

«УТВЕРЖДАЮ»

Врио директора ФГБУН ОИВТ РАН

/Гавриков А.В./

20__ г.



ОТЗЫВ

ведущей организации

на диссертационную работу Мирошниченко Таисии Павловны

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

Диссертационная работа Мирошниченко Т.П. посвящена расчетно-теоретическому исследованию задач фильтрации реагирующего газа. В рамках диссертационной работы сформулирован и решен ряд задач об истечении продуктов горения через пористую стенку из замкнутого резервуара, а так же задачи о распространении пламени в микроканале в условиях внешнего воздействия газодинамической или тепловой природы. При этом автором предложена классификация математических моделей с выделением областей их применимости, в том числе с возможностью получения аналитических решений. В результате проведенных исследований автору удалось получить ряд новых результатов, имеющих научную и практическую ценность для развития технологии сжигания газообразных топливно-воздушных смесей.

Объем и структура работы. Диссертационная работа изложена на 120 страницах, состоит из введения, пяти глав и заключения. Работа содержит 1 таблицу, 37 рисунков, 123 библиографических ссылки.

Во введении сформулированы цель и задачи диссертации, обоснована их актуальность, определены научная новизна, теоретическая и практическая ценность, а так же достоверность полученных результатов. Здесь же автор формулирует положения, выносимые на защиту. Представлены личный вклад автора и информация об апробации результатов диссертационной работы.

В первой главе диссертационной работы приводится обзор базовых элементов математических моделей, используемых для решения задач фильтрации и горения газов. Приводится классификация модельных приближений для изучения отдельных аспектов развития горения в резервуарах с пористыми стенками и микроканалах в условиях

внешнего теплового воздействия или вынужденной фильтрации газа. Отдельное внимание уделено модели Дарси, приближению бародиффузии и расчету параметров газа при его сгорании в замкнутом объеме. На основе этих приближений впоследствии построены аналитические решения и граничные условия для совместных задач горения и фильтрации.

Во второй главе обсуждаются аспекты решения задачи об истечении продуктов горения из замкнутого резервуара через пористую стенку. Анализ задачи выполнен в одномерном приближении. Получена аналитическая оценка расхода газа через пористую среду в зависимости от перепада давлений на границах пористого слоя. Численно исследованы режимы истечения газа в зависимости от его начального состояния, а так же от параметров пористого слоя (его проницаемости и толщины). Продемонстрирована вероятность формирования нескольких характерных режимов истечения, включая бародиффузионный режим, характеризуемый большими временами истечения. Для бародиффузионного режима построено аналитическое решение.

В третьей главе, на основе традиционных представлений об особенностях сгорания газообразной смеси в замкнутом объеме и о фильтрации газа через пористую стенку, построена математическая модель для решения совместной задачи горения газообразной смеси в замкнутом объеме с учетом фильтрации газа через пористую стенку. Для описания процессов на границе газ/пористая среда построено аналитическое граничное условие.

В четвертой главе в двухмерном осесимметричном приближении решена задача о распространении пламени в микроканале с препятствием. В ходе анализа получены оптимальные характеристики препятствия, обеспечивающие прохождение пламени через сужение с минимальным диаметром, меньше критического. Показано, что взаимное действие газодинамических механизмов, способствующих ускорению пламени, и теплопотерь определяет нестационарные эффекты в развитии структуры пламени, что, в частности, определяет наличие так называемого «инерционного эффекта», предсказанного ранее на основе математического моделирования задачи в квазиодномерном приближении.

В пятой главе проведен детальный анализ нестационарных режимов горения богатых водородно-воздушных смесей в микроканале с градиентом температуры. Особый интерес уделен приграничной области между режимами нормального и колебательного режимов распространения пламени. Показано, что по мере уменьшения скорости подачи горючей смеси наблюдается возникновение в системе колебаний, связанных с диффузионно-

тепловой неустойчивостью пламени. При дальнейшем снижении скорости наблюдается серия бифуркаций удвоения периода, в результате чего реализуется переход к режиму распространения пламени с хаотическими пульсациями. Далее происходит переход к режиму с периодическим затуханием и реиницированием горения через режим с колебаниями смешанного типа. На основе проведенного математического моделирования получены критерии перехода между выявленными режимами в терминах скорости подачи смеси и ее состава.

В заключении сформулированы основные результаты работы.

В ходе рассмотрения текста диссертации возникли следующие **замечания**:

1. При формулировке модельных положений, положенных в основу используемых в работе математических моделей и расчетных алгоритмов, имеет место не вполне корректная или требующая пояснений терминология. В частности: “Система химически реагирующего потока газа” (с. 14), “макромеханическая детализация” (с. 14), “размером a ” (с. 17), “слагается” (с. 17), “механизмов процессов” (с. 18), “продуктов горения взрыва” (с. 20), “представлений и результатов ламинарного пламени” (с. 25), “критического диаметра” (с. 29), “горелки с регенерацией тепла”, “Расчет потока переноса” (с. 48), “поперечным диаметром” (с. 73), “Температура стенок канала задана постоянной во времени с конвективным теплообменом” (с. 75), “правую часть потока пламени” (с. 91).

2. При описании элементов формулируемых математических моделей допущен ряд неточностей. В частности:

- Перед формулой (1.9) написано “В силу принятых допущений имеет вид”, что имеет вид?
- Чуть ниже на с. 17 написано “Имеет размерность площади...”, что имеет размерность?
- п. 3 на с. 17: “Члены в правой части... приток тепла за счет теплопроводности в газе $\lambda \nabla^2 T_c$ ”. Скорее всего, здесь имеет место опечатка, и речь идет о потоках тепла внутри конденсированной среды.
- п. 4 на с. 17: “Приток тепла в газе складывается из тех же компонент, что и приток тепла в твердой фазе”. По-видимому, здесь следует говорить не о “тех же”, а об аналогичных компонентах.
- с. 20: “использовалась для описания следующих процессов”, при этом ниже речь идет лишь об одном процессе – фильтрации продуктов горения через пористый слой.
- с. 32: “Также является одной из фундаментальных...”, что является?

3. При описании диффузионно-тепловой модели горения ничего не говорится о роли эффектов Соре и Дюфо. В связи с чем этими эффектами можно пренебречь при решении поставленных в работе задач?

4. Необходимо дополнительное пояснение результатов, показанных на рисунке 2.6. В контексте представленных в разделе 2.1.3 результатов рис. 2.6 неочевиден. На начальном участке $x \rightarrow 0$ функция $k = cx + b$ дает большее значение, чем k_1 ($b = k_1$) в связи с этим неочевидно, почему профиль давления в первом случае оказывается более острым по сравнению со вторым случаем? Это в определенной мере противоречит результатам, представленным на рис. 2.2, где продемонстрировано, что более острый профиль давления соответствует меньшему значению k .

5. В постановке задачи о фильтрации продуктов взрыва из резервуара через пористую стенку определенная роль уделена переносу тепла. Однако, профили температуры никак в повествовании не обсуждаются. При этом не совсем очевидно, например, как меняется температура в резервуаре, и как это сказывается на изменении профилей давления и плотности по мере истечения продуктов взрыва из резервуара.

6. В тексте диссертации никак не обсуждается начальный участок зависимости, представленной на рис. 2.13. При этом, судя по всему, резкое изменение в показанной зависимости указывает на смену режима истечения, что целесообразно прокомментировать.

7. Вопросы по поводу постановки задачи в разделе 4.2:

- Из каких соображений выбиралось значение v_{out} ?
- С какой целью было выбрано приближение стенок с проскальзыванием (“условия неприлипания”)? Все-таки, прилипание газа на стенках канала является одним из основных каналов потерь наряду с теплопотерями на стенках.
- Из представленных рисунков не очевидна форма профиля стенок канала вблизи сужения. Конкретное задание профиля канала следует отметить отдельно.
- Каковы конкретные значения “небольших” снижения температуры и сдвига позиции устойчивого пламени при учете радиационных потерь?
- В виду того, что “*рассматривалась осесимметричная постановка задачи*” уточнение, что “*расчеты проводились только в половине канала*”, излишне.
- Как определялась ведущая точка в двух режимах с вогнутой и выпнутой формами фронта пламени?

8. Почему автор, использовал в своих расчетах нереализуемый в природе двухступенчатый механизм (5.1), тогда как использованные автором вычислительные

методики вполне позволяют проводить расчеты с применением полной кинетической схемы окисления водорода, записываемой в форме 21 реакции всего для 8 реагирующих компонент?

9. На с. 91 написано: “*В расположенной выше по течению разогретой зоне, $x > -16$, температура смеси ниже, чем температура стенок реактора, ...*”. Так ли это на самом деле? Исходя из анализа данных, представленных на рис. 5.3 область, о которой идет речь, характеризуется $x < 16$.

10. В тексте диссертации так же встречаются опечатки и грамматические ошибки, тем не менее, в целом текст составлен понятным языком.

Сделанные замечания не меняют общей положительной оценки диссертации. Диссертация содержит новые результаты, имеющие практическую и научную значимость для решения широкого класса актуальных задач.

Актуальность работы. Горение газа является одним из основных традиционных источников энергии. Более того, с горением газообразных топливно-воздушных смесей связан ряд перспективных энергетических технологий, в частности имеющая отношение к результатам настоящего исследования отрасль водородной энергетики. В связи с этим приобретают все большую актуальность задачи повышения энергоэффективности технологических систем, работающих на основе процесса сжигания газообразных топлив. Стоит также отметить, что значительную роль понимание особенностей горения газообразных горючих смесей играет при обеспечении безопасности промышленных технологий, задействованных в добыче, хранении, транспортировке и утилизации жидких и газообразных топлив. При этом, при решении задач энергоэффективности, а так же задач пожаро- и взрывобезопасности все большее значение играет предсказательное расчетно-теоретическое исследование с привлечением методов математического моделирования и программных кодов, разработанных на их основе. Наибольшую сложность при решении задач горения в реальных условиях (с учетом газодинамических потоков, с учетом взаимодействия пламени с окружающей средой и пр.) представляет отбор математических моделей для корректного, с одной стороны, и эффективного решения поставленной задачи. Полученные в рамках диссертационной работы результаты можно трактовать, отчасти, как всесторонний анализ модельных приближений для решения широкого класса задач горения в замкнутых объемах с пористыми стенками и в микроканалах, где одну из ведущих ролей начинает играть фильтрация газа через поры или узкие зазоры. В связи с этим полученные результаты являются актуальными и

практически значимыми для области математического моделирования процесса горения газообразного топлива.

Научная новизна диссертационной работы определяется новыми результатами в области систематического анализа и классификации существующих математических моделей для решения задач горения газообразных смесей при фильтрации газа через пористые преграды и микроканалы. Так же новыми являются сами научные результаты, полученные в ходе расчетно-теоретического анализа задач о фильтрации газа из резервуара, заполненного реагирующей смесью, через пористую стенку и о распространении пламени в микроканалах в условиях внешнего газодинамического и/или теплового воздействия.

Теоретическая и практическая значимость работы. Результаты, полученные Мирошниченко Т.П. и представленные в тексте диссертационной работы, указывают пути выбора оптимальных математических моделей при решении задач горения газообразных топлив в условиях фильтрации газа через пористую среду и/или микроканалы, что является первостепенным шагом в проведении расчетно-теоретического анализа важных с практической точки зрения режимов сжигания газообразных топлив. Показана принципиальная возможность и предложено конкретное решение построения граничных условий в задачах с фильтрацией газа из реактора через пористые стенки. Помимо этого, ряд результатов, полученных в ходе апробации рассматриваемых моделей на конкретных примерах, имеют определенный научный вклад в теоретическое понимание физических процессов, определяющих развитие горения в объемах, ограниченных пористыми стенками, и микроканалах. В частности, получены новые теоретические данные о пределах применимости бародиффузионного приближения в задачах фильтрации газа через пористую стенку при его сжигании в замкнутом резервуаре. Детально проанализирована эволюция структуры пламени в микроканале при внешнем газодинамическом и тепловом воздействии. В частности, показано, что взаимодействие газодинамических и тепловых механизмов определяет возможность прохождения пламени через зазоры докритического размера. Получены также новые данные о развитии диффузионно-тепловой неустойчивости, определяющей формирование колебательных режимов горения в микроканале с нагретой стенкой. Классификация математических моделей, алгоритм построения граничных условий, а так же ряд новых теоретических результатов могут быть использованы для решения широкого круга задач, связанных с горением и фильтрацией газообразных сред и исследуемых в таких научных центрах как ОИВТ РАН, ИБРАЭ РАН, ИХФ им. Н.Н. Семенова РАН, ИПХФ РАН, ИСМАН, ИТПМ

СО РАН, Институте теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, НИЦ Курчатовский институт и др.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались на Российских и Международных конференциях.

Публикации. Результаты работы изложены в 26 научных работах, в том числе 4 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК. Публикации достаточно полно отражают материалы диссертации.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

Личный вклад автора правильно и полно отражён в диссертации и автореферате.

Диссертационная работа Мирошниченко Т.П. была заслушана и одобрена на научном семинаре Отдела Вычислительной физики Научно-исследовательского центра электрофизики и тепловых процессов Объединенного института высоких температур Российской академии наук 27 декабря 2017 г., протокол № 17.

Диссертация Мирошниченко Т.П. «Динамика пламени в закрытых сосудах с пористыми стенками и микроканалах при фильтрации газа» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней № 842 от 24.09.2013г., а её автор Мирошниченко Таисия Павловна заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 - Механика жидкости, газа и плазмы.

Отзыв составил и.о. заведующего лабораторией №4.3.1. Математического моделирования ОИВТ РАН к.ф.-м.н. Киверин Алексей Дмитриевич
125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, (495) 484-44-33, alexeykiverin@gmail.com

Подпись Киверина А.Д. и сведения заверяю

Ученый секретарь ОИВТ РАН д.ф.-м.н.

Амиров Равиль Хабибулович

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, (495) 485-90-09, amirovravil@yandex.ru

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Объединенный институт высоких температур (ОИВТ РАН) 125412, г. Москва, ул. Ижорская, д.13, стр.2, (495) 485-82-44, webadmin@ihed.ras.ru