А.Я., Кравчук Г.Н. и др. М.: “Химия”. 1990. 496 с.
91. Промышленные огнепреградители / Стрижевский И.И., Заказнов В.Ф., М. : Химия, 1974.
92. Щетинков Е.С. Физика горения газов. М.: “Наука”. 1965. 739 с.
93. Зельдович Я. Б. Избранные труды. Химическая физика и гидродинамика. Теория предела распространения тихого пламени. — М: Наука, 1984. — С. 233–246.
94. Я. С. Киселёв, О. А. Хорошилов. К вопросу о расчете диаметра и длины огнегасящего канала в резервуарных и коммуникационных сухих

огнепреградителях. Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе, № 5, 2009.

95. ГОСТ Р 53323— 2009. Огнепреградители и искрогасители. Общие технические требования. Методы испытаний. Издание официальное. Москва Стандартинформ.

ПРИЛОЖЕНИЕ А «АКТ ВНЕДРЕНИЯ»**АЛЗАМИР**

ООО НПО «АЛЗАМИР»
ОГРН: 1154223000964
ИНН/КПП: 4223073970/420501001
+7 (3842) 49-29-92
alzamir.prom@yandex.ru | alzamir.ru
Почтовый адрес: 650036, г. Кемерово, ул.
Гагарина, 151, а/я 1051

«УТВЕРЖДАЮ»**Зам. генерального директора –****Технический директор****ООО НПО «АЛЗАМИР»**

Айкин А.В.

13.06.2024

**Акт внедрения**

Настоящим подтверждаем, что результаты диссертационного исследования Манжоса Е.В. на тему: «Инициирование волн фильтрационного горения газа» обладают актуальностью, представляют практический интерес и были применены при составлении научно-исследовательской программы деятельности для обеспечения безопасности работы на предприятиях угледобычи.

Начальник отдела профилактики
и тушения эндогенных пожаров, к.т.н.

В.И. Храмцов