

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертацию Мирошниченко Таисии Павловны «Динамика пламени в закрытых сосудах с пористыми стенками и микроканалах при фильтрации газа», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Актуальность. Первая часть диссертации Мирошниченко Т.П. посвящена теоретическому исследованию нестационарных процессов фильтрации газа через пористые стенки замкнутых сосудов, внутри которых имеется повышенное давление газа. Это давление либо задано первоначально, либо вызвано процессом горения газа. Другая часть работ, вошедшая в диссертацию, посвящена распространению пламени в микроканалах. Исследуемые процессы объединяет наличие интенсивного теплообмена между газом и твердой фазой, что существенно сказывается на распространении и затухании пламени. Решение рассмотренных в диссертации задач дает новые фундаментальные знания о нестационарных процессах горения газов в условиях интенсивных теплопотерь, а также способствуют развитию практических приложений в области пожаровзрывобезопасности. В частности, полученные оценки времени разгрузки продуктов горения из подземных резервуаров с проницаемыми грунтами или особенности прохождения пламенем огнепреградителей при наличии фильтрации газа необходимо учитывать в практических оценках последствий воспламенения газа. Актуальность исследования особенностей нестационарного распространения пламени в микроканалах определяется необходимостью разработки энергопреобразующих устройств малого размера и новых методов изучения структуры газозфазных пламен на основе микроканала с заданным профилем температуры стенок. Это направление исследования в области микрогорения появилось сравнительно недавно, и о его актуальности свидетельствует большое количество работ в этой области.

Диссертационная работа состоит из *введения*, где дается общая характеристика выполненной работы, пяти глав, заключения, где представлены основные выводы по работе, списка обозначений и списка использованной литературы. Работа изложена на 120 страницах текста, содержит 1 таблицу, 37 рисунков и библиографический список из 123 цитируемых работ.

Первая глава содержит вывод математических моделей и обоснование принимаемых допущений в описании основных положений теории фильтрации и теории ламинарного пламени, описываются особенности горения пламени в микроканалах. Здесь же приводится обзор работ по теме диссертации.

Вторая глава посвящена исследованию течения нереагирующего газа через пористые среды. Выводится аналитическое решение фильтрационного истечения газа через многослойную пористую среду, подчиняющегося закону Дарси. Приводится решение и анализ проблемы истечения газа из подземного резервуара, инициированного взрывом газа. Особенностью этой задачи является быстрое затухание ударной волны в пористой среде и дальнейшая фильтрация газа через пористую среду по законам бародиффузии, что позволяет рассчитать время выхода газа в атмосферу с минимальными вычислительными затратами. На основании решения, полученного численными конечно-разностными методами, анализируется динамика истечения газа, получены оценки расхода газа и времени разгрузки резервуара.

В *третьей главе* описаны теоретические исследования связанных процессов горения газа в сосуде с пористыми стенками и фильтрации газа через эти стенки. Для описания процесса разработана модель, которая включает модель горения газа в сосуде и модель фильтрации газа через пористую стенку. Связь процессов друг с другом устанавливается посредством граничных условий. На основе численного решения получены данные о максимальном давлении газа в резервуаре, времени разгрузки и динамике потока в зависимости от проницаемости среды.

В *четвертой главе* представлены результаты моделирования нестационарного распространения пламени в сужающихся микроканалах при наличии спутного потока горючей смеси. Математическая модель учитывает двухмерное вязкое течение газа в канале при распространении пламени. Численные расчеты показали возможность прохождения пламенем сужения с диаметром меньше критического диаметра при наличии спутного потока газа. Построены зависимости между минимальным диаметром сужения, характерной длиной сужения и скоростью потока смеси. Эти результаты являются новыми, и они позволяют по-новому взглянуть на концепцию критического диаметра применительно к микроканалам.

В *пятой главе* описываются результаты исследования горения газа в микроканале, стенки которого подогреваются внешним источником тепла. Исследование направлено на выявление особенностей горения богатых водород-воздушных смесей. Математическая модель представляет собой диффузионно-тепловую модель горения с двухступенчатым механизмом реакции. Анализ результатов численного моделирования позволил выявить пульсации, происхождение которых связано с диффузионно-тепловой неустойчивостью. Определено качественное отличие диффузионно-тепловых пульсаций от обнаруженных ранее пульсаций с периодическим воспламенением и затуханием. Найдены критические

значения параметров компонентов смеси и скорости потока для существования различных динамических режимов.

В работе использовался единый подход в моделировании перечисленных выше систем, при котором процессы фильтрации и горения газов рассматривались как взаимосвязанные явления. К достоинствам работы следует отнести оригинальные численные алгоритмы. Диссертация является завершенной работой, а качество ее оформления соответствует установленным требованиям.

Основные результаты работы и новизна. Работа представляет собой результаты теоретического исследования связанных процессов горения и фильтрации газа, а также моделирование горения газа в микроканалах. Были построены математические модели явлений с учетом особенностей каждого из рассматриваемых процессов. В частности, впервые сформулирована модель, которая одновременно описывает процесс нарастания давления в сосуде с пористыми стенками за счет горения внутри нее газа и последующая фильтрация газа через пористые стенки в атмосферу. Получено аналитическое решение задачи фильтрации через многослойную пористую среду. Выделены характерные режимы истечения газа из подземного резервуара. Данные результаты позволяют оценить характерное время выхода газа из резервуара в атмосферу через слой пористой стенки, оценить максимально достижимое давление газа в резервуаре, вызванное горением.

Установлены критерии прохождения пламенем микроканала с сужением, диаметр которого меньше критического. Обнаружен новый тип неустойчивости богатых смесей газов в микропотоковом реакторе. Данные результаты позволяют выделить характерные режимы течения в микроканалах, оценить границы области неустойчивости пламени. Полученные результаты являются новыми.

Достоверность результатов подтверждается корректностью постановки задач, использованием известных численных алгоритмов, анализом корректности переходов к предельным случаям, а также сравнениями с результатами других авторов и имеющимися в литературе данными экспериментов и детального численного моделирования.

Все основные результаты диссертационной работы опубликованы в научных изданиях, в том числе 4 работы опубликованы в печатных изданиях, входящих в перечень ведущих рецензируемых научных журналов, рекомендованных ВАК. Результаты работы прошли апробацию на ведущих отечественных и международных конференциях. Содержание автореферата соответствует основным результатам, представленным в диссертации, и достаточно полно ее отражает.

Полученные в работе результаты являются значимыми в научном аспекте, и могут быть использованы на практике. В частности, при горении газа или его взрыве в

подземном резервуаре оценки времени разгрузки резервуара и интенсивность истечения газов в атмосферу имеют значение для обеспечения пожаровзрывобезопасности в подземных газовых хранилищах, химических реакторах или шахтах. Знание условий, при которых пламя способно распространяться через области с диаметром меньше критического, ценно как с точки зрения пожаровзрывобезопасности, так и для развития микроустройств с горением газа. Интересным результатом является описание нового типа неустойчивости пламени богатой водород-воздушной смеси при распространении в микроканале с нагретыми стенками. Хотя этот эффект нуждается в экспериментальной проверке, в работе указаны особенности и границы проявления нового типа неустойчивости, что может служить хорошей проверкой редуцированных кинетических механизмов горения данной смеси.

По диссертации можно сделать следующие замечания и поставить вопросы, требующие адекватного ответа.

1. Во введении ссылки [4, 5] не относятся к нестационарной фильтрации. Фамилия Лойцянский пишется без буквы з.
2. В уравнении состояния газа (1.7) и далее R не является универсальной газовой постоянной, поэтому в различных расчетах при указании начальных значений параметров необходимо указывать какой газ имеется в виду. Так, например, для воздуха $R=8.31(\text{Дж/мольК})/0.029(\text{кг/моль})=286.6 \text{ м}^2/(\text{с}^2\text{К})$, а в расчетах везде используется значение $R=277$.
3. Стр. 17. Пункт 3. $\lambda V^2 T_c$ из уравнения (1.4) это поток тепла в конденсированной фазе, а не «...приток тепла за счет теплопроводности в газовой фазе».
4. Стр.32. В уравнениях (1.37) и (1.38) нет индексов при Y в первом члене в правой части уравнений.
5. Стр. 32-33. В тексте появляется избыточный термин каркас (синоним твердой фазы), не определенный ранее и не используемый в дальнейшем.
6. Стр. 40. В задаче (2.1) - (2.3) при значениях параметров (2.9) в формулах (2.5) и (2.6) член $\exp(2g\xi/RT)\approx 1$ и изменяется на 0.3%, а его сомножитель $\kappa(\xi)$ на 4 порядка. Можно было бы упростить формулы и дать аналитические выражения.
7. Стр. 42-43. На рис. 2.2 - 2.4. подписи осей абсцисс и ординат не по-русски и не по ГОСТу.
8. Стр. 52. Рис. 2.10. эта зависимость имеет смысл, только если указано время, за которое выходит газ через слой грунта с известными параметрами. Нет пояснения, за какое время выходит газ.

9. Стр. 55. Рис. 2.13. H и k независимые, задаваемые параметры задачи. А вот время истечения t , безусловно, зависит от этих параметров. Также привычнее было бы зависимую величину t откладывать по оси ординат, а независимую по оси абсцисс. Секунды также нужно обозначать по-русски.

Еще вопрос по рис 2.13. В чем причина независимости времени истечения от параметра H^2/k в области I, почему граница областей I и II проходит именно там, а не левее?

10. Стр. 69. Рис. 3.4b. Как может скорость на входе в пористую стенку достичь значений 30 Махов? Это не физично.

11. Стр. 70. В основных результатах по разделу 3 записано, что время сгорания газа в сосудах со стенками одинаковой проницаемости уменьшается с увеличением толщины проницаемой стенки. Этот вывод противоречит рис. 3.5.

Однако, эти замечания не аннулируют достоинство работы. Диссертация полностью соответствует требованиям Положения о порядке присуждения научным и научно-педагогическим работникам ученых степеней, а автор работы Мирошниченко Таисия Павловна достойна присвоения степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы.

Официальный оппонент

Заведующий лабораторией физики и химии
горения газов ИХКГ СО РАН,

д.т.н., доцент


подпись

Коржавин Алексей Анатольевич

22.01.2018

дата

ФГБУН Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского Сибирского
отделения Российской академии наук

630090, г. Новосибирск, ул. Институтская, д. 3

тел. (383)333-22-96

email: korzh@kinetics.nsc.ru

Подпись Коржавина А.А. заверяю:



секретарь ИХКГ СО РАН
Кашутина Н.А. 