

На правах рукописи

Палесский Федор Станиславович

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ВОЛН ФИЛЬТРАЦИОННОГО
ГОРЕНИЯ В ПОРИСТЫХ СРЕДАХ
С РАДИАЦИОННЫМ ТЕПЛОПЕРЕНОСОМ**

01.02.05 – Механика жидкости газа и плазмы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Новосибирск – 2019

Работа выполнена в ФГБУН Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН.

Научный руководитель:

Доктор физико-математических наук Минаев Сергей Сергеевич, главный научный сотрудник, заведующий лабораторией «Информационных технологий», Институт прикладной математики Дальневосточного отделения РАН.

Официальные оппоненты:

Кандидат физико-математических наук Чернов Анатолий Альбертович, старший научный сотрудник, Лаборатория кинетики процессов горения, ФГБУН Институт химической кинетики и горения В.В. Воеводского Сибирского отделения РАН.

Доктор технических наук Кичатов Борис Викторович, высококвалифицированный старший научный сотрудник, Лаборатория нелинейной динамики и теоретической биофизики, ФГБУН Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН.

Ведущая организация:

ФГБУН Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения РАН

Защита состоится “04” октября 2019 г. в “9:30” часов на заседании диссертационного совета Д 003.035.02 при Институте теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения РАН по адресу: 630090, г. Новосибирск, Институтская 4/1, ИТПМ.

Отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенный печатью учреждения, просьба направлять на имя ученого секретаря диссертационного совета Д003.035.02.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института теоретической и прикладной механики Сибирского отделения РАН, <http://itam.nsc.ru>.

Автореферат разослан “_____” _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор физико-математических наук



С.А. Гапонов

Актуальность. В настоящее время актуальными являются исследования фильтрационного горения газов в инертных пористых средах, направленные на создание эффективных радиационных горелок, поскольку такой способ сжигания газа характеризуется высокими показателями удельной мощности, динамического диапазона мощности и низкими уровнями выбросов СО и NO_x . Эти характеристики достигаются за счет эффективной регенерации тепла от горячих продуктов горения через пористый твердый каркас в область перед зоной химической реакций за счет теплопроводности и радиационного переноса, что позволяет увеличить скорость горения, расширить пределы существования пламени, сжигать запределно бедные смеси газов.

Пористая матрица, нагретая до высоких температур, создает мощный тепловой поток излучения, который используется для создания радиационных горелок на основе фильтрационного горения газов. Существующие экспериментальные данные показывают, что радиационные пористые горелки с фильтрационным горением газа позволяют эффективно преобразовать энергию от сгорания топлива в радиационный поток с эффективностью преобразования более 50%. Использование таких излучающих радиационных горелок значительно уменьшить объемы топочного пространства и металлоемкость теплообменников за счет эффективной конверсии тепла от сгорания топлива в радиационный поток, сжигать бедные смеси (попутный нефтяной или шахтные газы) и разнообразные виды топлив, регулировать мощность в широком диапазоне и при этом иметь экологические характеристики, удовлетворяющие самым жестким мировым стандартам. Развитие малой энергетики в этом направлении позволило бы обеспечить экологичность и ресурсосбережение за счет эффективного использования энергии сжигаемого топлива и снижения материалоемкости энергетических устройств, что способствовало бы выполнению принятой стратегии научно-технологического развития РФ.

Цель и задачи работы заключались в создании математических моделей горения газовых смесей в пористых средах и микроканалах с учетом радиационного теплообмена; создание и реализация разностных схем для численного моделирования стационарных режимов горения газов в пористых горелках; определение мощности и эффективности теплового излучения от горелки; определение влияния радиационного теплообмена на характеристики пламени и режимы стабилизации пламени внутри горелки.

Научная новизна состоит в разработке модели микроканальной горелки, состоящей из одинаковых расширяющихся микроканалов, внутри которых происходит горение газа. Выполнено численное исследование характеристик теплового излучения от нагретых стенок расширяющегося теплоизолированного микроканала, в котором происходит горение предварительно перемешанной смеси газов. Показано, что излучение из внутренних поверхностей канала может превышать излучение с торцевой поверхности на выходе из канала более чем в три раза. Максимальная температура стенок канала и максимальное значение мощности излучения достигается при стабилизации фронта пламени внутри канала.

Выполнено численное моделирование горения предварительно перемешанных смесей газов в цилиндрической пористой горелке в рамках модели, которая учитывает радиационный теплообмен внутри пористой среды и тепловое излучение во внешнюю среду как с внешней поверхности, так и от внутренних слоев пористой горелки.

Проведено сравнение результатов предложенной модели и традиционной двухтемпературной модели горения газов в пористой среде и показано, что в случае учета радиационного теплопереноса температура пламени может быть на 15% больше адиабатической температуры свободного пламени такого же состава. Показано также, что доля интегрального теплового потока от внутренних слоев пористой горелки может достигать 40% от излучения внешней поверхности пористой горелки.

Впервые численно решена задача стабилизации фронта пламени внутри полой цилиндрической горелки и в прилегающих областях с учетом радиационного теплопереноса и лучистых теплопотерь.

Показано, что в зависимости от начальных условий зажигания газа возможны разные режимы стабилизации пламени в цилиндрической пористой горелке: при одних и тех же расходах свежей смеси пламя стабилизируется во внутренней полости горелки, внутри пористой среды или на внешней поверхности горелки. При этом в случае внутреннего режима горения, эффективность теплового излучения может быть в 2 раза выше, чем в случае внешнего режима горения.

Показано, что изменение условий теплообмена на внешней поверхности горелки может приводить к переходу от внешнего режима горения к

внутреннему. Численные исследования смены режимов находятся в хорошем качественном согласии с экспериментальными данными.

Научная и практическая ценность работы состоит в том, что результаты работы могут быть использованы для моделирования задач фильтрационного горения газов, в которых особенно важным является тепловое излучение внутри горелки и лучистые теплопотери во внешнюю среду. Продемонстрировано, что тепловое излучение от внутренних слоев пористой среды играет важную роль, и его необходимо учитывать при моделировании задач такого рода. Численные оценки эффективности и мощности теплового излучения, полученные в работе, необходимо учитывать при проектировании радиационных горелок на основе сжигания газов.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью применяемых математических моделей, строгой постановкой задач и соответствием полученных результатов имеющимся в литературе данным теории и результатам численного моделирования.

На защиту выносятся:

1. Результаты численного моделирования горения предварительно перемешанной смеси газов в расширяющемся микроканале с учетом лучистых теплопотерь. Оценки эффективности и мощности теплового излучения из микроканальной пористой горелки.
2. Сравнительный анализ результатов численного исследования двух моделей фильтрационного горения газа в цилиндрическом пористом теле: с учетом и без учета внутреннего радиационного теплопереноса.
3. Результаты численного исследования стационарных режимов горения предварительно перемешанной смеси газов в полый цилиндрической насадке из пористого материала и в прилегающих областях, свободных от пористого материала, с учетом радиационного теплообмена и лучистых теплопотерь во внешнюю среду.

Личный вклад автора состоял в решении поставленных задач, разработке, написании и тестировании численных алгоритмов для получения основных результатов работы. Диссертантом были произведены верификация, сравнение и анализ полученных результатов на основе экспериментальных и теоретических данных, известных из литературы.

Апробации работы. Работа докладывалась на 6th International Conference on Flow Dynamics (ICFD, 2009, Sendai); Международной конференции по методам аэрофизических исследований (ICMAR, 2010, Новосибирск); XI Всероссийской школе-конференции молодых ученых «Актуальные вопросы теплофизики и физической гидрогазодинамики (Новосибирск, 2010); 33rd International Symposium on Combustion (2010, Beijing); 34rd International Symposium on Combustion (2012, Warsaw); High Technology: Research and Applications 2014 (HTRA 2014, Tomsk); 53-й Международной научной студенческой конференции (МНСК, 2015, Новосибирск).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, включающего 75 наименований. Объем диссертации составляет 119 страниц, включая 36 рисунков и 1 таблицу.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении раскрыта актуальность работы, отмечены ее научная новизна и практическая значимость, сформулированы цели и задачи.

В первой главе кратко описано современное состояние теории ламинарного пламени, особенности горения в микроканалах и пористых средах с учетом теплового излучения и приведен обзор литературы по теме диссертации.

Во второй главе диссертации представлены результаты численного моделирования предварительно перемешанной смеси газов в расширяющемся микроканале. На рис. 1 представлена схема численного эксперимента. Свежая горючая смесь подается в узкую часть канала. Продукты горения покидают канал через широкую часть. Внешние стенки канала параллельны оси симметрии и теплоизолированы. Предполагается, что тепловое излучение исходит от внутренних стенок канала и рассчитывается по закону Стефана – Больцмана, с учетом закона Ламберта. Горение газа описывалось нестационарной одномерной диффузионно-тепловой моделью ламинарного пламени с учетом теплообмена газа со стенками канала. Модель учитывала теплообмен стенок с газом, кондуктивный перенос тепла и излучение от стенок канала. В результате численного моделирования показано, что в отличие от канала постоянного сечения в расширяющемся канале возможна стабилизация плоского ламинарного фронта пламени в широком диапазоне скоростей фильтрации газа.

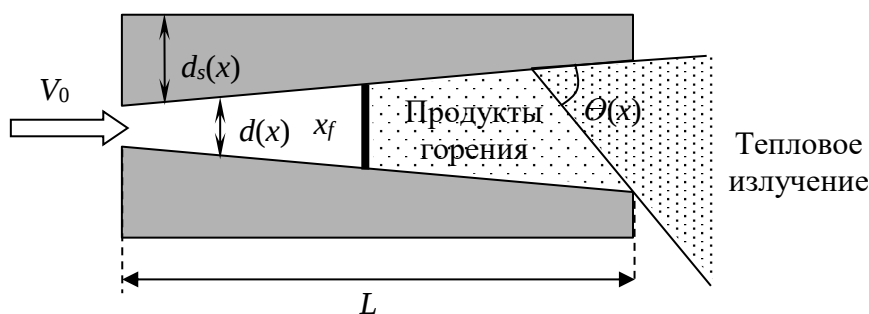


Рис. 1. Схема горения газов в канале.

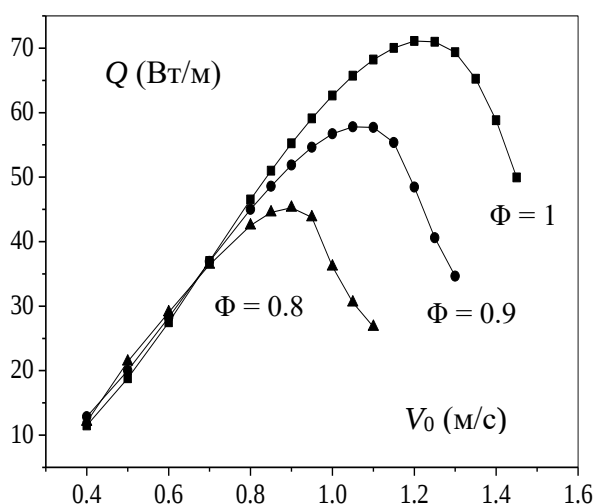


Рис. 2. Зависимость мощности полного радиационного потока от скорости подачи свежей смеси, подсчитанная для различных значений коэффициента избытка горючего (Φ).

Показано, что максимум температуры стенок достигается внутри канала, на некотором удалении от выхода. Этот результат находится в качественном согласии с существующими экспериментальными данными¹. Приведены оценки мощности и эффективности теплового излучения из канала. На рис. 2 построена зависимость мощности теплового излучения от расхода свежей смеси. Показано, что максимум мощности и эффективности излучения достигается в случае стабилизации пламени внутри канала, на некотором расстоянии от выхода.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования задачи о распространении и стабилизации волны фильтрационного горения в пористой среде. Задача решалась в рамках двухтемпературной модели, которая учитывает радиационный теплоперенос и описывается уравнениями переноса энергии по газу (1) и по пористому телу (2), уравнением на концентрацию горючего (3), уравнениями сохранения массы (4) и переноса радиации в рамках модели Эддингтона (5):

$$\rho_g c_{pg} \left(\frac{\partial T}{\partial t} + V \nabla T \right) = \lambda_g \Delta T - \frac{\alpha}{d_p} (T - T_s) + qW(T, Y) \quad (1)$$

¹ Левин А. М., Малая Э. М., Родин А. К., Дребенцов В. Ф. Статистические и динамические характеристики газовых высокотемпературных излучателей // Теория и практика сжигания газа. Т. VI. / Под ред. А.С. Иссерлина, М.И. Певзнера. – Л.: Недра, 1975. – С. 357-363.

$$\rho_s c_{ps} \nabla T_s = \lambda_s \Delta T_s + \frac{\alpha}{d_s} (T - T_s) - \nabla q_{\text{rad}}, \quad (2)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + V \nabla Y = \Delta Y - W(T, Y), \quad (3)$$

$$\vec{V} \cdot (\rho \vec{V}) = 0, \quad (4)$$

$$\nabla q_{\text{rad}} = -\frac{1}{\mu} \frac{d^2 U_r}{dx^2} = -\mu (U_r - 2\sigma_{SB} T_s^4). \quad (5)$$

Модель (1)–(5) учитывает конвективный перенос тепла, ньютоновский теплообмен между фазами, перенос тепла с помощью теплопроводности, радиационный теплоперенос и тепловое излучение от внутренних слоев пористого тела во внешнюю среду (модель 1). Также была рассмотрена упрощенная модель, которая описывается уравнениями (1)–(4) и не учитывает радиационный теплоперенос, а учитывает только тепловой поток излучения с внешней поверхности пористого тела по закону Стефана–Больцмана (модель 2). На рис. 3 представлена U -образная зависимость нормальной скорости распространения фронта пламени от скорости фильтрации газа для двух моделей. Значения скорости распространения пламени, вычисленные в рамках модели 1 и модели 2, значительно отличаются друг от друга. Это обусловлено более широкой зоной прогрева свежей смеси за счет радиационного теплопереноса.

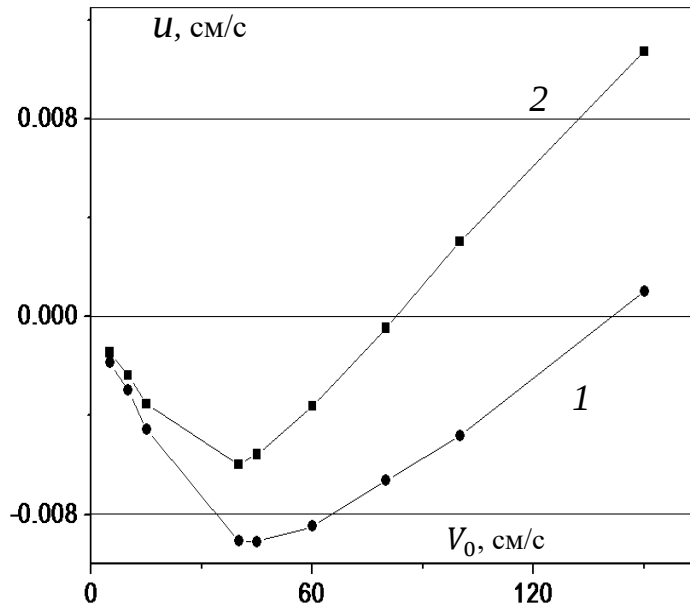


Рис. 3. Диаграмма зависимости скорости распространения пламени u от скорости фильтрации свежего газа V_0 для упрощенной модели переноса (2, квадраты) и для модели с радиационным теплопереносом (1, круги).

Пористость среды $m = 0.4$. Рассмотрена задача плоского слоя пористой среды.

Показано, что лучистый перенос существенно влияет на ширину зоны преподогрева свежей смеси от продуктов горения через пористую среду. В случае учета радиационного теплопереноса ширина зоны преподогрева значительно больше. В результате этого достигается более высокая максимальная температура газа на фронте пламени для модели 1, чем для модели 2. Максимальная температура прогрева пористого каркаса также достигает более высоких значений (выше на 15%) для модели с учетом радиационного теплопереноса, чем для модели 2.

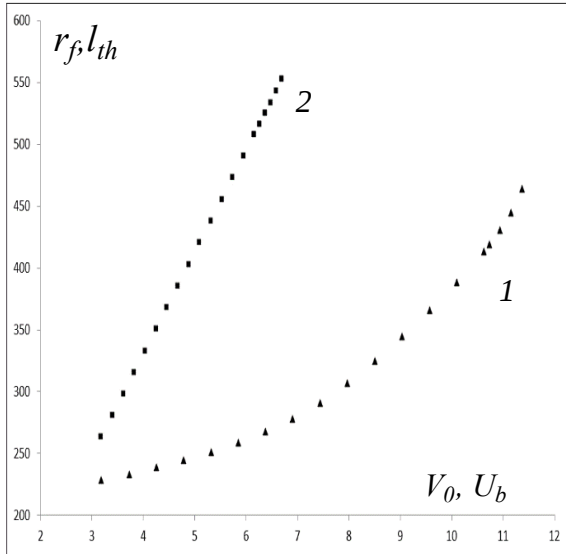


Рис. 4. Зависимость радиуса фронта пламени r_f от скорости фильтрации свежей смеси V_0

▲ – для модели 1, ■ – модели 2.
Цилиндрическая пористая среда.

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования в цилиндрической пористой среде.

Благодаря цилиндрической геометрии системы, стабилизация пламени наблюдалась в широком диапазоне скоростей фильтрации свежей смеси. На рис. 4 представлены зависимости радиальной координаты положения фронта пламени внутри пористой среды для модели 1 и модели 2. Показано, что в случае учета теплового излучения стабилизация наблюдается в более широком диапазоне скоростей фильтрации свежей смеси. Для модели 2 лучистые теплотери во внешнюю среду определялись температурой внешней поверхности пористого тела $\theta(r_1)$ по закону Стефана – Больцмана. Для модели 1 вычислялся интегральный лучистый тепловой поток, который учитывает

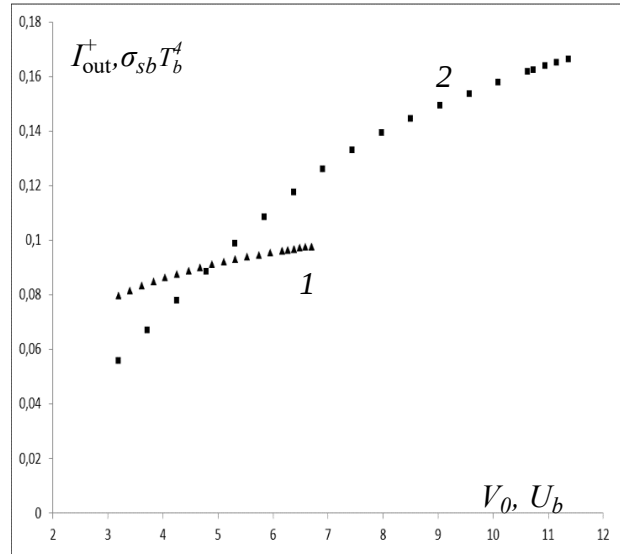


Рис. 5. Безразмерная зависимость потока излучения от скорости фильтрации газа, измеряемая в единицах $\sigma_{sb} T_b^4$.

Кривая 1 – тепловой поток излучения с внешней границы $\theta^4(r_1)$, где температура стенки $\theta(r)$ вычислена в рамках модели 1. Кривая 2 – интегральный радиационный поток в окружающую среду на правой границе I_{out}^+ . Цилиндрическая пористая среда.

излучение из-под поверхности пористого тела: $I_{\text{out}}^+ = I^+(r_1) = \beta \int_{r_0}^{r_1} \theta^4(\delta) \exp(-\beta(r_1 - \delta)) d\delta$, где r_0 и r_1 – границы цилиндрической пористой среды; $\beta = \mu l_{th}$ – безразмерный коэффициент поглощения излучения в среде, $\theta(x)$ – температура пористого тела. На рис. 5 построены зависимости мощности теплового излучения от скорости фильтрации для двух моделей и показано, что в случае учета радиационного теплопереноса поток излучения может быть в два раза выше, чем в случае традиционной модели.

В четвертой главе приведены результаты численного моделирования фильтрационного горения газов в цилиндрической пористой горелке и в областях, прилегающих к границам раздела с внешней средой. Задача описывается системой уравнений (1) – (5) и учитывает радиационный теплоперенос внутри пористой среды и тепловое излучение от внутренних слоев пористого тела во внешнюю среду. На рис. 6 изображена схема численного эксперимента. Область 2 $[r_{p0}, r_{p1}]$ заполнена пористым материалом. Области 1 $[r_0, r_{p0}]$ и 3 $[r_{p1}, r_1]$ заполнены газом. Подача свежей смеси осуществляется в область 1. Продукты горения покидают систему во внешнюю область 3.

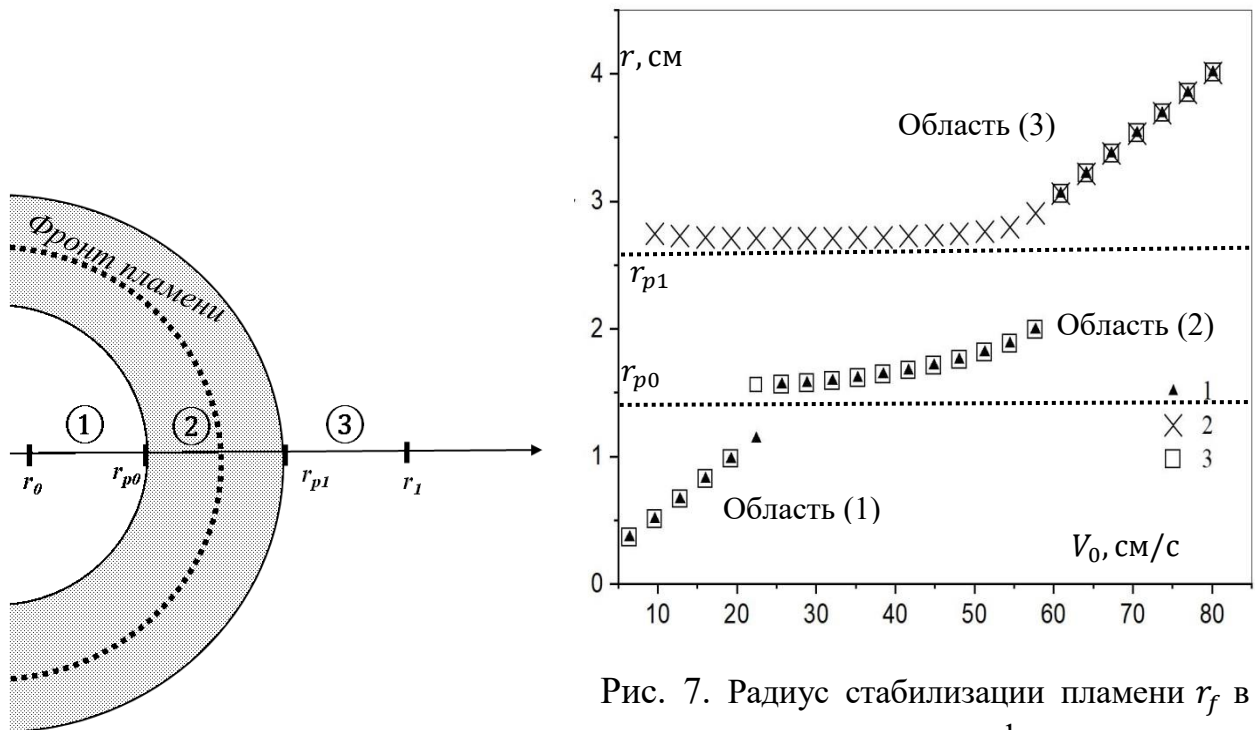


Рис. 6. Схема численного моделирования.

Рис. 7. Радиус стабилизации пламени r_f в зависимости от скорости фильтрации газа для разных начальных условий поджигания. Треугольники соответствуют условию поджигания (1), кресты – условию (2), квадраты – условию (3). $\Phi = 0.6$, $U_b = 10$ см/с, $T_b = 1481$ К.

Показано, что возможны два различных стационарных режима горения при одинаковых параметрах системы в зависимости от начальных условий зажигания свежей смеси. В первом случае зажигание газа осуществляется во внутренней полости горелки (область 1), во втором случае – во внешней среде (область 3). На рис. 7 построена зависимость радиуса стабилизации фронта пламени от скорости фильтрации газа. При одинаковых скоростях фильтрации газа, пламя может стабилизироваться снаружи пористого тела, в области 3, или во внутренней полости горелки, в области 1. Эти результаты находятся в качественном согласии с экспериментальными данными, известными из литературы². В экспериментальных исследованиях эти режимы горения получили названия «внутренний» и «внешний», когда пламя стабилизировано в области 1 или на внешней поверхности пористого тела r_{p1} соответственно. Численно показана возможность перехода от внешнего режима горения к внутреннему с внешней поверхности пористого конвертора r_{p1} на новый радиус $r < r_{p0}$ в случае изменения условия теплового баланса на внешней поверхности $r = r_{p1}$.

Условие теплового излучения с потоком энергии во внешнюю среду $I^+(r_{p1})$ изменяется на адиабатическое условие $d\theta/dr = dU_r/dr = 0$.

Излучательная эффективность преобразования тепла от сгорания газа в излучение рассчитывалась по формуле: $\eta = W_{\text{rad}}/W_{\text{ch}}$, где W_{rad} – полная мощность излучения от системы, а W_{ch} – химическая энергия свежей смеси газов. Зависимости эффективности излучения от расхода газа для двух режимов горения приведены на рис. 8. Показано, что максимальная эф-

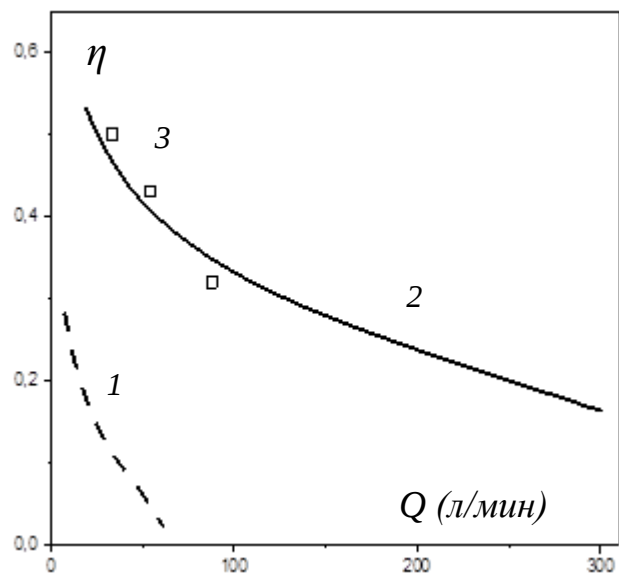


Рис. 8. Зависимость излучательной эффективности горелки η от расхода газа Q . Численное моделирование: пунктир 1 – внешний режим горения, сплошная линия 2 – внутренний режим горения. Экспериментальные данные из работы [3]: полые квадраты 3 – внешний режим горения. $\Phi = 0.7$.

² Fursenko R. et al. Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni–Al burners // International Journal of Heat and Mass Transfer. – 2016. – Vol. 98. – P. 277-284.

фективность достигается при малых расходах свежей смеси, когда пламя стабилизируется во внутренней части горелки. На рис. 8 представлены также результаты экспериментальных данных из работы Maznoy A. et al.³.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИИ

- 1) Предложена модель горения предварительно перемешанной смеси газов в расширяющемся микроканале, которая учитывает теплопотери в виде излучения от внутренних стенок канала.
 - а) Для трех различных составов смеси ($\Phi = 0.6, 0.8, 1.0$) показано существование оптимального значения расхода газа, для которого достигается максимум потока излучения во внешнюю среду.
 - б) Численный расчет демонстрирует, что мощность и эффективность теплового излучения от внутренних стенок канала может превышать тепловое излучение с внешней торцевой поверхности на выходе из канала более чем в два раза.
 - в) На основе формулы Планка показано, что максимум спектральной плотности излучения наблюдается в диапазоне длин волн от 2 до 5 мкм.
- 2) Предложена модель распространения и стабилизации волны фильтрационного горения в пористой среде с учетом радиационного теплопереноса и теплового излучения от внутренних слоев пористого тела во внешнюю среду. Выполнен сравнительный анализ результатов численного расчета в рамках предложенной модели и в рамках традиционной диффузионно-тепловой модели горения газов в пористой среде, которая не учитывает радиационный теплоперенос.
 - а) Показано, что радиационный теплообмен внутри пористой среды существенно влияет на характеристики пламени: температуру горения, нормальную скорость распространения фронта пламени. При учете радиационного теплопереноса общий поток излучения от внутренних слоев пористого тела во внешнюю среду выше более чем в 1.5 раза, по сравнению с тепловым излучением от внешней поверхности пористого конвертера, вычисленного по закону Стефана – Больцмана.

³ Maznoy A. et al. A study on the effects of porous structure on the environmental and radiative characteristics of cylindrical Ni–Al burners // Energy. – 2018. – Vol. 160. – P. 399-409.

- б) Показано, что температура газа на фронте химической реакции выше в 1.15 раза при учете радиационного теплообмена.
- 3) Выполнено численное исследование режимов стабилизации волны фильтрационного горения в цилиндрическом пористом конвертере с показателем пористости порядка $m = 0.7$, и в прилегающих областях. Моделирование выполнено с учетом радиационного теплопереноса внутри пористой среды и интегральных лучистых теплопотерь от внутренних слоев пористого тела во внешнюю среду. Полученные результаты качественно согласуются с экспериментальными исследованиями, известными из литературы ^{2,3}.
- а) Показано существование двух принципиально разных режимов горения при одинаковых значениях расхода газа. Пламя стабилизируется внутри пористого конвертера, в случае зажигания газа – во внутренней полости цилиндра. В случае зажигания пламени в окружающей среде, пламя стабилизируется на внешней поверхности пористого тела.
- б) Построены зависимости температуры пористого тела от расхода газа и от радиуса, и показано, что для внутреннего и внешнего режимов эти зависимости значительно различаются (более чем в два раза). Для внутреннего режима горения наблюдается монотонное убывание температуры стенки с увеличением радиуса, а для внешнего режима горения – монотонное возрастание температуры.
- в) Для внешнего режима горения показано существование максимального значения температуры внешней поверхности пористого тела при значениях расхода газа порядка 30 л/мин.
- г) Показано, что мощность теплового излучения и излучательная эффективность от пористого цилиндра значительно выше (более, чем в два раза) в случае внутреннего режима горения.
- д) Показана возможность перехода от внешнего режима горения к внутреннему в случае изменения условий теплового баланса на внешней поверхности пористого тела. Обратный переход не наблюдается.

Автор благодарен д.ф.-м.н. Р. В. Фурсенко за помощь в разработке численных алгоритмов, обсуждения математических моделей, а также к.ф.-м.н. Е. В. Серещенко, проф. В. К. Баяву, к.т.н. А. И. Кирдяшкину и к.ф.-м.н. А. В. Мазному за ценные замечания и обсуждения работ, вошедших в диссертацию.

Основное содержание диссертации отражено в следующих статьях в рецензируемых научных журналах из перечня ВАК:

1. Палесский Ф. С., Минаев С. С., Фурсенко Р. В., Баев В. К., Кирдяшкин А. И., Орловский В. М. Моделирование горения предварительно перемешанных смесей газов в расширяющемся канале с учетом радиационных теплотерь // Физика горения и взрыва. – 2012. – Т. 48. – № 1. – С. 21-27.
2. Палесский Ф. С., Фурсенко Р. В., Минаев С. С. Моделирование фильтрационного горения газов в цилиндрической пористой горелке с учетом радиационного теплообмена // Физика горения и взрыва. – 2014. – Т. 50. – №. 6. – С. 3-10.
3. Palesskiy F. S., Fursenko R. V., Minaev S. S. Numerical study of the heat radiation from the porous cylindrical burner with radiative heat exchange // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 553-558.
4. Kirdyashkin A. I., Guschin A. N., Maznoy A. S., Minaev S. S., Palesskiy F. S. Combustion-synthesized porous Ni–Al materials for radiative porous burners // Advanced Materials Research. – 2014. – Vol. 1040. – P. 442-447.
5. Palesskiy F. S. Numerical study of combustion regimes and heat radiation of cylindrical porous burner // Key Engineering Materials. – 2016. – Vol. 685. – P. 94-98.

Палесский Ф.С. Моделирование волн фильтрационного
горения в пористых средах с радиационным теплоперено-
сом: автореферат дисс. ... канд. физ.-мат. наук / ИТПМ СО
РАН. Новосибирск, 2019.

Ответственный за выпуск Ф. С.Палесский

Подписано в печать 20.06.2019
Формат бумаги 60×84/16, Усл. печ. л. 1.0,
Уч.-изд. л. 1.0, Тираж 100 экз., Заказ № 2

Отпечатано в типографии ООО «Параллель»
630090, Новосибирск, Институтская, 4/1