

Федеральное агентство научных организаций
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
НАУКИ ИНСТИТУТ ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ И ПРИКЛАДНОЙ МЕХАНИКИ
ИМ. С.А. ХРИСТИАНОВИЧА СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК
(ИТПМ СО РАН)

УДК 539.217.5

№ госрегистрации 01201351875

Инв. № 15/17

УТВЕРЖДАЮ

Директор ИТПМ СО РАН

чл.-корр. РАН



«29» декабря

А.Н. Шиплюк

2016 г.



ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

ФИЗИЧЕСКАЯ И ХИМИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ГАЗОВ С ПОРИСТЫМИ МАТЕРИАЛАМИ
(заключительный)

Номер проекта в ИСГЗ ФАНО 0323-2014-0018

Приоритетное направление III.23. Механика деформирования и разрушения материалов, сред, изделий, конструкций, сооружений и триботехнических систем при механических нагрузках, воздействии физических полей и химически активных сред

Программа ФНИ СО РАН III.23.4. Механика гетерогенных, композитных сред и технологии на их основе

Протокол Ученого совета ИТПМ СО РАН

№ 12 от 01.12.2016

Руководитель проекта
д.т.н.



В.А. Лебига

Новосибирск 2016

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ


Руководитель проекта:

Исполнительный директор МЦАИ Лебига Вадим Аксентьевич  (2.1; 2.2)

Исполнители:

Ведущий научный сотрудник Минаев Сергей Сергеевич  (2.2)

Старший научный сотрудник Верещагин Антон Сергеевич  (2.1)

Старший научный сотрудник Зиновьев Виталий Николаевич  (2.1)

Старший научный сотрудник Максимов Александр Ильич  (2.1)


Старший научный сотрудник Фурсенко Роман Викторович  (2.2)

Младший научный сотрудник Казанин Иван Викторович  (2.1)

Младший научный сотрудник Миронов Дмитрий Семенович  (2.1)

Младший научный сотрудник Пак Алексей Юрьевич  (2.1)

Младший научный сотрудник Палесский Федор Станиславович  (2.2)

Младший научный сотрудник Серещенко Евгений Викторович  (2.2)

Программист Одинцов Егор Сергеевич  (2.2)

РЕФЕРАТ.

Объем отчета: 29 стр., 13 иллюстраций, 2 таблицы.

Ключевые слова: микросферы, ценосферы, мембраны, проницаемость, гелий, разделение газов, мембранно-сорбционный метод, природный газ, горение предварительно перемешанных смесей, горение в неоднородных потоках, горение в пористой среде, математическое моделирование

Основной задачей исследования на 2016 год по извлечению гелия смесей газа, моделирующих природный газ, было решение проблемы объединения двух процессов, с одной стороны, обогащение гелием смеси газов, а с другой, – осушка смеси газов с целью повышения эффективности исследуемой технологии. Предложена математическая модель движения смеси газов через композитные сорбенты, предназначенные для одновременного выделения гелия из природного газа и его осушки. Впервые экспериментально исследованы характеристики композитных сорбентов, созданных на основе различных типов микросфер из натрийборсиликатного стекла и псевдобемита в качестве связующего, с целью возможного применения в мембранно-сорбционных технологиях выделения гелия из природного газа с его одновременной осушкой.

Исследование процессов горения предварительно перемешанных смесей газов в пористых средах представляет, как фундаментальный, так и практический интерес, в частности при разработке бытовых и промышленных нагревательных систем. Экспериментально и теоретически исследованы температурные и излучательные характеристики цилиндрических пористых горелок. Обнаружено, что при одних и тех же расходах, и составах свежей смеси возможна реализация одного из двух режимов горения: внешнего или внутреннего. Излучательная эффективность пористой горелочной системы при внутреннем режиме горения существенно больше, чем при внешнем и может достигать 50% при температуре пористого образца порядка 1500 С. Результаты численного моделирования находятся в хорошем согласии с экспериментальными данными и позволяют предсказать оптимальные значения параметров задачи для достижения максимальной эффективности системы.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	5
2. Основная часть	6
2.1. Исследования по выделению гелия	6
2.2. Численное исследование стационарных режимов горения газов внутри полой цилиндрической горелки и в прилегающих областях с учетом радиационного теплопереноса и лучистых теплопотерь	15
3. Заключение	25
4. Публикации	26
4.1. Основные	26
4.2. Дополнительные	26
4.3. Труды конференций и тезисы докладов	27
Приложение	29

ВВЕДЕНИЕ.

Настоящий отчет является заключительным по теме: "Физическая и химическая механика взаимодействия газов с пористыми материалами", по которой были представлены отчеты по этапам 2013, 2014, 2015 годов.

1. Основной задачей исследования на 2016 год по извлечению гелия смесей газа, моделирующих природный газ, было решение проблемы объединения двух процессов, с одной стороны, обогащение гелием смеси газов, а с другой, – осушка смеси газов с целью повышения эффективности исследуемой технологии. Предложена математическая модель движения смеси газов через композитные сорбенты, предназначенные для одновременного выделения гелия из природного газа и его осушки. Экспериментальная часть исследований включала определение характеристик композитных сорбентов, созданных на основе различных типов микросфер из натрийборсиликатного стекла и псевдобемита в качестве связующего, с целью возможного применения в мембранно-сорбционных технологиях выделения гелия из природного газа с его одновременной осушкой.

На предыдущих этапах исследований основное внимание уделялось определению сорбционных свойств различных микросферических материалов и разработка технологического процесса, моделирующего полупромышленные установки по извлечению гелия из природного газа.

2. Разработка высокоэффективных методов утилизации тепла от сгорания газообразных углеводородных топлив по-прежнему крайне актуальна. Метод фильтрационного горения обладает высокими экологическими характеристиками и простотой реализации технических устройств на его основе. Метод заключается в сжигании смеси воздуха и газообразного топлива внутри химически инертного пористого материала - конвертера. В процессе горения конвертер разогревается до температур порядка 1600 К и, как следствие, начинает излучать энергию с внешней поверхности. Данный метод преобразования химической энергии топлива в инфракрасное излучение требует использования конвертеров, изготовленных из материалов с уникальными высокотемпературными свойствами.

На предыдущих стадиях выполнения проекта температурные и излучательные характеристики цилиндрических пористых горелок исследовались экспериментально [см., также R. Fursenko, A. Maznou, E. Odintsov, A. Kirdyashkin, S. Minaev, S. Kumar, Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni-Al burners // International Journal of Heat and Mass Transfer, 2016, V. 98, pp. 277-284.]. Целью настоящего этапа, являлось построение математической модели и численное исследование процессов стабилизации пламени в таких системах. Представлены результаты численного моделирования режимов стабилизации пламени в цилиндрической пористой горелке с учетом радиационного теплообмена внутри горелки и в прилегающих областях.

2. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2.1. ИССЛЕДОВАНИЯ ПО ВЫДЕЛЕНИЮ ГЕЛИЯ

Экспериментальное оборудование и материалы

Для проведения экспериментов по исследованию гелиевой проницаемости различных типов сорбентов на основе полых микрочастиц по отношению к гелию, подготовлен специальный экспериментальный стенд, см. Рис. 1.1, оснащенный автоматизированной системой терморегулирования. Характеристики стенда позволяют проводить исследования с легкосыпучими типами сорбентов и получать кинетические кривые сорбции при давлениях до 10 атмосфер и температурах от 20 до 400 °С.

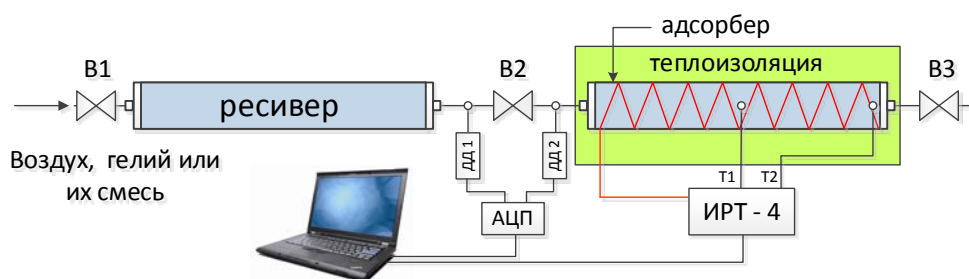


Рис. 1.1. Схема экспериментального стенда

Основу стенда составляют емкости ресивера и адсорбера, выполненные из нержавеющей стали и объемом $0,55 \cdot 10^{-3} \text{ м}^3$ каждая. В ресивере производится подготовка газовой смеси заданной концентрации. Давление в ресивере отслеживается датчиком давления ДД1. Ресивер соединен трассой через вентиль V2 с теплоизолированный адсорбером, заполняемым изучаемым сорбентом. Давление в адсорбере контролируется датчиком давления ДД2. Внутри адсорбера с торцов расположены фильтры, необходимые для предотвращения попадания исследуемых сыпучих сорбентов в подводящие трассы и запорно-измерительную аппаратуру. На внешней поверхности адсорбера расположены две термопары: T1 в центральной части емкости и T2 у торцевого фланца. Они позволяют контролировать температуру адсорбера. Нагрев адсорбера осуществляется с помощью омического ленточного нагревателя. Адсорбер с нагревателем и термопарами помещены в теплоизолированный контейнер, в качестве теплоизолятора используется базальтовое волокно. Электрический нагреватель через управляющее реле подключен к лабораторному автотрансформатору, который позволяет регулировать напряжение на нагревателе и соответственно интенсивность нагрева. Управляющее реле и термопары подключены к измерителю-регулятору температуры ИРТ-4, который позволяет поддерживать температуру в адсорбере равную заданному значению. Таким образом, нижний предел температуры сорбента возможный в данных экспериментах - это комнатная температура около 20°C. А верхнее ограничение определяется температурой

разрушения материала нетканых фильтров, установленных в текущий момент - 150°C.

В качестве исследуемого материала использовались синтетические полые микросферы типа МС-В-1Л из натрийборсиликатного стекла, произведенные в ОАО "НПО Стеклопластик". Исследование гранулометрического состава микросфер методом лазерной дифракции показало (Рис. 1.2), что распределение частиц по размерам для данного типа микросфер является мономодальным, размер частиц варьируется от 5 до 240 мкм с максимумом в районе 55–60 мкм. Одной из отличительных особенностей данного типа частиц, является фиксированная толщина стенки у всех частиц, что делает данный тип микросфер наиболее подходящим для проведения модельных экспериментов и исследований.

На Рис. 1.2а) представлено изображение микросфер МС-В-1Л, полученное с помощью электронного микроскопа. Частицы обладают практически идеальной сферической формой и имеют гладкую поверхность.. На изображении, Рис. 1.2б), видно, что некоторые частицы имеют поврежденную оболочку, что дает возможность видеть скол стенок микросфер. Как следует из Рис. 1.2в), толщина стенок составляет ~1 мкм и соответствует заявленной производителем (

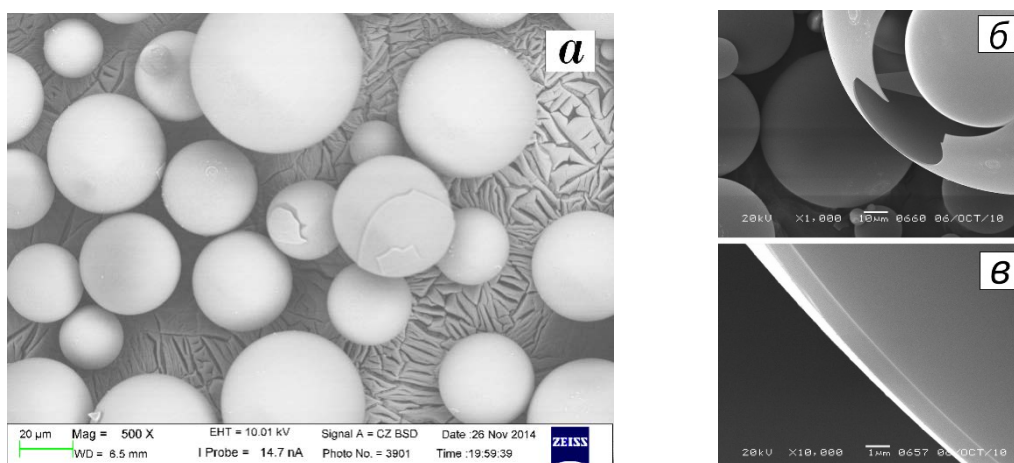


Рис. 1.2. Фотографии микросфер МС-В-1Л.

В ранее выполненных работах по данной теме не представлялось возможным определение коэффициента гелиевой проницаемости материала частиц в связи с неопределенностью поверхности диффузии и толщины стенки частиц. Вместо него авторами предлагалось определять удельную гелиевую проницаемость, из которой при определенных допущениях может быть оценен и коэффициент гелиевой проницаемости.

В данной работе было предложено использовать частицы с известными геометрическими размерами. Для этого была выделена узкая фракция микросфер типа МС-В-1Л диаметром от 50 до 63 микрон. Исходные микросферы были просеяны на анализаторе ситовом А30 производства ООО

«Вибротехник». Данный прибор представляет собой систему сит с ячейками различного размера, установленную на виброприводе.

Кроме того, данные микросферы, как указывалось выше, обладают фиксированной толщиной стенки. Всё выше обозначенное даёт возможность вычислять коэффициент гелиевой проницаемости материала частиц, что для данного типа микросфер МС-В-1Л было сделано впервые.

Испытание на герметичность

Первоначально на экспериментальном стенде были проведены эксперименты для проверки герметичности адсорбера и непроницаемости микросфер по отношению к воздуху в качестве рабочей среды. Эксперимент с воздухом проводился при начальном давлении в системе $\sim 0,8$ МПа и температурах 20°C и 50°C . На представлены графики изменения давления в емкости в зависимости от времени при двух значениях температуры. Из данных эксперимента видно, что давление, наблюдаемое в течение длительного промежутка времени, остается практически неизменным, а малые колебания давления при температуре 50°C связаны с особенностями работы системы терморегулирования. Это обстоятельство свидетельствует о том, что исследуемые микросферы являются непроницаемыми для воздуха и уплотнения адсорбера обеспечивают его достаточную герметичность.

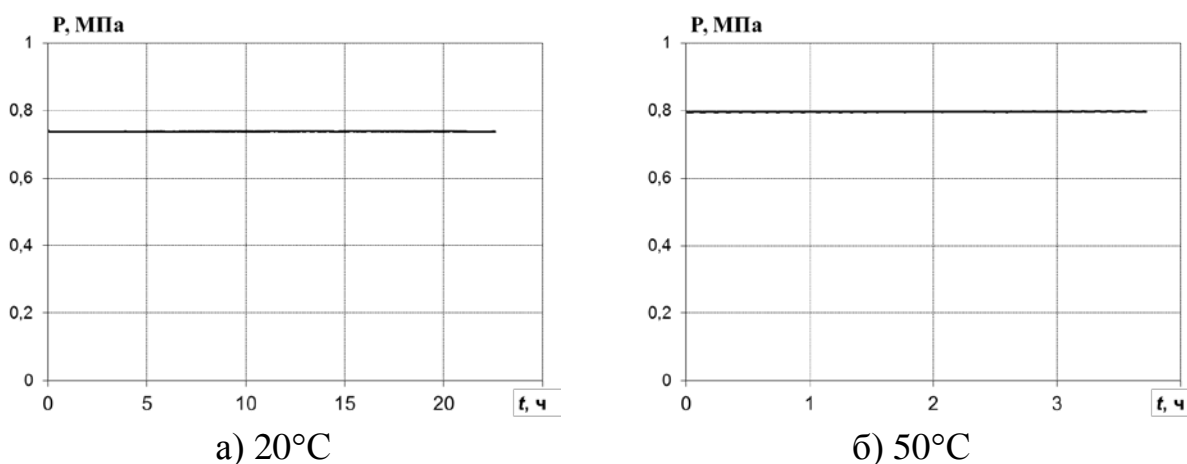


Рис. 1.3. Проверка на непроницаемость сорбента и герметичность адсорбера.

Кроме того, была произведена настройка системы терморегулирования, которой был дополнительно оснащён экспериментальный стенд специально для данного исследования. На приведен график зависимости температуры от времени при отладке системы и предварительном тестировании. При этом отклонение температуры от заданного значения, в рабочем режиме, не превышает половины градуса.

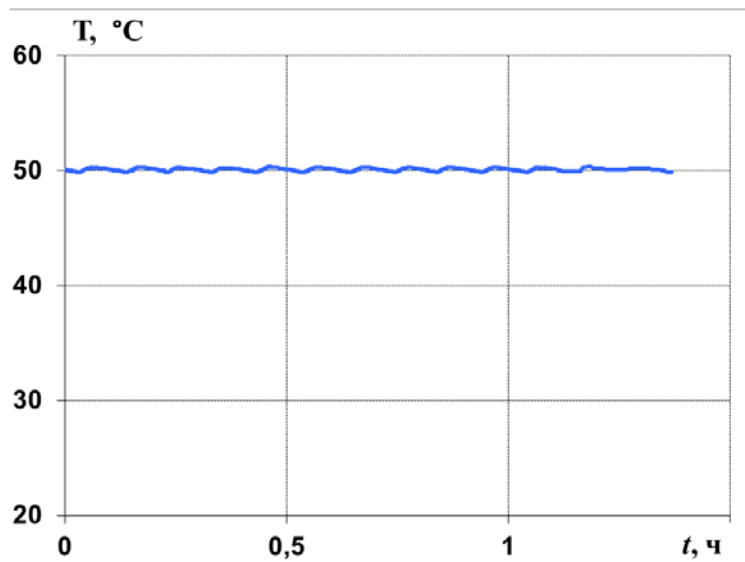


Рис. 1.4. Работа системы терморегулирования

Методика расчета гелиевой проницаемости и коэффициента гелиевой проницаемости полых микросферических частиц

Расчёт параметров, характеризующих проницаемость сорбента, основан на измерении падения давления во времени, которое происходит за счёт диффузии газа внутрь частиц.

Для количественного описания процесса проникновения газа внутрь частиц использовалось базовое уравнение диффузии газов сквозь мембрану:

$$J = \frac{dn}{dt} = \frac{KS}{d} m(P_{out} - P_{in}) = Q_{y\delta} m(P_{out} - P_{in}) \quad (1)$$

где: J – диффузионный поток, моль/с; n – количество вещества, моль; t – время, с; P_{out} – давление газа с наружной стороны мембраны, Па; P_{in} – давление газа с внутренней стороны мембраны, Па; m – масса сорбента, г; S – удельная поверхность диффузии, м²/г; d – толщина мембраны, м; $Q_{y\delta}$ – удельная проницаемость, моль/(с·г·Па); K – коэффициент проницаемости, моль/(м·с·г·Па).

Однако поскольку в качестве мембраны используются не плоские пластины с известными геометрическими размерами, а полые сферические частицы, обычно представляется затруднительным вычисление коэффициента проницаемости материала. Это происходит в связи с неопределенностью поверхности диффузии и толщины стенки микросфер. И обычно [9] из эксперимента для характеристики частиц определяется значение удельной проницаемости.

Но в данных экспериментах, благодаря выделению узкой фракции микросфер МС-В-1Л с постоянным значением толщины стенки, становится возможным прямое определение коэффициента проницаемости материала.

Аналитическое решение рассмотренного выше уравнения (1) с начальными условиями $\tau=0$, $P_{out}=P_0$, $P_{in}=0$ может быть получено в виде:

$$P_{out} = \frac{B}{A} + (P_0 - \frac{B}{A})e^{-At} \quad (2),$$

где P_0 – давление в адсорбере в начальный момент времени, A и B – параметры, связанные с удельной проницаемостью и внутренним объемом микросфер. Величины A , B и P_0 , определялись из трехпараметрической нелинейной регрессии с последующим вычислением величины удельной проницаемости:

$$Q_{y\partial} = (A - \frac{B}{P_0}) \frac{V_{св}}{mRT_0} \quad (3)$$

$$V_{in} = (\frac{AP_0}{B} - 1)V_{св}, \text{ м}^3 \quad (4)$$

$$K = \frac{Q_{y\partial} \cdot d}{S}, \frac{\text{моль}}{\text{м} \cdot \text{с} \cdot \text{г} \cdot \text{Па}}, \quad (5)$$

где $V_{св}$ – свободный от микросфер объем адсорбера, м^3 ; R – универсальная газовая постоянная; T_0 – температура газа.

Определение коэффициента гелиевой проницаемости

В экспериментах по определению коэффициента гелиевой проницаемости микросфер в адсорбер подавался чистый гелий. Эксперименты проводились для ряда температур, в диапазоне от 20 до 110°C, продолжительность каждого по времени эксперимента составляла около 100 часов.

В результате проведения экспериментов были получены сорбционные кривые при различных температурах. На представлены графики изменения давления гелия в адсорбере от времени, полученные при различных температурах. Из графиков видно, что давление монотонно убывает с течением времени. Данный эффект связан с поглощением гелия микросферами. При этом темпы сорбции падают с течением времени. Это происходит в связи с уменьшением перепада парциального давления гелия снаружи и внутри микросфер. В итоге давление на графике стремится к некоторому определенному равновесному значению, при котором давление внутри и снаружи частиц выравнивается.

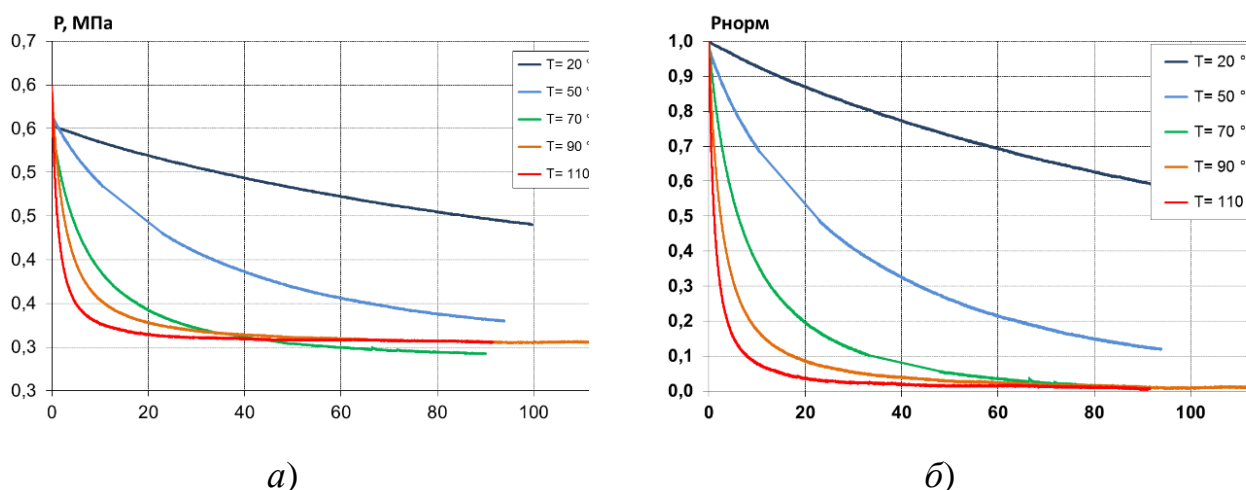


Рис. 1.5. Изменение давления в адсорбере при различных температурах в размерном (а) и нормированном (б) виде.

Также следует отметить существенное изменение темпов сорбции с увеличением температуры.

Полученные экспериментальные кинетические кривые () были аппроксимированы по приведенной выше методике, после чего для каждого случая были определены удельная гелиевая проницаемость и коэффициент гелиевой проницаемости, значения которых приведены в таблице 1.

Таблица 1. Удельная проницаемости и коэффициент проницаемости

$T, ^\circ\text{C}$	$Q_{\text{уд}}, \text{ моль}/(\text{Па}\cdot\text{с}\cdot\text{г})$	$K, \text{ моль}/(\text{м}\cdot\text{с}\cdot\text{г}\cdot\text{Па})$
20	1,57E-15	3,77E-21
50	6,58E-15	1,44E-20
70	2,29E-14	4,69E-20
90	5,41E-14	1,05E-19
110	1,36E-13	2,51E-19

Из видно, что зависимость коэффициента гелиевой проницаемости от температуры хорошо аппроксимируется экспоненциальной зависимостью. Полученные данные зависимости коэффициента гелиевой проницаемости от температуры позволяют вычислить энергию активации для исследуемого типа микрочастиц.

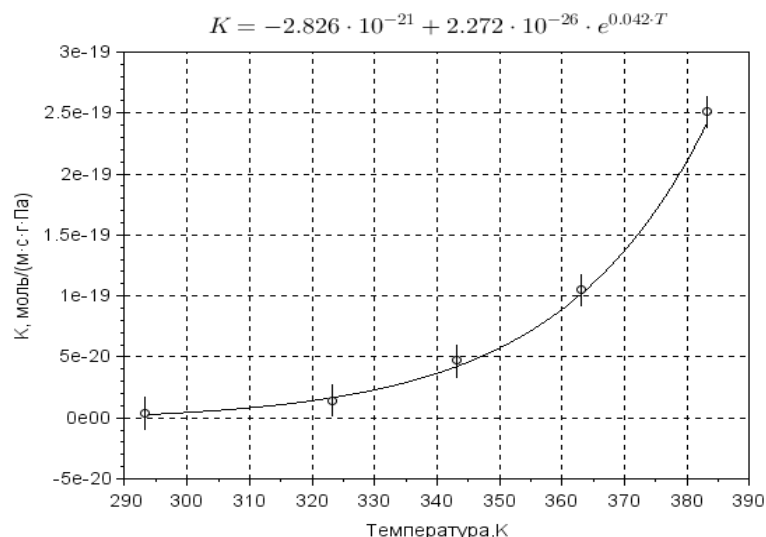


Рис. 1.6. Зависимость коэффициента проницаемости от температуры.

В ходе исследований была отработана методика проведения эксперимента и обработки экспериментальных данных с целью получения параметров гелиевой проницаемости исследуемых типов сорбентов. Для микросфер МС-В-1Л 50-63 мкм, получены сорбционные кривые при температурах от 20 до 110 °С (Рис. 1.2), вычислены значения удельной гелиевой проницаемости $1,5 \cdot 10^{-15} \div 7,8 \cdot 10^{-14}$ моль/(Па·с·г) и коэффициента гелиевой проницаемости материала частиц $3,5 \cdot 10^{-21} \div 1,9 \cdot 10^{-19}$ моль/(м·с·г·Па) соответственно. При увеличении температуры с 20 до 110 °С наблюдается увеличение темпов исследуемых процессов сорбции более чем в 50 раз.

Исследование композитных сорбентов на базе различных исходных полых микрочастиц по отношению к гелию

Совместно с Институтом проблем переработки углеводородов СО РАН (г. Омск) были изготовлены образцы композитных сорбентов на базе различных полых микрочастиц. Связующим материалом служил – гидроксид алюминия ($Al(OH)_3$), который после прокаливания переходит в гамма оксид алюминия, $\gamma-Al_2O_3$. Так же предварительно был исследован образец композитного сорбента с другим типом связующего материала и повышенной массовой долей содержания микрочастиц.

Были изготовлены следующие образцы композитных сорбентов: 1- композитный сорбент на базе микросфер МС-В-1Л 15%масс.; 2 - композитный сорбент на базе ценосфер НМР-5А 15%масс.; 3 - композитный сорбент на базе микросфер МС-ВП-А9 5гр. 15%масс.; 4 - композитный сорбент на базе кремнеземных микросфер. 15%масс.; 5 - композитный сорбент на базе микросфер МС-ВП-А9 5гр. 22%масс.(использовался другой тип связующего). На представлены фотографии образцов композитных сорбентов.



Рис. 1.7. Фотографии образцов композитных сорбентов на базе различных исходных полых микрочастиц.

Были проведены эксперименты по сорбции и десорбции гелия указанными выше типами сорбентов, в основном, для чистого гелия и с воздушно-гелиевой смесью, при различных начальных рабочих давлениях рабочего газа в адсорбере. Проведенные исследования процессов сорбции и десорбции гелия композитными сорбентами на основе псевдобемита и различных типов микросфер из натрийборсиликатного стекла продемонстрировали непроницаемость данного сорбента для воздуха, метана и проницаемость для гелия. При этом, для микросфер МС-В-1Л и МС-ВП-А9 отмечено существенное увеличение темпов процессов поглощения, почти на два порядка по сравнению с исходными микросферами. Для кремнезёмных микросфер, которые обладают наиболее высоким коэффициентом гелиевой проницаемости, темпы исследуемых процессов остались на прежних высоких уровнях. Противоположные результаты получены для композитного сорбента на базе ценосфер, после гранулирования отмечено существенное ухудшение характеристик по сравнению с исходными ценосферами, что наиболее вероятно связано с взаимодействием материала частиц и связующего в процессе гранулирования, так как оба компонента содержат большое количество оксида алюминия в своем составе.

На . представлены характерные кривые изменения текущего давления в адсорбере при процессах сорбции и десорбции (для случая чистого гелия в качестве рабочего газа) различными образцами композитных сорбентов.

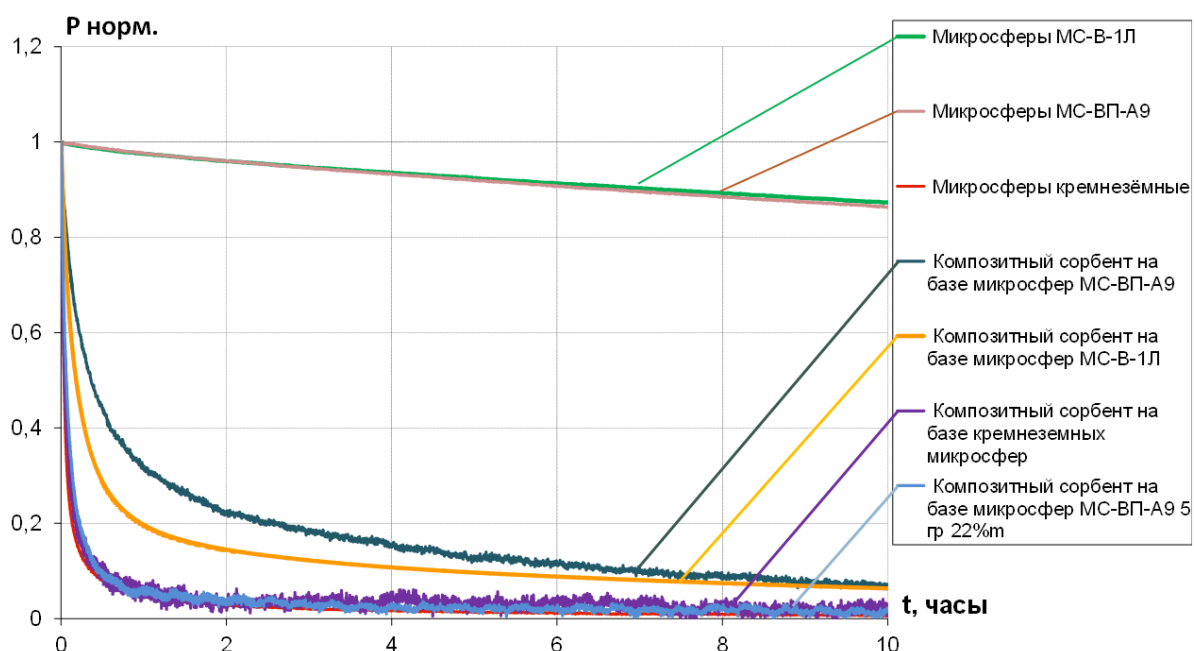


Рис. 8.Изменение давления в адсорбере при процессах сорбции, для различных типов сорбентов, в нормированном виде.

Исходя из полученных данных, следует отметить высокое влияние материала связующего на проницаемость композитного сорбента, что наглядно видно из данных по композитному сорбенту на базе микросфер МС-ВП-А9 с различным связующим.

На основе полученных экспериментальных данных, были рассчитаны коэффициенты гелиевой проницаемости исследуемых образцов композитных сорбентов, которые приведены в таблице 2.

Таблица 2.

Сорбент	масса сорбента, г	Q , (моль/Па·с)	$Q_{уд}$, (моль/Па·с·г)
Микросферы МС-В-1Л	109	$2,1 \cdot 10^{-13}$	$1,9 \cdot 10^{-15}$
Композитный сорбент	198	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$6,4 \cdot 10^{-14}$
Микросферы МС-ВП-А9	114	$2,3 \cdot 10^{-13}$	$2,1 \cdot 10^{-15}$
Композитный сорбент	249	$1,3 \cdot 10^{-11}$	$5,2 \cdot 10^{-14}$
Микросферы SiO ₂	110	$4,5 \cdot 10^{-10}$	$4,1 \cdot 10^{-12}$
Композитный сорбент	233	$3,4 \cdot 10^{-11}$	$1,4 \cdot 10^{-13}$
Ценосферы НМ-R-5A-0.16	236	$7,8 \cdot 10^{-12}$	$3,3 \cdot 10^{-14}$

2.2. ЧИСЛЕННОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ СТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМОВ ГОРЕНИЯ ГАЗОВ ВНУТРИ ПОЛОЙ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ГОРЕЛКИ И В ПРИЛЕГАЮЩИХ ОБЛАСТЯХ С УЧЕТОМ РАДИАЦИОННОГО ТЕПЛОПЕРЕНОСА И ЛУЧИСТЫХ ТЕПЛОПОТЕРЬ

Математическая модель

Для описания основных особенностей горения в рассматриваемых цилиндрических пористых горелках использовалась редуцированная модель, описанная ниже. Схема численного эксперимента изображена на Рис. 2.1. Пористая горелка представляет собой полый цилиндр с внутренним радиусом r_{p0} и внешним радиусом r_{p1} . Предварительно перемешанная горючая смесь подается во внутреннюю область цилиндрической горелки, которой соответствует диапазон $[r_0, r_1]$. Продукты горения и теплопотери в виде излучения покидают горелку во внешнюю среду, которой соответствует диапазон $[r_{p1}, r_0]$.

Задача горения газов в цилиндрической пористой горелке была решена в рамках одномерной двухтемпературной термодиффузионной модели. Данная модель предполагает постоянство плотности, давления, коэффициентов диффузии и теплопроводности газа. В рамках указанных допущений, модель включает в себя только уравнения сохранения энергии в газе и пористом каркасе и закон сохранения массы недостающего компонента свежей смеси. Помимо кондуктивного теплообмена, учитывался радиационный теплообмен внутри пористого тела. Механизм лучистого теплообмена внутри пористой горелки описывался уравнением переноса излучения в рамках приближения Эддингтона. Безразмерные стационарные уравнения, описывающие перенос тепла по газу и по твёрдому телу, уравнение на концентрацию горючего и уравнение переноса излучения могут быть записаны в следующем безразмерном виде:

$$V(r) \frac{dT}{dr} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) - \Omega_g (T - \Theta) + (1 - \sigma) W(T, C) \quad (1)$$

$$\frac{k}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{d\Theta}{dr} \right) + \Omega_s (T - \Theta) + \Omega_r (U_r - 2\Theta^4) = 0 \quad (2)$$

$$V(r) \frac{dC}{dr} = \frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dC}{dr} \right) - W(T, C) \quad (3)$$

$$\frac{1}{r} \frac{d}{dr} \left(r \frac{dU_r}{dr} \right) = \mu^2 (U_r - 2\Theta^4) \quad (4)$$

где r - безразмерная пространственная координата, измеряемая в единицах тепловой толщины $l_{th} = \lambda_g / (\rho_g c_{pg} U_b)$; U_b - адиабатическая скорость горения ламинарного плоского пламени. Индексы «g» и «s» относятся к газу и твёрдой фазе, соответственно. Концентрация недостающего компонента смеси C измеряется в единицах Y_0 - массовой доли горючего в свежей смеси. Температура стенок канала Θ и газа T измеряются в единицах адиабатической температуры горения T_b ; $\sigma = T_0 / T_b$ - безразмерная начальная температура газа. Величина U_r пропорциональна плотности теплового излучения и измеряется в единицах $\sigma_{sb} T_b^4$, где σ_{sb} - постоянная Стефана-Больцмана. Считается, что расходование недостающего компонента горючей смеси и тепловыделение

происходит в ходе одноступенчатой необратимой химической реакции, имеющий вид: $W(T, C) = KC \cdot \exp(N(1 - 1/T))$. Здесь: $N = E/(RT_b)$, где R - универсальная газовая постоянная, E - энергия активации, K - предэкспонент. Такая приближенная запись скорости химической реакции обеспечивает хорошее согласие численных и экспериментальных результатов по измерению нормальной скорости плоского адиабатического пламени в диапазоне коэффициентов избытка топлива $0.56 < \Phi < 0.8$, соответствующем относительно бедным метано-воздушным смесям. Скорость потока газа V измеряется в единицах адиабатической скорости распространения пламени U_b и зависит от пространственной координаты следующим образом: $V(r) = V_0 r_0 / (rm)$, где $V_0 = V(r_0)$ - входная начальная безразмерная скорость смеси. Это соотношение описывает изменение скорости газа в цилиндрической горелке и следует из уравнения сохранения массы в приближении постоянной плотности газа. $Le = \lambda_g / (\rho_g c_{pg} D)$ - число Льюиса; $k = \lambda_s \rho_g c_{pg} / (\lambda_g \rho_s c_{ps})$ - отношение коэффициентов температуропроводности твёрдой и газовой фаз. Безразмерные параметры теплообмена: $\Omega_g = 2Nu/Pe^2$ и $\Omega_s = \omega \Omega_g$, где $\omega = d_p \rho_g c_{pg} / (d_s \rho_s c_{ps})$ связаны с числом Пекле $Pe = U_b d_p \rho_g c_{pg} / \lambda_g$ и числом Нуссельта $Nu = \alpha d_p / \lambda_g$, где α - коэффициент Ньютоновского теплообмена, d_p - средний размер межпорового пространства, d_s - средний размер элементов пористой структуры, m - пористость. В работе полагалось: $d_p = 2.7 \text{ mm}$, $d_s = 0 \text{ mm}$, $m = 1$ в диапазоне $[r_0, r_{p0}]$; $d_p = 1.7 \text{ mm}$, $d_s = 1 \text{ mm}$, $m = 0.63$ в диапазоне $[r_{p0}, r_{p1}]$; $d_p = 2.7 \text{ mm}$, $d_s = 0$, $m = 1$ в диапазоне $[r_{p1}, r_0]$. В работе рассматривается случай $Nu = 4$. Для горючей смеси газов были использованы следующие параметры: $\Phi = 0.6$, $U_b = 10 \text{ cm/sec}$, $T_b = 1481 \text{ K}$, которые соответствуют бедной метано-воздушной смеси. Коэффициент Ω_r , отвечает за процесс прогрева стенки за счёт переноса теплового излучения и имеет вид $\Omega_r = \mu \sigma_{sb} T_b^3 / (\rho_s c_{ps} U_b)$. Здесь: μ - коэффициент поглощения излучения в пористой среде, который был аппроксимирован следующим образом: $\mu = (1 - m) / (d_s + d_p)$. В модели пренебрегалось излучением газа из-за доминирующего содержания N_2 в бедной метано-воздушной газовой смеси. Эмиссионные характеристики N_2 пренебрежительно малы в сравнении с излучательной способностью твёрдого тела.

Для системы уравнений (1)-(4) использовались следующие граничные условия на входе и выходе из горелки:

$$\text{На входе } (r_0): \quad T(r_0) = \sigma; C(r_0) = 1; \Theta(r_0) = \sigma; U_r(r_0) = 2\sigma^4 \quad (5)$$

$$\text{На выходе } (r_1): \quad \frac{dT}{dr}(r_1) = 0; \frac{dC}{dr}(r_1) = 0 \quad (6)$$

На внешней поверхности пористого тела (r_{p1})

$$U(r_{p1}) = J^+(r_{p1}) + \sigma^4; \frac{d\Theta}{dr}(r_{p1}) = -\frac{\Omega_r}{k} J^+(r_{p1}) + a\sigma^4 \quad (7)$$

Здесь: $J^+(r_{p1}) = \mu \int_{r_{p0}}^{r_{p1}} \Theta^4(\xi) \exp(-\mu(r_{p1} - \xi)) d\xi$ - интегральный поток

излучения из горелки во внешнюю среду на правой границе, $a = \mu \sigma_{sb} T_b^3 l_{th} / \lambda_s$. Граничные условия на температуру стенки Θ и на излучение U_r в точке r_{p1}

были выведены из соображений сохранения теплового баланса на поверхности горелки.

Следует отметить, что в рамках одномерной модели (1)-(7) не учитываются эффекты, связанные с реальной двумерной осесимметричной геометрией пористых горелок, исследуемых экспериментально. Кроме того, модель (1)-(7) позволяет исследовать только горение бедных смесей, в то время как большая часть экспериментальных результатов получена для стехиометрических метано-воздушных смесей. Несмотря на это, как будет показано ниже, предложенная модель позволяет описать многие особенности горения в рассматриваемой системе на качественном уровне и предоставить физическую трактовку экспериментальных результатов.

Для численного моделирования была использована конечно-разностная схема 2ого порядка точности по пространству. Для поиска стационарных решений применялся итерационный метод. Для скорости фильтрации свежей смеси $V(r_0) = 5U_b$, сходимость схемы была исследована на наборе сеток с количеством узлов последовательно увеличивающимся от 500 до 40000. Для сеток с количеством узлов, лежащих в диапазоне от 20000 до 40000, отличие в положении фронта пламени составляло не более 0.03%, поэтому все дальнейшие расчеты проводились на сетке с разрешением 20000 узлов.

Результаты численного моделирования

Начальное приближение для итерационного решения системы уравнений (1)-(7) задавалось в виде:

$$T^0(x) = \begin{cases} \sigma, & r_0 \leq r \leq r_{f0} \\ T_b, & r_{f0} \leq r \leq r_1 \end{cases}, C^0(x) = \begin{cases} 1, & r_0 \leq r \leq r_{f0} \\ 0, & r_{f0} \leq r \leq r_1 \end{cases}, \quad (8)$$

С физической точки зрения, r_{f0} в выражениях (9) может рассматриваться как параметр, характеризующий место поджигания горючей смеси. Случай $r_{f0} <$

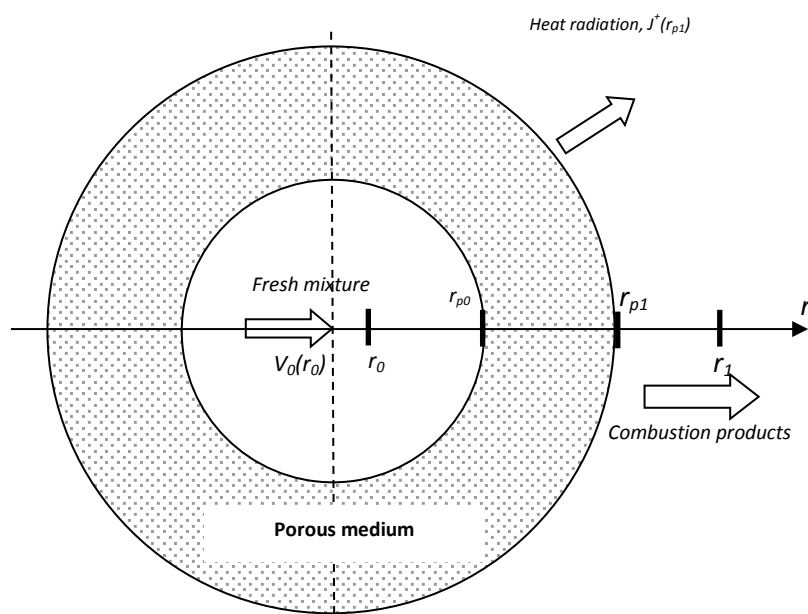


Рис. 2.1. Схема фильтрационного горения в цилиндрической пористой горелке.

r_{p0} (см. Рис. 2.1) соответствует инициации пламени во внутренней полости пористой горелки. При $r_{f0} > r_{p1}$ воспламенение происходит в пространстве, окружающем пористый цилиндр. Начальное приближение для температуры пористого каркаса $\theta^0(r)$ задавалось в виде $\theta^0(r) = \sigma$ либо $\theta^0(r) = 1$. Первый случай соответствует инициации пламени вблизи пористого тела, температура которого равна температуре окружающей среды. Во втором случае, предполагается, что пористая среда была предварительно нагрета до температуры, равной адиабатической температуре плоского пламени. В работе были рассмотрены три различных варианта начальных приближений:

- 1) Условие 1 соответствует инициации пламени во внутренней полости пористой цилиндрической горелки:

$$r_{f0} = 0.5 \cdot r_{p0}, \theta^0(r) = \sigma$$

- 2) Условие 2 соответствует инициации пламени в свободном пространстве, окружающем пористую оболочку:

$$r_{f0} = 1.25 \cdot r_{p1}, \theta^0(r) = \sigma$$

- 3) Условие 3 соответствует инициации пламени в свободном пространстве, окружающем пористую оболочку, при этом пористое тело предварительно нагрето:

$$r_{f0} = 1.25 \cdot r_{p1}, \theta^0(r) = 1$$

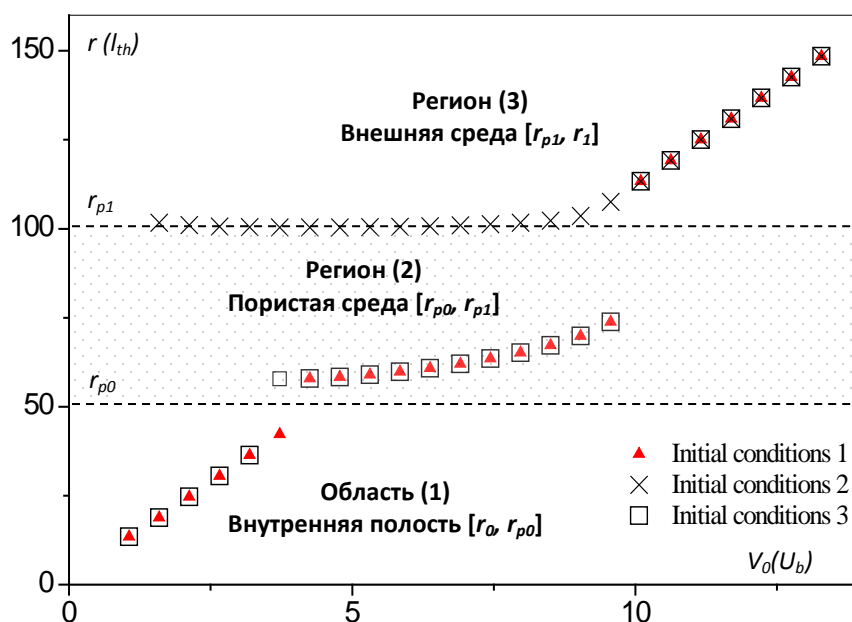


Рис. 2.2. Радиус стабилизации пламени в зависимости от скорости фильтрации газа для разных начальных условий поджигания. Использованы следующие параметры: $\Phi=0.6$, $U_b=10\text{cm/sec}$, $T_b=1481\text{K}$.

На Рис. 2.2 приведены зависимости положения фронта пламени от расхода горючей смеси, рассчитанные при различных начальных условиях. Кривая, обозначенная треугольными маркерами, рассчитана для начального приближения 1, соответствующего случаю инициации пламени внутри

пористой оболочки. Как видно из Рис. 2.2, при относительно малых значениях расхода смеси пламя стабилизируется в свободном пространстве вблизи внутренней границы пористой среды $r = r_{p0}$. При этом радиус пламени линейно возрастает с ростом расхода горючей смеси (область (1) на Рис. 2.2) и приближается к границе раздела свободного пространства и пространства, заполненного пористой средой. Распределение температуры газа и пористого каркаса, а также концентрации горючего, характерные для диапазона скоростей свежей смеси от 1 до $4.5 U_b$ (область (1) на Рис. 2.2) представлены на Рис. 2.3а. Температура твердой фазы достигает максимума на внутренней границе пористой оболочки и монотонно убывает с ростом радиуса. Таким образом, можно заключить, что в диапазоне относительно малых расходов горючей смеси численные результаты описывают "внутренний" режим горения, наблюдавшийся в экспериментальных исследованиях при инициации пламени внутри пористой оболочки. Характерной особенностью этого режима горения являлось монотонное убывание температуры пористого каркаса с ростом радиуса.

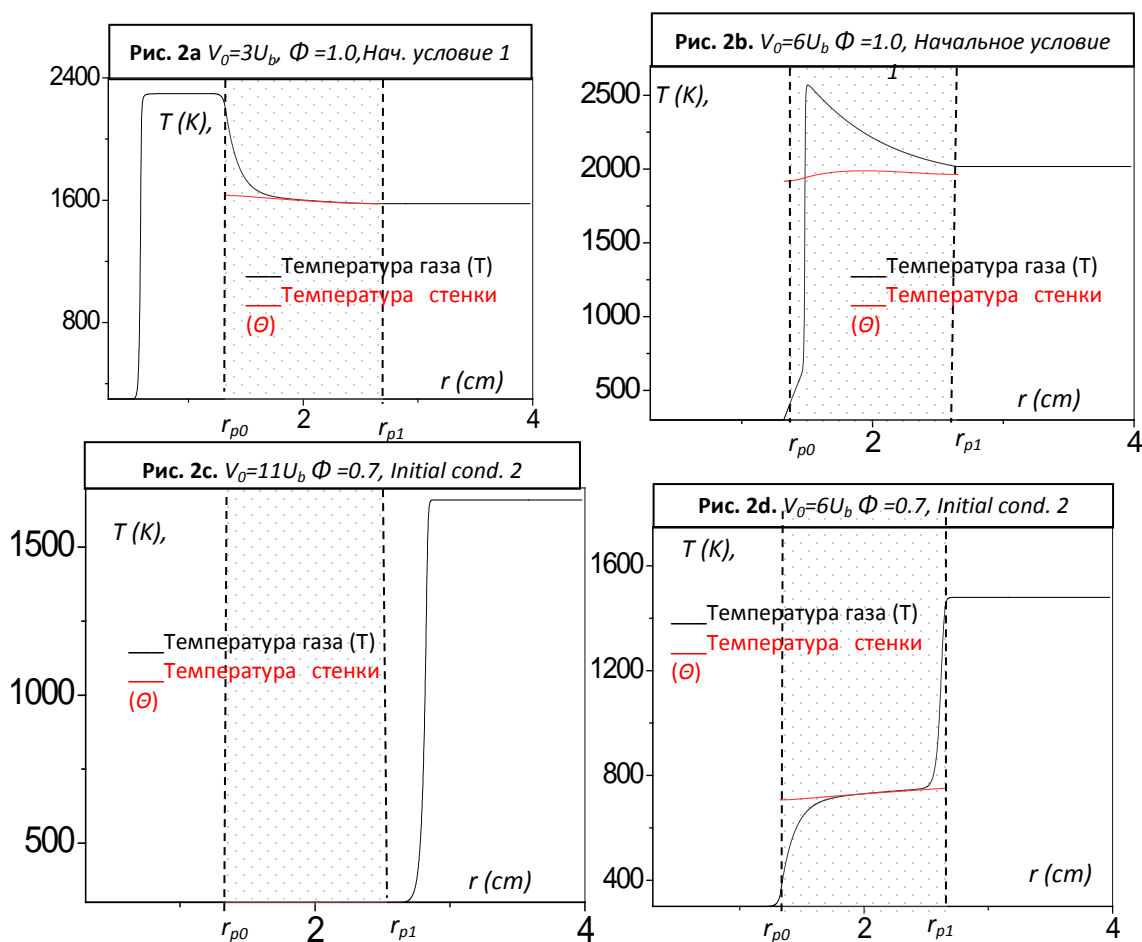


Рис. 2.3. Температура газа T (черная линия), температура стенки Θ (красная линия) в зависимости от радиуса при различных начальных условиях поджигания, и различных значениях коэффициента избытка горючего Φ и скорости фильтрации газа U_b .

С дальнейшим увеличением расхода смеси пламя заходит внутрь пористой среды и в диапазоне скоростей свежей смеси от 4.5 до $10 U_b$ наблюдается стабилизация пламени внутри пористого каркаса (область (2) на Рис. 2.2). При этом, как показано на Рис.3b, максимум температуры твердой фазы достигается в области, заполненной пористой средой. В рассматриваемом диапазоне расходов скорость потока свежей смеси на фронте пламени существенно (более чем в 2 раза) превышает нормальную скорость распространения плоского адиабатического пламени. В таких условиях возможность стабилизации волны горения внутри пористой среды обеспечивается рециркуляцией тепла от продуктов сгорания в свежую смесь посредством теплопередачи вдоль элементов пористого каркаса. Как видно из Рис. 2.3b, нагрев пористой среды и перенос тепла вверх по потоку за счет теплопроводности твердой фазы приводит к предварительному нагреву газа перед фронтом пламени за счет теплообмена между твердой и газовой фазами. В результате смесь поступает в зону реакции с повышенной начальной температурой, что приводит к достижению сверхадиабатической температуры пламени, увеличению его нормальной скорости и, как следствие, к возможности стабилизации при высоких значениях скорости потока свежей смеси на фронте волны горения. С увеличением расхода смеси радиус пламени возрастает, приближаясь к внешней границе пористой среды $r = r_{p1}$, при этом величина предподогрева свежей смеси уменьшается из-за влияния радиационных теплопотерь с внешней поверхности горелки. При $V_0 > 10 U_b$ стабилизация пламени внутри пористого тела становится невозможна, поскольку скорость потока смеси на фронте пламени становится больше нормальной скорости неадиабатического пламени, и волна горения стабилизируется у внешней границы пористой оболочки (область (3) на Рис. 2.2). В этом случае тепловое взаимодействие между газовой и твердой фазами мало, максимальная температура пористой среды близка к σ и тепловая рециркуляция практически отсутствует (см. Рис. 2.3c). Таким образом, при больших значениях скорости свежей смеси, поведение пламени близко к поведению цилиндрического пламени с радиальной подачей свежей смеси в свободном пространстве. Характерная для такого пламени линейная зависимость радиуса фронта от расхода смеси наблюдается в области (3) на Рис. 2.2. При этом скорость потока горючей смеси на фронте пламени $U_f = Q/r_f$ равна скорости распространения плоского адиабатического пламени U_b .

Решения, полученные при начальном приближении 2, соответствующем инициации пламени в свободном пространстве, окружающем пористую оболочку (крестики на Рис. 2.2), и при начальном приближении 1 (треугольники на Рис. 2.2) совпадают при больших значениях расхода свежей смеси (область (3) на Рис. 2.2). В диапазоне малых и умеренных расходов существует два различных стационарных решения при одних и тех же параметрах задачи (области (1) и (2) на Рис. 2.2). Какое из двух решений будет найдено при численном моделировании задачи (1)-(7) зависит от используемого в расчетах начального приближения. В случае приближения 1 пламя стабилизируется во внутренней полости горелки либо в области заполненной

пористой средой, как это было описано выше. Этот режим горения соответствует обычному устойчивому цилиндрическому пламени в пористой среде. В случае приближения 2 пламя стабилизируется вблизи внешней поверхности пористой оболочки. Характерное для этого случая распределение температуры твердой и газовой фазы представлены на Рис. 2.3d. Это решение соответствует "внешнему" режиму горения, который наблюдается в экспериментах при условии внешнего поджига горючей смеси. Численные результаты свидетельствуют о том, что температура внешней поверхности горелки при "внутреннем" режиме горения превосходит таковую при "внешнем" режиме. Устойчивость "внешнего" режима горения относительно малых возмущений может быть показана на основании следующих рассуждений. На фронте пламени $r = r_f$ скорость потока свежей смеси $U_f = Q/r_f$ равна нормальной скорости распространения неадиабатического пламени $U_n(T_f)$, которая зависит от температуры на фронте пламени T_f и является монотонно возрастающей функцией от T_f . Как следует из Рис. 2.3d при "внешнем" режиме горения максимальное значение температуры твердой фазы достигается на внешней поверхности пористой оболочки. Мысленно сдвинем фронт пламени на небольшое расстояние вглубь пористой среды в положение $r = r_{f1} < r_{p1}$. Поскольку, температура пористого каркаса в точке $r = r_{f1}$, меньше чем при $r = r_f$ поток тепла из зоны химической реакции в пористую среду возрастает, что приводит к уменьшению температуры T_f на фронте пламени в результате чего уменьшается и нормальная скорость пламени $U_n(T_f)$. Учитывая, что скорость потока свежей смеси $U_f = Q/r_f$ в точке $r = r_{f1} < r_f$ больше чем в точке $r = r_f$ получим $U_f(r_{f1}) > U_n(T_f(r_{f1}))$ и, следовательно, для достижения баланса между нормальной скоростью пламени и скоростью потока смеси, пламя будет вынуждено сдвинуться обратно в положение $r = r_f$. Если в результате малого возмущения фронт пламени переместился в точку $r = r_{f1} > r_f$ температура $T_f(r_{f1})$ будет не меньше чем $T_f(r_f)$, а скорость потока свежей смеси $U_f(r_{f1}) < U_f(r_f)$, откуда, аналогично предыдущему, можно заключить, что после возмущения пламя будет иметь тенденцию к возвращению в начальное, невозмущенное положение.

Помимо описанных выше результатов, на Рис. 2.2 приведена кривая $r_f(V_0)$, полученная для начального приближения 3 (полые квадратики на Рис. 2.2), которое соответствует внешнему поджигу горючей смеси вблизи предварительно нагретой пористой среды. Как видно из Рис. 2.2 это решение совпадает с решением, описывающим "внутренний" режим горения при малых и средних значениях расхода свежей смеси (красные треугольники на Рис. 2.2). Этот результат находится в хорошем согласии с экспериментальными данными, которые описаны в предыдущем разделе, и свидетельствуют о том, что подогрев пористого каркаса и/или уменьшение радиационных теплопотерь от пористой горелки могут приводить к переходу от "внешнего" режима горения к "внутреннему".

Рис 4а. Численное моделирование.

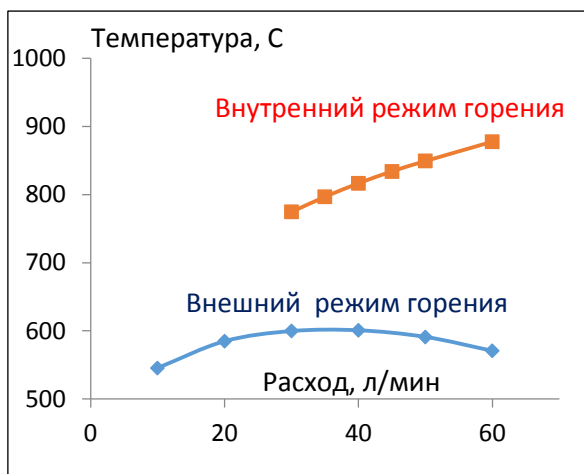


Рис 4б. Эксперимент.

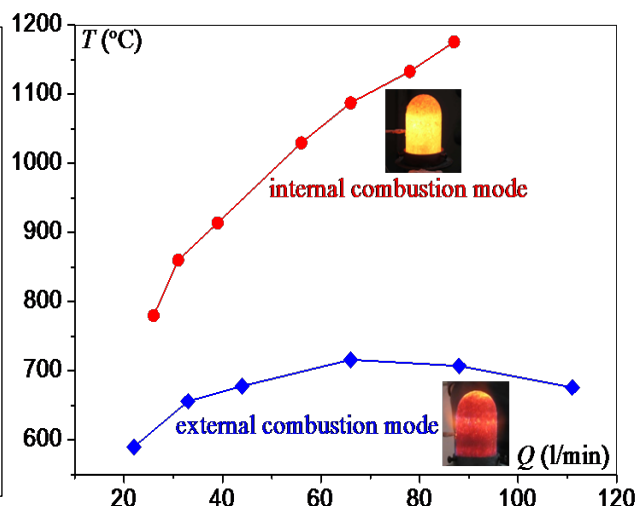


Рис. 2.4. Зависимость температуры стенки на внешней границе раздела пористого тела с внешней средой для внутреннего (красные точки) и внешнего (синие точки) режимов горения. Рис. 4а - численное моделирование. Рис 4б - экспериментальные данные.

Следует особо отметить, что численное моделирование позволяет изучить поведение пламени в широком диапазоне расходов свежей смеси, в то время как экспериментальные данные были получены в диапазоне расходов от 10 до 110 л/мин, который определяется имеющимися в распоряжении измерителями-регуляторами расхода газа. Сравнивая результаты численного моделирования и экспериментальные данные, можно предположить, что диапазон расходов горючей смеси, исследованный в ходе проведения экспериментов, примерно соответствует области (1) на Рис. 2.2. Действительно, скорость потока газа во внутренней полости вблизи границы пористой среды может быть оценена как $V = S \cdot Q$, где S - площадь внутренней поверхности пористой среды, Q - расход горючей смеси. При максимально достижимом в экспериментах расходе 110 л/мин и составе смеси 9%CH₄+91%воздух $V \approx 29$ см/с $< U_b$. Численные результаты предсказывают стабилизацию пламени в области (1) на Рис. 2.2 при $V(r_{p0}) < U_b$. При инициации пламени внутри пористой оболочки численное моделирование предсказывает возможность стабилизации волны горения внутри пористого каркаса (область (2) на Рис. 2.2) в диапазоне умеренных значений расхода свежей смеси и при выполнении условия $V(r_{p0}) > U_b$. Как показывают сделанные выше оценки, эти расходы, по-видимому, превышают значения достижимые с помощью использовавшихся измерителей расхода газа, и экспериментальная проверка этого предсказания требует модификации экспериментальной установки.

На Рис. 2.4 представлены зависимости температуры на внешней поверхности пористой оболочки $\theta_{p1} = \theta(r_{p1})$ от скорости подачи свежей смеси V_0 , полученные при начальном приближении 1 (красные точки на Рис. 2.4) и начальном приближении 2, (синие точки на Рис. 2.4). Как было показано выше, в области малых расходов (область (1) на Рис. 2.4) эти численные результаты

Рис 5а. Численное моделирование.

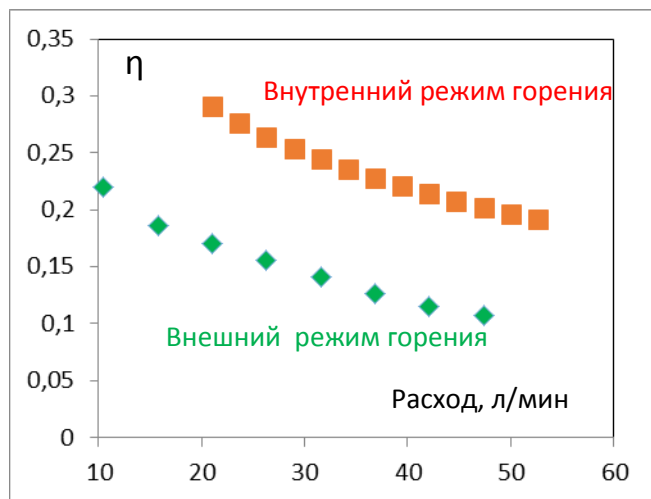


Рис 5б. Эксперимент

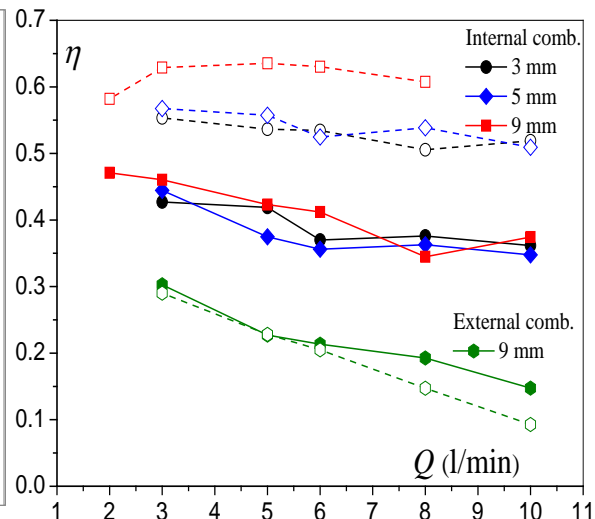


Рис. 2.5. Эффективность лучистых теплопотерь во внешнюю среду для внутреннего (красные точки) и внешнего (зеленые точки) режимов горения.

Рис. 2.5а - численное моделирование, Рис. 2.5б - экспериментальные данные.

соответствуют режимам "внутреннего" и "внешнего" горения, наблюдавшимся в экспериментах. Сравнение численных и экспериментальных данных, представленных на Рис. 2.4а и Рис. 2.4б, соответственно, свидетельствует о хорошем качественном согласии полученных результатов. При сравнении необходимо учитывать, что, как отмечалось выше, диапазон расходов горючей смеси, для которого получены экспериментальные данные (Рис. 2.4б), примерно соответствует области (1) на Рис. 2.2. Предложенная математическая модель позволяет качественно описать такие характерные особенности "внешнего" и "внутреннего" режимов горения в области (1), как монотонное возрастание температуры внешней поверхности горелки θ_{p1} с ростом расхода свежей смеси θ при "внутреннем режиме" горения, наличие максимума кривой $\theta_{p1}(Q)$ при "внешнем" режиме горения и более высокие значения температуры пористого каркаса при "внутреннем" режиме горения по сравнению с температурами достигаемыми при "внешнем" режиме при тех же значениях расхода смеси.

Как показали расчеты, излучательные характеристики цилиндрических пористых горелок, а именно эффективность теплового излучения от горелки (Рис. 2.5а), полученные на основании численного моделирования системы уравнений (1)-(7), также находятся в хорошем качественном согласии с экспериментальными данными (Рис. 2.5б). На основании результатов численного моделирования, можно сделать вывод о возможности дальнейшего увеличения температуры пористого каркаса и, следовательно, мощности потока радиационного излучения с внешней поверхности горелки в режиме "внутреннего" горения путем увеличения расхода горючей смеси. При этом положение фронта пламени будет смещаться внутрь пористой среды.

Несмотря на значительное число упрощающих предположений, сделанных при выводе модели (1)-(7), результаты численного моделирования хорошо согласуются с полученными экспериментальными данными на качественном уровне, а также позволяют дать физическое объяснение результатов измерений температурных и излучательных характеристик цилиндрических пористых горелок, полученных на предыдущих стадиях выполнения проекта. Использование простой математической модели позволяет предсказать качественное поведение этих характеристик в широком диапазоне изменений параметров задачи. Можно предположить, что параметрический анализ, выполненный на основании математического моделирования, и специально поставленные эксперименты, учитывающие теоретические предсказания, позволят определить значения параметров при которых достигаются оптимальные режимы функционирования горелок.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ.

В ходе выполнения НИР были экспериментально и численно исследованы температурные и излучательные характеристики тонкостенных пористых горелок и получены зависимости температуры пористого каркаса, мощности полного потока излучения и излучательной эффективности горелок от расхода и состава смеси.

Обнаружено, что при одних и тех же расходах и составах метано-воздушной смеси возможно существование двух различных режимов горения, "внешнего" и "внутреннего". В первом случае пламя стабилизируется вблизи внешней поверхности горелки, а во втором во внутренней полости пористой оболочки. Реализация того или иного режима горения зависит от условий инициирования пламени.

Экспериментально показано, что для "внутреннего" режима горения характерны более высокие температуры внешней поверхности горелки, большая мощность теплового излучения и излучательная эффективность, а также более равномерная светимость пористого тела, по сравнению с "внешним" режимом горения.

Результаты численного моделирования хорошо согласуются с экспериментальными данными и позволяют предсказать оптимальные значения параметров задачи для достижения максимальной эффективности системы. Полученные результаты позволяют сделать вывод о предпочтительности "внутреннего" режима горения с точки зрения достижения максимальных температурных и излучательных характеристик радиационных пористых горелок. Максимальная излучательная эффективность цилиндрических пористых горелок во "внутреннем" режиме горения составила 47% при мощности полного потока излучения 500 Вт. Достигнутая эффективность превосходит показатели большинства известных систем такого типа.

Результаты исследований могут найти применение при проектировании и создании эффективных систем нагрева.

4. Публикации

4.1. Основные

1. Zinoviev V.N., Kazanin I.V., Pak A.Yu., Vereshchagin A.S., Lebiga V.A., Fomin V.M. Permeability of hollow microspherical membranes to helium // *Journal of Engineering Physics and Thermophysics*. –2016. –Vol. 89 No. 1. –P. 25-37.
2. Zinovyev V.N., Kazanin I.V., Lebiga V.A., Pak A.Yu., Vereshchagin A.S., Fomin V.M. Co-extraction of water vapor and helium from natural gas // *Thermophysics and Aeromechanics*. –2016. –Vol. 23 No. 5. –P. 741–746.
3. Зиновьев В.Н., Казанин И.В., Пак А.Ю., Верещагин А.С., Лебига В.А., Фомин В.М. Проницаемость полых микросферических мембран по отношению к гелию // *Инженерно-физический журнал*. –2016. –Т. 89 No. 1. –С. 24-36.
4. Kuznetsov E.A., Sereshchenko E.V. Anisotropic characteristics of the Kraichnan direct cascade in two-dimensional hydrodynamic turbulence // *JETP Letters*. – 2015. –Vol. 102 No. 11. –P. 760-765. DOI: 10.1134/S0021364015230083
5. Fursenko R.V., Maznoy A., Odintsov E.S., Kirdyashkin A., Minaev S.S., Kumar S. Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni–Al burners // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. –2016. –Vol. 98. –P. 277–284. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.048.
6. Palesskiy F.S. Numerical study of combustion regimes and heat radiation of cylindrical porous burner // *Key Engineering Materials*. –2016. –Vol. 685. –P. 94-98. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.94

4.2. Дополнительные

1. Fomin V.M., Kazanin I.V., Lebiga V.A., Zinoviev V.N. A new method for extraction of helium from natural gas (Электронный ресурс) // *International Symposium on Advanced Science and Technology in Experimental Mechanics (ISEM) (Ho Chi Minh, Vietnam, 1–4 Nov., 2016) : Proceedings*. –S.l.: 2016. –P. 1-3.
2. Верещагин А.С., Фомин В.М., Лебига В.А., Зиновьев В.Н., Пак А.Ю., Казанин И.В. Математические модели поглощения гелия сорбентом на основе полых стеклянных микросфер // *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, 23–26 мая. 2016 г.): тезисы докладов и сообщений = XV Minsk international Heat and Mass Transfer Forum/ Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси*. –Минск: 2016. –Т. 3. –С. 110-113.
3. Зиновьев В.Н., Казанин И.В., Лебига В.А., Пак А.Ю., Верещагин А.С., Фомин В.М., Булучевский Е.А., Лавренов В.А. Проницаемость микросферических мембран и сорбентов на их основе по отношению к гелию // *XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, 23–26 мая. 2016 г.): тезисы докладов и сообщений = XV Minsk*

- international Heat and Mass Transfer Forum/ Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси. –Минск: 2016. –Т. 3. –С. 141-144.
4. Цибульский Н.Г., Верещагин А.С., Зиновьев В.Н., Казанин И.В. Исследование гелиевой проницаемости узкой фракции микросфер МС-В-1Л // Наука. Промышленность. Оборона : Труды XVII Всероссийской научно-технической конференции (Новосибирск, 20-22 апр. 2016 г.)/ Под ред. С.Д. Саленко. –Новосибирск: 2016. –Т. 1. –С. 239-243.
 5. Fursenko R.V., Maznoy A., Odintsov E.S., Kirdyashkin A., Minaev S.S., Kumar S. Temperature and radiative characteristics of cylindrical porous Ni–Al burners // International Journal of Heat and Mass Transfer. –2016. –Vol. 98. –P. 277–284. DOI: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.03.048.
 6. Sirotkin F., Fursenko R.V., Kumar S., Minaev S.S. Flame anchoring regime of filtrational gas combustion: Theory and experiment // Proceedings of the Combustion Institute. –2016. –Vol. 36. –P. 1-7. DOI: 10.1016/j.proci.2016.06.006.

4.3. Труды конференций и тезисы докладов I

1. Kazanin I.V., Fomin V.M., Lebiga V.A., Zinovyev V.N., Vereshchagin A.S., Pak A.Y., Tsibulsky N.G. Experimental determination of the helium permeability coefficient for hollow microsphere membranes // XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-16) (Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016) : abstracts. pt. II. –Perm: 2016. –P. 91-92.
2. Vereshchagin A.S., Fomin V.M., Lebiga V.A., Zinoviev V.N., Pak A.Yu., Kazanin I.V. Mathematical models of dynamic of two phase media consisting of helium and hollow selectively permeable microspheres // XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-16) (Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016) : abstracts. pt. II. –Perm: 2016. –P. 221-222.
3. Альянов А.В., Зиновьев В.Н., Верещагин А.С., Фомин В.М. Моделирование технологического процесса обогащения газовой смеси с помощью микросфер // XV Минский международный форум по тепло- и массообмену (Минск, 23–26 мая. 2016 г.): тезисы докладов и сообщений = XV Minsk international Heat and Mass Transfer Forum/ Институт тепло- и массообмена НАН Беларуси. –Минск: 2016. –Т. 3. –С. 90-92.
4. Lebiga V.A., Pak A.Yu., Zinoviev V.N. Application of the hot-wire measurement data for optimization of wind tunnel construction // XVIII International Conference on the Methods of Aerophysical Research (ICMAR-16) (Russia, Perm, 27 Jun.-3 Jul., 2016) : abstracts. pt. II. –Perm: 2016. –P. 127-128.
5. Minaev S.S., Fursenko R.V., K. Maruta Flammability limits of low-lewis-number premixed flames // Современные технологии и развитие политехнического образования : Международная научная конференция/ Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, 14–18 сент. 2015 г.). – Владивосток: 2016. –P. 611.
6. Minaev S.S., Maruta K., Sirotkin F., Fursenko R.V., Kirdyashkin A., Maznoy A. Filtrational gas combustion in porous media and micro combustion // Thirteenth

- International Conference on Flow Dynamics (ICFD2016) (Japan, Sendai, 10-12 Oct., 2016) : Proceedings. –Sendai: 2016. –P. 196-197.
7. Mokrin S.N., Fursenko R.V., Minaev S.S. Stabilization of stretched counterflow flames in a planar microchannel with heat conductive walls // Современные технологии и развитие политехнического образования : Международная научная конференция/ Дальневосточный федеральный университет (Владивосток, 14–18 сент. 2015 г.). –Владивосток: 2016. –P. 614-616.
 8. Sereshchenko E.V., Fursenko R.V., Minaev S.S., Shy S. Numerical simulations of ignition in the three-dimensional periodic vortex flow [Электронный ресурс] // 36th International Symposium on Combustion (Seoul, Korea, 31 Jul.- 5 Aug., 2016) : Abstracts. –S.l.: 2016. –No. 2P053-Paper. –P. 1.- CD-ROM.
 9. Sereshchenko E.V. Numerical study of the statistical characteristics of the direct cascade in two-dimensional hydrodynamic turbulence // Нелинейные волны – 2016 : тезисы докладов молодых ученых XVII научной школы (Нижний Новгород, 27 февр. - 4 март. 2016 г.). –Нижний Новгород: 2016. –P. 205.

ПРИЛОЖЕНИЕ.

Перечень статей, опубликованных по тематике проекта в 2016 г. в соответствии с государственным заданием

Индикатор	Ед. измерения	Всего за 2013-2016 гг.	2013	2014	2015	2016
Количество публикаций в ведущих российских и международных журналах по результатам исследований, полученных в процессе реализации проекта	единиц	20	4	4	6	6
Количество публикаций в мировых научных журналах, индексируемых в базе данных «Сеть науки» (WEB of Science)	единиц	20	4	4	6	6
Число тезисов в конференциях	единиц	47	9	9	14	15
Число охраняемых объектов интеллектуальной собственности: зарегистрированных патентов в России, зарегистрированных патентов за рубежом	единиц единиц	1		1		