

На правах рукописи



Мирошниченко Таисия Павловна

**ДИНАМИКА ПЛАМЕНИ В ЗАКРЫТЫХ СОСУДАХ С ПОРИСТЫМИ
СТЕНКАМИ И МИКРОКАНАЛАХ ПРИ ФИЛЬТРАЦИИ ГАЗА**

Специальность 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Владивосток – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Научный руководитель: **Минаев Сергей Сергеевич**
доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник.

Официальные оппоненты: **Коржавин Алексей Анатольевич**
доктор технических наук, доцент, заведующий лабораторией физики и химии горения газов, ФГБУН Институт химической кинетики горения им. В.В. Воеводского Сибирского отделения Российской академии наук.

Крайнов Алексей Юрьевич
доктор физико-математических наук, доцент, профессор кафедры математической физики, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет».

Ведущая организация: ФГБУН Объединенный институт высоких температур Российской академии наук, г. Москва.

Защита состоится «__» _____ 20__ г. в _____ часов _____ минут на заседании диссертационного совета Д 003.053.01, созданного на базе Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, по адресу: 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН – <http://www.itp.nsc.ru>

Автореферат разослан «__» _____ 2017 г.

Отзывы и замечания по автореферату в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба направлять по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета. E-mail: dissovet@itp.nsc.ru

Ученый секретарь
диссертационного совета,

д.ф.-м.н., профессор



Кузнецов Владимир Васильевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

В диссертации приведены результаты теоретических исследований, связанных с фильтрацией газа через пористые стенки замкнутого объема, внутри которого происходит горение смеси газов, и распространением пламени в микроканалах, в условиях, когда теплообмен газа со стенками канала оказывает существенное влияние на процессы горения. Общим в рассматриваемых задачах механики реагирующих сред, является существенное влияние диссипативных процессов (трения и теплообмена между газом и твердой средой) на рассматриваемые нестационарные процессы горения и фильтрации газа.

Актуальность темы исследования. Процессы нестационарной фильтрации газов через пористые среды, возникающие в результате неоднородного распределения давления в пористой среде, являются объектом интенсивных научных исследований уже более ста лет. В некоторых, практически важных случаях, например, при взрыве газа внутри подземного резервуара, изменение давления внутри резервуара и фильтрация газа через пористый грунт оказываются взаимосвязаны. Эти взаимосвязанные задачи фильтрации и горения оставались исследованными недостаточно полно, хотя в литературе имеется значительное количество работ, в которых исследовалось либо горение газа в закрытых сосудах [Бабкин и др., 1986; Bradley, Mitcheson, 1978; Molkov, 1995], либо нестационарная фильтрация газа через пористые среды [Babkin, 1993; Доброго, Жданок, 2002]. Эти подходы не позволяли в полной мере промоделировать многие практически важные процессы, связанные со взрывобезопасностью и загрязнением среды при взрывах газов в замкнутых объемах с пористыми стенками. Поэтому разработка подходов и моделей для описания процессов движения газа через пористые среды при больших градиентах давления, поиск адекватных численных алгоритмов расчета и описание взаимосвязанных процессов фильтрации и горения являются *актуальными* задачами.

Горение газов возможно и в межпоровом пространстве химически инертной пористой среды [Babkin, 1993; Howell et al, 1996]. В этом случае существует множество интересных режимов горения, изучение которых важно с точки зрения практических приложений и получения фундаментальных знаний. Интерес к исследованиям фильтрационного горения газов в пористой среде связан, например, с созданием эффективных горелочных устройств с хорошими экологическими характеристиками [Howell et al, 1996]. Горелки, использующие фильтрационное горение газов, имеют ряд преимуществ по сравнению с обычными горелочными устройствами с открытым пламенем, в частности, позволяют сжигать низкокалорийные топлива или бедные смеси газов и достигать сверхадиабатические температуры. Несмотря на значительные успехи, достигнутые в теоретическом описании фильтрационного горения газов, имеется ряд явлений, описание которых выходит за рамки традиционных моделей фильтрационного горения газов, основанных на континуальном представлении пористой среды и которые требуют рассмотрения горения газа в отдельных микроканалах, составляющих пористую среду. Интерес исследователей к изучению нестационарных волн горения газовых смесей в микроканалах связан также с развитием малоразмерных горелочных устройств. Основным механизмом для поддержания горения в малоразмерной системе является подогрев свежей смеси, поступающей в камеру сгорания за счет тепла отходящих продуктов горения. Такой режим горения может быть реализован в

специальных горелках с регенерацией тепла, в которых тепло от продуктов горения передается свежей смеси через теплопроводящие стенки [Lloyd, Weinberg, 1974; Jones et al, 1978]. Аналогичный механизм реализуется в пористых средах, где пламя может стабилизироваться в микроканалах между твердой фазой, даже если размеры микроканалов существенно меньше критического диаметра, определенного по начальной температуре. Горение в этом случае возможно при условии, что газовая фаза окружена стенками с температурой, превышающей температуру окружающей среды. Поэтому, исследования горения газа в микроканалах с градиентом температуры необходимы для понимания процессов как в микросистемах с регенерацией тепла, где подогрев горючей смеси газов происходит за счет тепла отходящих продуктов горения, так и для развития новых технологий, в которых используется горение газов в пористых средах [Maruta, 2011].

Поскольку в микрогорелках с регенерацией тепла стенки камеры сгорания имеют повышенную температуру, возникает необходимость исследовать особенности горения газа в микроканалах с нагретыми стенками. Недавно выполненные эксперименты по горению газа в микроканалах с контролируемой температурой в стенках обнаружили интересные нестационарные режимы горения и формирование разнообразных пространственных структур пламени [Замащиков, Минаев, 2001]. В диссертационной работе изложены исследования автора, посвященные моделированию нестационарных волн горения газовых смесей в микроканалах при фильтрации газа, что также является актуальной задачей.

Целью диссертационной работы является разработка математических моделей, описывающих течения нереагирующего и реагирующего газа в пористых средах и микроканалах.

Основные задачи работы заключаются:

- в разработке математических моделей, описывающих течение газа из объема с большим начальным давлением в окружающую среду через пористый слой твердого материала;
- оценке времени разгрузки и динамики давления в резервуаре с пористыми стенками, в котором происходит горение газа;
- исследовании нелинейной динамики и устойчивости волн горения предварительно перемешанных смесей газов в микроканалах с переменным сечением и неравномерно нагретыми стенками при наличии течения газа.

Научная новизна работы заключается в создании моделей, описывающих связанные процессы горения газа внутри резервуара и последующей фильтрации газообразных продуктов горения через пористые стенки резервуара в окружающую среду, а также модели горения газа в микроканалах. Данные модели позволяют оценить характерное время выхода продуктов горения из резервуара с пористыми стенками, оценить максимально достижимое давление, вызванное горением газа, а также выделить характерные режимы течения в микроканалах.

В работе впервые получены следующие результаты:

- получено точное решение задачи о фильтрации газа через многослойную среду, состоящую из слоев с различной толщиной и проницаемостью;
- сформулирована математическая модель, которая одновременно описывает процесс нарастания давления в сосуде с пористыми стенками при горении газа и фильтрационное течение газа через пористые стенки;

- установлены критерии прохождения пламенем сужения в микроканале с минимальным диаметром меньше критического при наличии фильтрации газа;
- обнаружена пульсационная диффузионно-тепловая неустойчивость пламени богатых смесей водорода с воздухом в микропотоковом реакторе и построены диаграммы существования различных режимов горения в зависимости от состава смеси и скорости расхода газа.

Теоретическая и практическая значимость. Результаты работы позволяют получить оценки времени разгрузки и других характеристик процесса при горении газа в резервуарах с пористыми стенками, что дает новые знания, необходимые для обеспечения взрыво- и пожаробезопасности, в частности, при подземных взрывах газа. Оценки критического диаметра для канала переменного сечения при наличии фильтрации газа, и знания об особенностях развития неустойчивости при горении газа с большими числами Льюиса в микроканале с повышенной температурой стенок, способствуют развитию микроустройств с горением газа.

Методология и методы исследования. В теоретических исследованиях использовалось математическое моделирование, основанное на методах механики сплошных сред и теории горения. Решение задач выполнялось как численными методами на основе конечно-разностных схем, так и аналитическими методами. Для проверки численных решений использовалось сравнение с аналитическими решениями, полученными в предельных случаях.

На защиту выносятся:

- результаты моделирования процессов фильтрационного течения нереагирующего газа из резервуара с повышенным давлением через пористые стенки;
- результаты моделирования сопряженных задач о горении газа в резервуаре с пористыми стенками и фильтрационного течения газа через пористые стенки, вызванного горением;
- результаты двумерного моделирования распространения пламени в плавно сужающихся каналах, с минимальным диаметром ниже критического при наличии фильтрации газа;
- результаты моделирования динамики пламени смесей с большими числами Льюиса в микроканале с неоднородным распределением температуры в стенках.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применяемых математических моделей, строгой постановкой задач и соответствием полученных результатов с имеющимися в литературе данными. Достоверность результатов численного моделирования подтверждается использованием известных конечно-разностных схем; сходимость численных решений проверялась на последовательности сгущающихся сеток, а также сравнением численных решений с аналитическими решениями, полученными в предельных случаях.

Личный вклад соискателя. Все включенные в диссертацию теоретические и численные результаты получены автором лично, либо при его непосредственном участии в выборе или разработке математических моделей и методов их исследования, создании и отладке программных кодов, анализе и интерпретации полученных результатов, подготовке публикаций.

Апробация работы. По теме диссертации опубликовано 26 научных работ, в том числе 4 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК.

Результаты работы докладывались и обсуждались на российских и международных конференциях: XXXI, XXXII, XXXIII, XXXV Дальневосточная

математическая школа-семинар имени акад. Е.В. Золотова (Владивосток, 2006-2008, 2010); Всероссийская конференция, посвященная 75-летию академика В.П. Мясникова «Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления» (Владивосток, 2011); The International Conference «Advanced Problems in Mechanics» (Saint Petersburg, 2013); Третья конференция по фильтрационному горению, (Черноголовка, 2013); Workshop on Combustion Waves Structure and Dynamics (Vladivostok, 2013); 10th, 11th, 12th, 13th International Conference on Flow Dynamics (Sendai, 2013-2016); Научно-практическая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «ЭКСЕРГИЯ – 2014» (Владивосток, 2014); 1st International Scientific Conference "Science of the Future" (Saint Petersburg, 2014); Международная конференция, приуроченная к 75-летию академика В.А. Левина «Успехи механики сплошных сред» (Владивосток, 2014); Asia-Pacific Conference on Combustion (Beijing, 2015); 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems (Leeds, 2015); Международная научная конференция «Современные технологии и развитие политехнического образования» (Владивосток, 2015), 36th International Symposium on Combustion (Seoul, 2016), 13th International Conference on Combustion & Energy Utilization (Taipei, 2016); а также на семинарах в Tohoku University (Sendai, Japan), ИТПМ СО РАН (Новосибирск), ФИАН (Москва), ДВФУ (Владивосток).

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** приведена общая характеристика диссертационной работы, обоснована ее актуальность, сформулированы цели и задачи исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость, перечислены выносимые на защиту положения, изложено краткое содержание работы.

В **первой главе** дано описание математических моделей и основных положений теории фильтрации, теории ламинарного пламени, особенностей горения в микроканалах. Приводится обзор работ, посвященных исследованиям по теме диссертации.

Во **второй главе** рассматриваются одномерные задачи течения газа через пористые среды. *Раздел 2.1* посвящен исследованию задачи фильтрации через пористую среду, состоящую из слоев различной толщины и проницаемости. Предполагается, что движение газа описывается законом Дарси. При заданном перепаде давления на входе и выходе из многослойного элемента, получено аналитическое решение для определения расхода газа как функции разности давлений на границах пористого тела. Исследовано влияние коэффициента проницаемости и толщины слоев на расход газа при заданном перепаде давления на границах слоевой системы.

В *разделе 2.2* описываются результаты моделирования истечения газа из подземного резервуара, инициированного скачкообразным повышением давления внутри резервуара (Рис. 1).

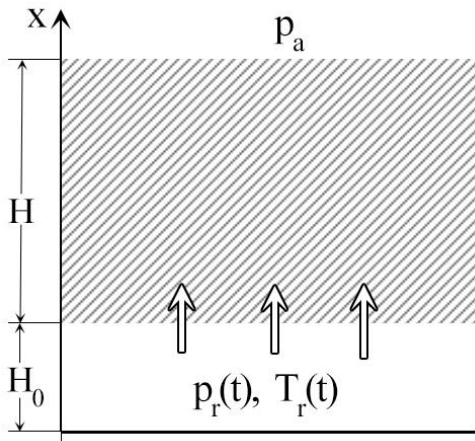


Рис. 1. Схематическое изображение подземного резервуара

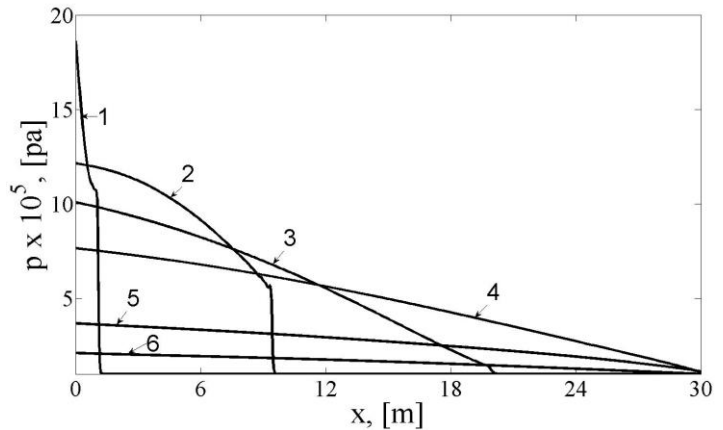


Рис. 2. Распределение давления газа в пористом слое в различные моменты времени:
 1 – $t = 0.001$ с, 2 – $t = 0.01$ с, 3 – $t = 0.03$ с,
 4 – $t = 0.1$ с, 5 – $t = 0.5$ с, 6 – $t = 1$ с

Математическая модель включает уравнения, описывающие закон сохранения массы газа, уравнение импульса и энергии с учетом трения и теплообменом между газом и твердой средой, уравнения теплопроводности по твердой среде и уравнение состояния идеального газа [Луценко, 2005]. Условия на границе между резервуаром и пористой средой, описывающие сохранение массы, импульса и энергии газа дополнялись уравнением изменения массы газа M в резервуаре за счет истечения:

$$dM/dt = -q, \quad M(t) = H_0 \rho_r(t), \quad (1)$$

где q – расход газа, H_0 – высота резервуара, ρ_r – плотность газа в резервуаре. Считается, что изменение температуры и плотности газа в резервуаре от давления происходит в ходе адиабатического процесса. Расход газа определяется из решения задачи и зависит от времени. Задача решалась численно в одномерной постановке с использованием конечно-разностного метода.

На Рис. 2 показано распределение давления газа в пористом слое в различные моменты времени. В расчетах учитывались значения параметров, соответствующие задаче о прохождении потока воздуха через слой грунта. Начальный перепад давлений – 20 атм., высота резервуара $H_0 = 3$ м, высота пористой среды $H = 30$ м. Несмотря на высокую для грунтов проницаемость, учитываемую при расчете ($k = 10^{-8}$ м²), возникшая в момент взрыва газа ударная волна быстро вырождается в обычную волну сжатия, в которой давление изменяется не скачком, а плавно.

Было показано, что изменением температуры пористой среды в ходе процесса можно пренебречь из-за большей теплоемкости твердой фазы по сравнению с теплоемкостью газа при выбранных значениях параметров задачи. Этот вывод подтвержден сравнением результатов расчетов, учитывающих теплообмен между газом и пористой средой и предполагающих, что температура пористой среды постоянна.

Быстрое разрушение ударной волны, последующее уменьшение давления и сглаживание скачкообразного профиля давления позволяют предположить, что движение газа через достаточно толстый слой пористой среды будет определяться процессами бародиффузии [Ландау, Лифшиц, 1988]. Поскольку процесс бародиффузии медленный, по сравнению со временем пробега ударной волны до своего разрушения, то именно такой процесс будет определять характерное время

разгрузки в протяженных и трудно проницаемых средах. На Рис. 3 представлен график зависимости безразмерной величины H^2/k (где H – высота пористого слоя) от времени протекания процесса, рассчитанный для пористых слоев различной толщины и значений проницаемости k от 10^{-10} до 10^{-5} м^2 .

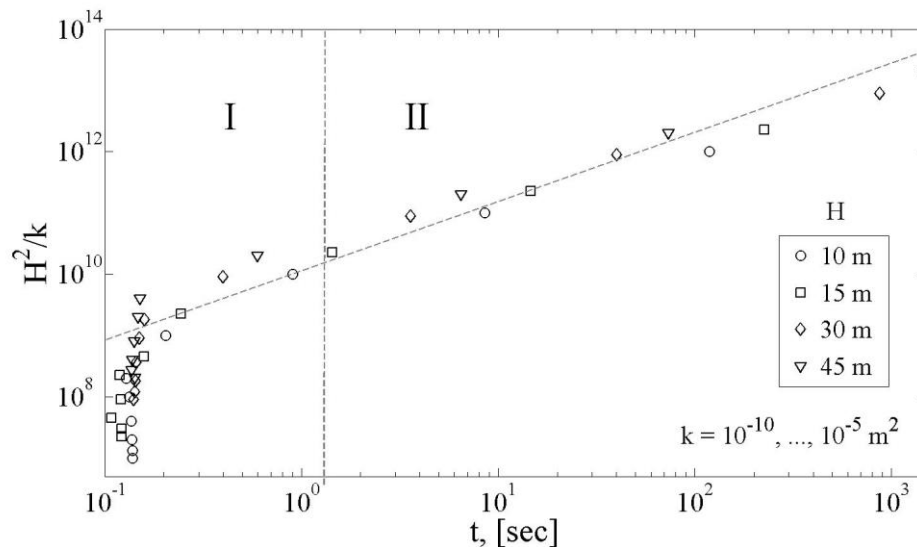


Рис. 3. Зависимость величины H^2/k от времени при различных значениях толщины пористого слоя; I – область режима с выходящей ударной волной, II – область бародиффузионного режима

Область I, слева от вертикальной пунктирной линии, соответствует режиму с выходящей ударной волной. Этот случай реализуется при достаточно высокой проницаемости среды. Область II справа от пунктирной линии соответствует бародиффузионному процессу.

В **третьей главе** описаны теоретические исследования связанных процессов горения газа в сосуде с пористыми стенками и фильтрации газов через стенки. В отличие от задач, рассмотренных во второй главе, рост давления в сосуде, вызванный горением газа, зависит от скорости истечения газа из сосуда. В предельном случае, когда стенки сосуда непроницаемы для газа, задача переходит в задачу о горении газов в замкнутых сосудах [Зельдович и др., 1980]. Предполагается, что давление в сосуде зависит только от времени, т.е. используются предположения модели горения газа в замкнутом сосуде. Такое упрощение существенно облегчает решение задачи и оправдано тем, что выравнивание пространственных возмущений давления происходит гораздо быстрее по сравнению с характерным временем горения газа в сосуде.

Считается, что горение газа прекращается в момент достижения пламенем пористой стенки (Рис. 4), поэтому основное внимание при исследовании уделяется описанию режима горения в сосуде и последующего падения давления за счет фильтрации газа.

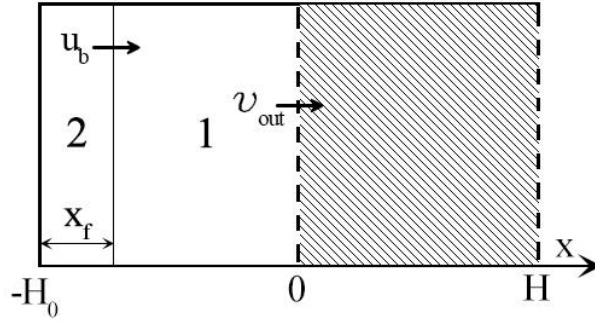


Рис. 4. Схема горения газа в резервуаре с пористой стенкой: 1 – область свежего газа, 2 – область продуктов горения.

Для описания процесса была разработана модель, которая включает в себя континуальную модель фильтрации газа через пористую стенку и модель горения газа в закрытом сосуде с учетом истечения газа через пористые стенки. В предположении, что нормальная скорость пламени u_b постоянна, стенка, около которой произошло зажигание смеси, непроницаема для газа, была получена система уравнений для давления газа p_r в резервуаре и положения фронта пламени x_f :

$$\frac{dp_r}{dt} = \frac{\gamma}{H_0} u_b \frac{\Delta T}{T_0} p_0^{(\gamma-1)/\gamma} p_r^{1/\gamma} - \frac{\gamma}{H_0} v_{out} p_r, \quad (2)$$

$$\frac{dx_f}{dt} = -\frac{1}{\gamma p_r} \frac{dp_r}{dt} (x_f + H_0) + \frac{\Delta T}{T_0} u_b \left(\frac{p_r}{p_0} \right)^{(1-\gamma)/\gamma} + u_b,$$

где $\Delta T = T_b - T_0$; T_0 , P_0 – температура и давление в начальный момент времени, T_b – адиабатическая температура горения, $v_{out}(t)$ – скорость истечения газа из резервуара, γ – показатель адиабаты. Эти уравнения, вместе с уравнениями течения газа через пористую стенку, используются в расчетах давления до погасания пламени, которое происходит в момент времени, когда фронт пламени достигает стенки резервуара. После прекращения горения давление в сосуде уменьшается за счет фильтрации газа до значения давления в окружающем пространстве.

Связь процессов друг с другом устанавливается посредством граничных условий, полученных аналитически, исходя из упрощенной модели для границы раздела двух сред. Предполагается, что пористая среда на внутренней границе представляет собой систему микроканалов, состоящую из однотипных параллельных пластин, расположенных друг от друга на расстоянии порядка $d \propto k^{1/2}$, где k – проницаемость среды.

Расчет по построенной математической модели осуществлялся конечно-разностным методом. Значения размерных параметров были выбраны в соответствии с реальными значениями, характерными для природных грунтов. На Рис. 5 изображены зависимости давления газа в резервуаре от времени, на котором приведена также зависимость и для случая горения в закрытом сосуде [Бабкин и др., 1986]. Кривые отличаются друг от друга проницаемостью стенок. На Рис. 6 показано распределение давления в пористой стенке с проницаемостью $k = 10^{-8} \text{ м}^2$ в различные моменты времени.

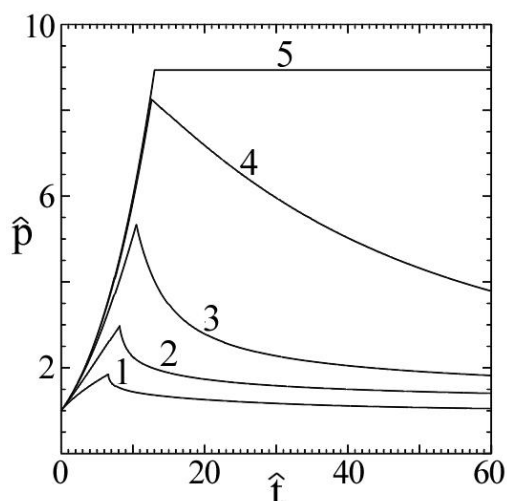


Рис. 5. Давление газа в резервуаре для пористых стенок различной проницаемости: 1 – $k = 10^{-8} \text{ м}^2$; 2 – $k = 10^{-9} \text{ м}^2$; 3 – $k = 10^{-10} \text{ м}^2$; 4 – $k = 10^{-11} \text{ м}^2$; 5 – закрытый сосуд

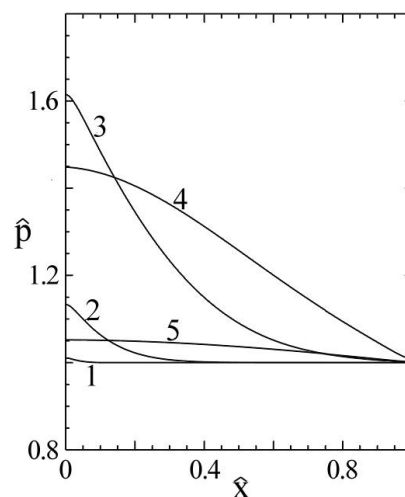


Рис. 6. Распределение давления газа в пористой стенке в различные моменты времени: 1 – $t = 0.1$; 2 – $t = 1$; 3 – $t = 5$; 4 – $t = 10$; 5 – $t = 60$

Максимальное значение скорости фильтрации достигается вблизи пористой стенки резервуара. В этом случае пламя действует как поршень, выталкивающий газ в пористую среду. После того, как горение в резервуаре прекратилось, давление между слоем пористой стенки начинает выравниваться, и скорость фильтрации становится максимальной внутри стенки.

Зависимость безразмерного параметра H^2/k (где H – высота пористой стенки) от времени сгорания газа в резервуаре показывает, что при равной проницаемости время сгорания уменьшается с ростом толщины стенок. Этот эффект объясняется тем, что скорость движения свежей смеси перед фронтом пламени увеличивается из-за фильтрации через пористую стенку по сравнению с непроницаемым сосудом. Увеличение скорости газа перед фронтом пламени приводит к тому, что скорость пламени увеличивается, а время горения газа уменьшается.

Четвертая глава посвящена моделированию нестационарного распространения пламени в микроканалах. Актуальность этого исследования связана с возможностью детального рассмотрения процессов горения и фильтрации в пористой среде. Процессы фильтрационного горения газов в пористой среде и микрогорение имеют общее сходство, основанное на возможности подогрева горючей смеси твердой фазой, которая передает тепло от продуктов горения в несгоревшую смесь. Это сходство проявляется также и в том, что в некоторых случаях математические формулировки моделей фильтрационного горения газов и горения газов в микроканале с теплопроводящими стенками совпадают. Если пористая среда аппроксимируется системой параллельных теплопроводящих пластин и горение газа происходит в зазорах между ними, то усредненные в поперечном направлении уравнения горения газа и теплообмена со стенками канала совпадают с моделью горения в пористой среде при соответствующем подборе параметров.

В данной главе рассматриваются задачи прохождения пламени в микроканалах, имеющих плавное сужение. Минимальный диаметр сужения предполагается меньшим критического для заданных параметров. Известно, что распространение пламени невозможно в каналах с поперечным диаметром меньше критического. Но на

процесс распространения пламени в микроустройствах влияет не только поперечный к потоку горючей смеси размер камеры сгорания, но и длина камеры сгорания, ее геометрия, а также скорость потока газа. Решение строится для двумерной осесимметричной конфигурации канала (Рис. 7) в рамках модели с одностадийной химической реакцией. Зажигание горючей смеси в начальный момент времени происходит в области с повышенной температурой (заштрихованная область на Рис. 7). После зажигания пламя движется по потоку газа, имеющему скорость v .

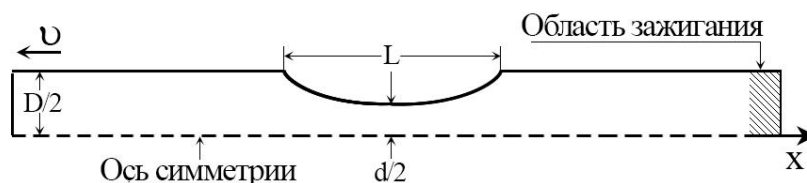


Рис. 7. Схема микроканала с сужением

Для определения критического диаметра проводились тестовые расчеты задач распространения пламени в прямых каналах с диаметром около критического. Результаты показали, что при определенных значениях длины зауженной области L пламя способно проходить препятствие даже в отсутствии фильтрации. В более протяженных областях пламя переносится вместе с потоком газа и прохождение сужения возможно только в том случае, когда скорость газа превышает некоторое критическое значение. При достаточно больших скоростях газа пламя затухает из-за действия эффектов растяжения вблизи передней кромки пламени. На Рис. 8 показана корреляция между минимальной входной скоростью, при которой пламя может проходить через зауженную зону, и минимальным диаметром канала. Заштрихованные области под кривыми – это области параметров, при которых пламя не способно пройти через препятствие.

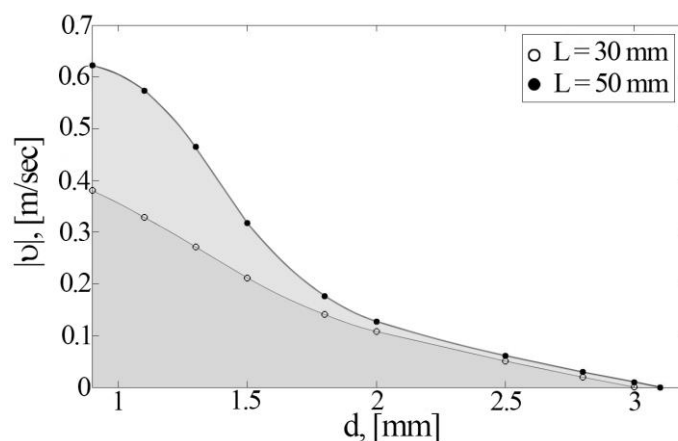


Рис. 8. Соотношение между минимальным диаметром канала d и максимальным абсолютным значением скорости $|v|$, при котором пламя способно проходить через сужение

Полученные данные также демонстрируют существование эффекта инерционности фронта пламени, который заключается в том, что минимальная скорость распространения пламени достигается не в точке с минимальным диаметром канала, а в точке, расположенной внизу по потоку. Этот эффект связан с тем, что изменение тепловой структуры волны горения под влиянием теплопотерь происходит с некоторой задержкой, позволяющей пламени проходить препятствия с диаметром меньше критического диаметра (см. Рис. 9).

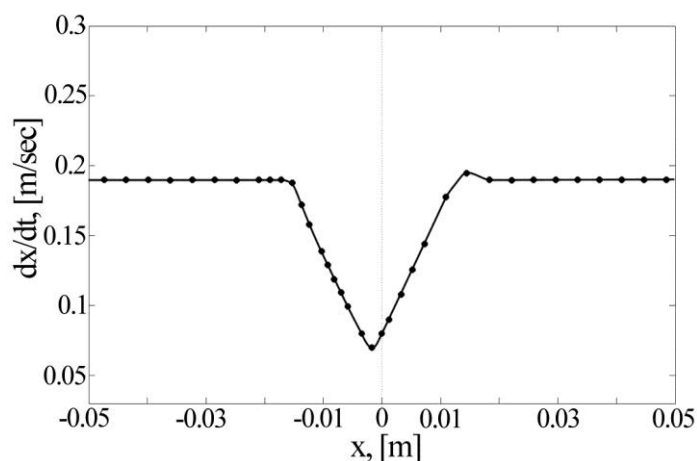


Рис. 9. Скорость пламени в канале с параметрами $d = 3$ мм, $L = 30$ мм, $v = 0$

В пятой главе описываются результаты исследований горения газа в микроканале с градиентом температуры. Рассматриваемая система представляет собой микрореактор, который успешно применяется для верификации моделей горения различных видов топлив с детальной кинетикой химических реакций [Minaev et al, 2007], что важно для развития новых экологически приемлемых технологий горения. Эта методика основана на анализе пространственной структуры волны горения, стабилизированной в микроканале с контролируемым градиентом температуры стенок в режиме ультранизкого расхода газа. Схема микроканала приведена на Рис. 10.

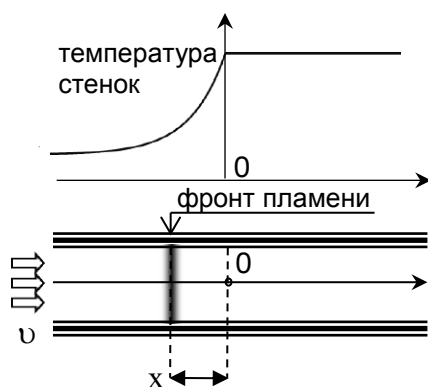


Рис. 10. Распределение температуры в стенках микроканала



Рис. 11. Зависимость координаты положения пламени относительно заданного профиля температуры стенок микроканала от скорости газа. Жирной линией отмечены области устойчивого горения

Основное внимание в работе уделяется исследованию особенностей горения богатых водород-воздушных смесей в микроканале с заданным распределением температуры в стенках. Модель с двухступенчатой кинетикой включает в себя разветвление цепи $3H_2 + O_2 \rightarrow 2H_2O + 2H$ и рекомбинацию $H + H + M \rightarrow H_2 + M$, где M – это третье тело. Скорости gross-реакций определяются скоростями элементарных реакций $\omega_I = w_1$, $\omega_{II} = w_4 + w_5$, где w_1 – скорость реакции

$H + O_2 \rightarrow OH + O$, w_4 – скорость реакции $H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$ и w_5 – скорость реакции $H + H + M \rightarrow H_2 + M$. Определяющие уравнения для безразмерной температуры T' , концентрации кислорода Y'_{O_2} и H -радикалов Y'_R записываются в следующем виде:

$$\begin{aligned}\frac{\partial T}{\partial t} &= -v \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + K(\theta(x) - T) + R_4 Y_R Y_{O_2} e^{\beta-1/T_b} + R_5 Y_R^2 e^{\beta-1/T_b}, \\ \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial t} &= -v \frac{\partial Y_{O_2}}{\partial x} + L_{O_2}^{-1} \frac{\partial^2 Y_{O_2}}{\partial x^2} - \beta Y_R Y_{O_2} e^{\beta-1/T}, \\ \frac{\partial Y_R}{\partial t} &= -v \frac{\partial Y_R}{\partial x} + L_R^{-1} \frac{\partial^2 Y_R}{\partial x^2} + \beta Y_R Y_{O_2} e^{\beta-1/T} - \beta R_5 Y_R^2 e^{\beta-1/T_b} - \beta R_4 Y_R Y_{O_2} e^{\beta-1/T_b},\end{aligned}\quad (3)$$

Штрихи в уравнениях (3) опущены. Введены безразмерное время $t' = \Omega t$, координата $x' = \sqrt{\Omega/\kappa} x$ и переменные

$$T' = \frac{T}{T_A}, \quad Y'_{O_2} = \frac{Y_{O_2}}{Y_{O_2}^\infty}, \quad Y'_R = \frac{W_{O_2} Y_R}{2W_R Y_{O_2}^\infty}. \quad (4)$$

Здесь T – температура, Y_{O_2}, Y_R – концентрации кислорода и H -радикалов соответственно; K – безразмерный коэффициент теплообмена между газовой смесью и стенками реактора; $\theta(x)$ – заданная функция распределения температуры в стенках; $R_{4,5}$ – безразмерные константы реакций; β – безразмерная энергия активации реакции разветвления цепи; T_b – температура сгоревшей смеси на выходе; v – скорость потока газа; L_{O_2}, L_R – числа Льюиса для O_2 и H -радикалов соответственно; Ω – характеристическая частота, связанная со скоростью w_1 ; T_A – температура активации w_1 ; κ – тепловая диффузия; $Y_{O_2}^\infty$ – массовая доля молекулярного кислорода, $W_{O_2,R}$ – молекулярные веса O_2 и H .

Ранее в работах было показано, что при больших значениях скорости газа наблюдается устойчивое пламя, а при уменьшении скорости до некоторого критического значения, пламя становится неустойчивым и наблюдается режим периодического воспламенения/затухания пламени (FREI режим – Flame with Repetitive Extinction and Ignition). В этом режиме пламя инициируется в горячей части канала, распространяется против потока смеси и гаснет на холодном конце канала с диаметром меньше критического из-за тепловых потерь. Области устойчивости/неустойчивости пламени, характерные для горения газа в микропотоковом реакторе, схематически показаны на Рис. 11. Жирной линией отмечены области стабильного горения.

Численный анализ задачи показал, что помимо обнаруженной ранее неустойчивости, приводящей к FREI режиму, наблюдаются пульсации, происхождение которых связано с диффузионно-тепловой неустойчивостью, характерных для горючих смесей с большими числами Льюиса. Пульсационная неустойчивость наблюдалась в области вблизи перехода от устойчивого горения к режиму FREI. Особенностью пульсационного режима является то, что положение пламени остается постоянным относительно стенок микроканала, а температура пламени меняется со временем. Кроме того, при пульсационном режиме локального затухания пламени не наблюдается, в отличие от FREI режима. Это дает основание

заключить, что данные типы неустойчивостей возникают благодаря разным механизмам. В FREI режиме колебания возникают из-за теплового взаимодействия между газом и стенкой. Диффузионно-тепловые колебания наследуются от неустойчивости пламени при больших числах Льюиса. Примеры пульсаций, наблюдаемых в области неустойчивостей, показаны на Рис. 12. По мере уменьшения скорости, неустойчивости обнаруживают себя при $v \leq 1.85$. Вначале появляются диффузионно-тепловые пульсации, как на Рис. 12(a). Рис. 12(b) – пример смешанного режима пульсаций, близкий к хаотическому, который имеет место при $v_{\infty} \approx 1.785$; (c) – FREI колебания, занимающие довольно большой интервал до перехода в режим слабого стабильного горения при $v \geq 0.155$.

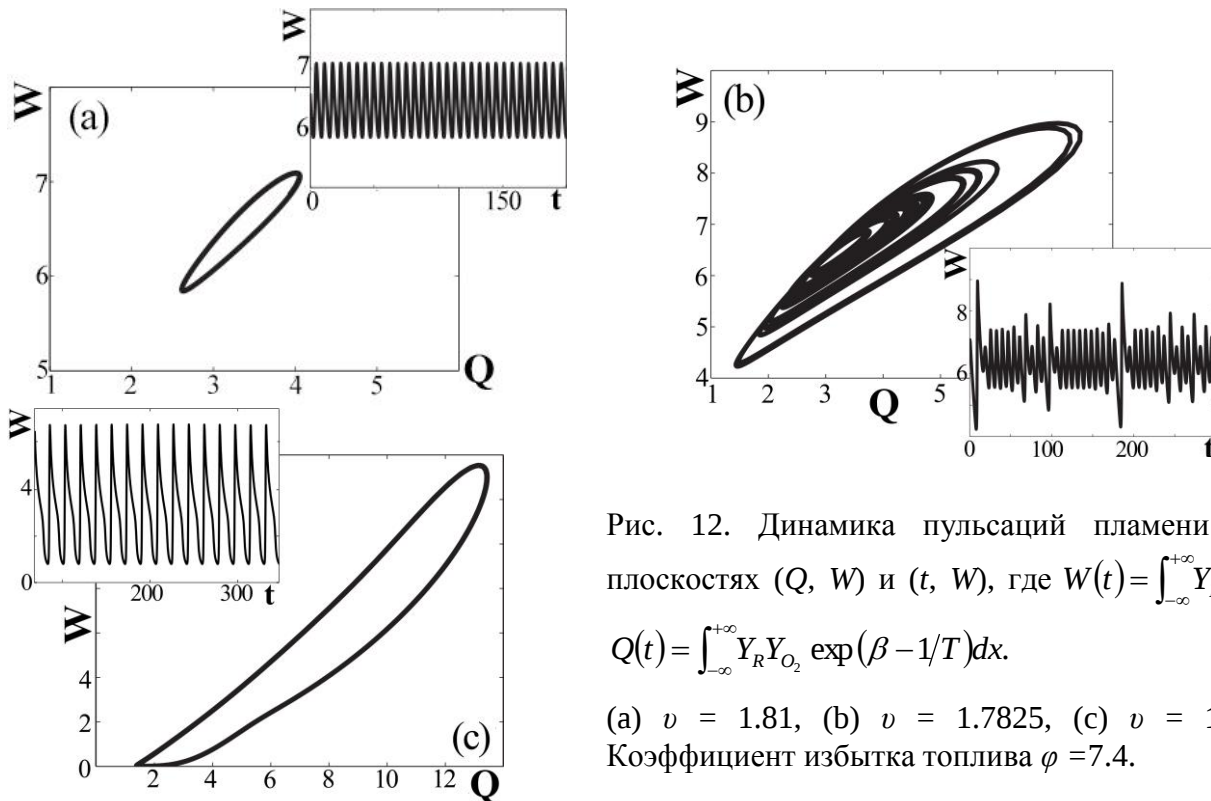


Рис. 12. Динамика пульсаций пламени на плоскостях (Q, W) и (t, W) , где $W(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y_R dx$,
 $Q(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} Y_R Y_{O_2} \exp(\beta - 1/T) dx$.
 (a) $v = 1.81$, (b) $v = 1.7825$, (c) $v = 1.73$.
 Коэффициент избытка топлива $\varphi = 7.4$.

Существование переходной области пульсаций между FREI и режимом нормального пламени было подтверждено экспериментально в работе [Stazio et al, 2016].

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

1. Для одномерного стационарного случая найдено аналитическое решение задачи о фильтрации газа через многослойный пористый элемент, слои которого отличаются толщиной и проницаемостью. Получены формулы для вычисления основных газовых характеристик в любом слое пористой среды вне зависимости от общего количества слоев, составляющих пористый элемент, при известном перепаде давления на входе и выходе. Исследовано влияние коэффициента проницаемости и толщины слоев на расход газа.

2. Решена одномерная задача об истечении газа из резервуара через слой пористой среды при больших перепадах давления в двух постановках. Показано, что изменением температуры пористой среды в ходе процесса можно пренебречь из-за большой теплоемкости твердой фазы по сравнению с теплоемкостью газа при выбранных значениях параметров задачи. Обнаружено существование двух характерных режимов истечения газа в зависимости от свойств пористого слоя: быстрого и медленного режимов. В последнем случае, когда ударная волна диссипирует, время разгрузки определяется в основном процессами бародиффузии. Рассчитано время разгрузки резервуара после взрыва.
3. Решена задача о фильтрации газа через пористую стенку из резервуара, внутри которого происходит горение. Предложена новая математическая модель, комбинирующая классическую модель горения в закрытом сосуде и континуальную модель фильтрации газа в пористой стенке. Показано, что фильтрация газа через пористую стенку может оказывать существенное влияние на горение внутри резервуара. Получены данные о максимальном давлении газа в резервуаре, времени разгрузки резервуара. Показано, что время сгорания газа в сосудах со стенками одинаковой проницаемости уменьшается с ростом толщины пористой стенки.
4. На основе двумерной модели с одноступенчатой химической кинетикой исследована динамика пламени в микроканале с сужением, диаметр которого меньше критического для рассматриваемой смеси. Показано, что плавное сужение способствует расширению интервала скоростей потока, при которых пламя способно преодолевать препятствие. Рассчитана минимальная скорость сопутствующего потока, необходимая для проскакивания пламени через препятствие в зависимости от длины зауженной области. Исследовано изменение формы фронта пламени во время прохождения канала. Получено подтверждение эффекта инерционности пламени в случае двумерного моделирования.
5. Исследована нелинейная динамика и устойчивость богатого водород-воздушного пламени в микропотоковом реакторе на основе диффузионно-тепловой модели с двухступенчатой кинетикой. Обнаружено существование узкой переходной зоны между режимом нормального горения и FRED колебаниями, состоящей из неустойчивостей диффузионно-тепловой природы. Определено качественное различие между структурой FRED и диффузионно-тепловых пульсаций. Найден критический параметр значений для существования различных динамических режимов в терминах соотношения компонентов смеси и скорости потока.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, входящих в Перечень российских рецензируемых научных журналов, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученых степеней доктора и кандидата наук:

1. *Miroshnichenko T., Gubernov V., Minaev S.* Diffusive-Thermal oscillations of rich premixed hydrogen air flames in microflow reactor // *Combustion Theory and Modelling.* – 2016. – Vol. 20, Issue 2. – P. 313-327.

2. *Мирошниченко Т.П.*, Беляков Н.С., Минаев С.С. Динамика горения газа в канале с истечением продуктов сгорания через пористую стенку // Физика горения и взрыва. – 2015. – № 3. – С. 12-18.
3. *Мирошниченко Т.П.*, Луценко Н.А., Левин В.А. Исследование режимов фильтрации газа из подземного резервуара при большом начальном перепаде давления // Прикладная механика и техническая физика. – 2015. – Т. 56, № 5. – С. 149-155.
4. Луценко Н.А., *Мирошниченко Т.П.*, Одякова Д.С., Харитонов Д.И. Параллельная реализация алгоритма для расчета двумерных нестационарных течений газа через пористые объекты с источниками тепловыделения // Вычислительные технологии. – 2011. – Т. 16, № 2. – С. 98-110.

Статьи в других научных изданиях:

5. *Miroshnichenko T.*, Minaev S. Quenching Distance for Flame Propagation along the Gas Flow in Microchannel with Narrowing. Proceedings of 13th International Conference on Flow Dynamics ICFD 2016, Sendai, Japan [electronic resource]. – 2016. – P. 208-209.
6. *Miroshnichenko T.*, Minaev S. Flame Propagation through Microchannels with Narrowing. Proceedings of 13th International Conference on Combustion & Energy Utilization, Taipei, Taiwan. – 2016. – P. 75.
7. *Miroshnichenko T.*, Gubernov V. Modelling of Flame Dynamics in Microchannel. Современные технологии и развитие политехнического образования: материалы первой международной конференции. Владивосток: Дальневост. федерал. ун-т [электронный ресурс]. – 2015. – С. 661-664.
8. *Мирошниченко Т.П.* Особенности горения богатой водород-воздушной смеси в микропотоковом реакторе. Материалы 53-й международной научной студенческой конференции МНСК-2015: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т., Новосибирск. – 2015. – С. 41.
9. *Miroshnichenko T.* Flame Propagation in the Flow of Combustion Mixture through the Converging Microchannel. Proceedings of 12th International Conference on Flow Dynamics ICFD 2015, Sendai, Japan [electronic resource]. – 2015. – P. 250-251.
10. *Miroshnichenko T.*, Gubernov V., Minaev S. Pulsating dynamics of rich hydrogen air flames in micro flow reactor // Proceedings of 10th Asia-Pacific Conference on Combustion ASPACC 2015, Beijing, China [electronic resource]. – 2015. – P. 1-6 (paper 49).
11. *Miroshnichenko T.*, Gubernov V., Minaev S. Diffusive-Thermal Instabilities of High Lewis Number Flames in Micro Flow Reactor. Proceedings of 25th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems ICDERS 2015, Leeds, UK [electronic resource]. – 2015. – P. 1-6 (paper 047).
12. *Мирошниченко Т.П.* Динамика пламени с цепными реакциями в микроканале с нагретыми стенками. Материалы 52-й международной научной студенческой конференции МНСК-2014: Физика сплошных сред / Новосиб. гос. ун-т., Новосибирск. – 2014. – С. 40.
13. *Miroshnichenko T.* Flame Propagation through Smoothly Converging Microchannel. Proceedings of 11th International Conference on Flow Dynamics ICFD 2014, Sendai, Japan [electronic resource]. – 2014. – P. 210-211.
14. *Мирошниченко Т.П.*, Губернов В.В. Горение богатой смеси H_2/O_2 в микроканале с неравномерной температурой стенок. Успехи механики сплошных сред: Сборник

- докладов Международной конференции, приуроченной к 75-летию академика В.А. Левина. – Иркутск: ООО «Мегапринт». – 2014. – С. 336-337.
15. *Miroshnichenko T., Belyakov N., Lutsenko N., Minaev S.* Explosion Venting of Porous Walls Gas Storage. Proceedings of 10th International Conference on Flow Dynamics ICFD 2013, Sendai, Japan [electronic resource]. – 2013. – P. 704-705.
 16. *Miroshnichenko T.* One-dimension Gas Flow through the Porous Media with Large Pressure Gradient. Proceedings of 24th International Colloquium on the Dynamics of Explosions and Reactive Systems ICDERS 2013, Taipei, Taiwan [electronic resource]. – 2013. – P. 1-5 (paper 121).
 17. *Miroshnichenko T.* The Gas Outflow from Underground Storage Under High Pressure Gradient. International Summer School-Conference “Advanced Problems in Mechanics – 2013”, Book of abstracts, St.-Petersburg, Russia, 2013. – P. 77-78.
 18. Луценко Н.А., *Мирошниченко Т.П.* Фильтрационное течение газа, инициированное взрывом. Материалы Третьей конференции по фильтрационному горению. – Черноголовка: ИПХФ РАН, 2013. – С. 46-49.
 19. *Мирошниченко Т.П.* О распространении волн сжатия при течении газа в пористых средах. Всероссийская научная конференция «Фундаментальные и прикладные вопросы механики и процессов управления», посвященная 75-летию академика В.П. Мясникова. Аннотации докладов. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2011. – С. 65.
 20. Луценко Н.А., *Мирошниченко Т.П.*, Шиян Д.С., Харитонов Д.И. О параллельной реализации алгоритма для расчета течений газа через пористые объекты с источниками тепловыделения. XXXV Дальневосточная школа-семинар им. академика Е.В. Золотова Сборник докладов [электронный ресурс]. – Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2010. – С. 576-581.
 21. *Мирошниченко Т.П.* О процессе фильтрации газа под высоким давлением сквозь пористую среду. Дальневосточная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых по теоретической и прикладной математике: материалы конференции. – Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2009. – С. 63.
 22. Луценко Н.А., *Мирошниченко Т.П.* О процессе одномерной фильтрации газа из подземной полости с высоким давлением. Труды международной конференции «Потоки и структуры в жидкостях: физика геосфер». – М.: ИПМех РАН, 2009. – С. 140-142.
 23. Луценко Н.А., *Мирошниченко Т.П.* О двумерных режимах истечения газа из подземной полости с высоким давлением. XXXIII Дальневосточная школа-семинар им. академика Е.В. Золотова. Тезисы докладов. – Владивосток: Дальнаука, 2008. – С. 218.
 24. Луценко Н.А., *Мирошниченко Т.П.* О течении газа через пористую среду из подземной полости с высоким давлением. XXXII Дальневосточная школа-семинар им. академика Е.В. Золотова. Тезисы докладов. – Владивосток: Дальнаука, 2007. – С. 141-142.
 25. Луценко Н.А., *Мирошниченко Т.П.* О фильтрации газа через многослойную пористую среду. XXXI Дальневосточная школа-семинар им. Академика Е.В. Золотова. Тезисы докладов. – Владивосток: Дальнаука, 2006. – С. 140-141.
 26. Луценко Н. А., *Мирошниченко Т.П.* О фильтрационном течении газа через многослойную пористую среду. Горение и плазмохимия. – 2005. – Т. 3. № 3 – С. 208-212.