

На правах рукописи

Миронов Роман Александрович

**Теоретическое и экспериментальное исследование
оптических свойств конструкционной кварцевой керамики
различной пористости и их влияния на процесс
высокотемпературного теплообмена**

Специальность 01.04.07 – Физика конденсированного состояния



АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва – 2019

Работа выполнена в Акционерном обществе «Обнинское научно-производственное предприятие «Технология» им. А.Г. Ромашина»

Научный руководитель: доктор технических наук, доцент
Черепанов Валерий Вениаминович

Официальные
оппоненты: **Плаксин Олег Анатольевич**
доктор физико-математических наук,
доцент, Акционерное общество
«Государственный научный центр
Российской Федерации – Физико-
энергетический институт имени
А.И. Лейпунского», начальник отдела 6

Прямиков Андрей Дмитриевич
кандидат физико-математических наук,
Федеральное государственное бюджетное
учреждение науки «Научный центр
волоконной оптики Российской академии
наук», старший научный сотрудник
теоретического сектора

Ведущая организация: Федеральное государственное унитарное
предприятие «Всероссийский научно-
исследовательский институт авиационных
материалов»

Защита состоится « 18 » декабря 2019 года в 14 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212.141.17, созданного на базе ФГБОУ ВО «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)», по адресу: 248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2, МГТУ им. Н.Э. Баумана, Калужский филиал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана и на сайтах www.bmstu.ru, www.bmstu-kaluga.ru.

Автореферат разослан « ____ » _____ 2019 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент

Лоскутов Сергей Александрович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Режимы эксплуатации перспективных летательных аппаратов предполагают их интенсивный нагрев до температур 2000 К и выше. Благодаря сочетанию механических и теплофизических свойств для производства высоко теплонагруженных элементов конструкций летательных аппаратов используются, в частности, керамические материалы. Многие керамики, получаемые на основе оксидных материалов, например, кварца, оксида алюминия, диоксида циркония, относятся к классу частично прозрачных для электромагнитного излучения. Ключевой особенностью данного класса материалов является совместное действие двух механизмов переноса тепла: радиационного и кондуктивного.

Для корректного учета радиационного механизма совместно с макроскопической задачей теплопереноса решается кинетическая задача переноса излучения в материале с учетом его поглощающих и рассеивающих свойств. Перенос излучения в частично прозрачных материалах описывается при помощи уравнения переноса излучения в терминах интенсивности – скалярной величины, зависящей от длины волны, координат и направления распространения (ее зависимостью от времени в тепловых задачах обычно пренебрегают в силу относительной малости времени релаксации излучения). Необходимость решать спектральные уравнения переноса излучения с учетом пространственной неоднородности и анизотропии интенсивности излучения усложняет задачу нестационарного радиационно – кондуктивного теплопереноса настолько, что даже в случае самой простой геометрии она может быть решена только численно. Ситуация усугубляется также тем, что для решения уравнения переноса излучения необходимо знание оптических свойств материалов, таких как показатели поглощения и рассеяния, индикатриса рассеяния. Для большинства конструкционных теплозащитных материалов данные характеристики не известны. Эти два фактора – сложность задачи радиационно-кондуктивного теплопереноса и отсутствие данных по оптическим свойствам материалов, привели к тому, что в практике инженерных расчетов радиационным теплопереносом в объеме материала либо пренебрегают, либо учитывают его при помощи полуэмпирических моделей, таких как модель эффективной теплопроводности. Использование модели эффективной теплопроводности приводит к существенной зависимости теплопроводности от условий проведения эксперимента по ее определению. Определение эффективной теплопроводности должно проводиться при тех же условиях, при которых она применяется, в противном случае радиационный теплоперенос может приводить к существенным погрешностям. На практике в лабораторном эксперименте трудно реализовать условия теплового нагружения идентичные условиям эксплуатации, поэтому использование моделей эффективной теплопроводности часто оказывается неоправданным.

В последнее десятилетие благодаря развитию вычислительной техники и численных алгоритмов решение задачи радиационно-кондуктивного теплопереноса в строгой постановке на основе уравнения переноса излучения входит в практику

инженерных расчетов, алгоритмы описаны в литературе, доступны коммерческие программные пакеты, позволяющие решать задачу в трехмерной геометрии. Поэтому в настоящее время возможность использования задач радиационно-кондуктивного теплопереноса в строгой постановке на стадии проектирования новых летательных аппаратов ограничивает в основном недостатком данных по оптическим свойствам материалов.

Кварцевая керамика используется как конструкционный и теплозащитный материал в ракетной технике уже более 30 лет. Несмотря на длительную историю своего применения, она, благодаря сочетанию термостойкости и прочности, остается одним из перспективных материалов для проектируемых летательных аппаратов. Работоспособность кварцевой керамики при температурах, приближающихся к точке плавления кварцевого стекла и, превосходящих ее, в значительной степени определяется радиационным теплопереносом в объеме материала. Поэтому определение оптических свойств кварцевой керамики и прогнозирование их зависимости от температуры представляется актуальной задачей.

Оптические свойства частично прозрачных керамик зависят и от микроструктуры материала, которая может быть достаточно разнообразной. Поэтому актуальной исследовательской задачей представляется также не только разработка методов определения физических, в частности, оптических свойств частично прозрачных высокотемпературных конструкционных и теплозащитных материалов, но и выяснение взаимосвязи их свойств с микроструктурой.

Целью работы является разработка расчетно - экспериментальных методов получения и исследования оптических свойств частично прозрачных материалов и, в частности, кварцевой керамики, для решения задач радиационно-кондуктивного теплопереноса.

Для достижения данной цели были сформулированы и решены следующие **задачи**:

1. . Выбор и обоснование расчетных методов по определению оптических свойств частично прозрачных рассеивающих материалов по измеренным спектрам отражения экспериментальных образцов.

2. Экспериментальное определение спектров отражения кварцевой керамики в широком спектральном диапазоне. Определение по измеренным спектрам отражения при помощи выбранных расчетных методов оптических параметров кварцевой керамики – показателей поглощения, рассеяния и индикатрисы рассеяния.

3. Исследование структуры кварцевой керамики методами оптической и электронной микроскопии, статического лазерного рассеяния, ртутной и газовой порозиметрии с целью получения дифференциальных и интегральных распределений зерен и пор по размерам. Разработка математической микроструктурной модели кварцевой керамики на основе полученных данных для расчетно-экспериментального определения индикатрисы рассеяния в материале.

4. Проведение сравнительного анализа результатов применения ряда альтернативных математических моделей для расчета оптических характеристик

кварцевой керамики с учетом полученных данных о распределении зерен и пор по размерам для исследования взаимосвязи структуры материала и его оптических свойств

5. Моделирование температурной зависимости оптических характеристик кварцевой керамики для расчета радиационно-кондуктивного теплопереноса на основе литературных данных по температурной зависимости показателей поглощения кварцевого стекла.

6. Реализация метода расчета радиационно-кондуктивного теплопереноса в кварцевой керамике в строгой постановке на основе уравнения переноса излучения с использованием полученных оптических характеристик для сравнения с методами расчета на основе моделей эффективной теплопроводности.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработаны расчетно-экспериментальные методики определения спектральных показателей поглощения и рассеяния частично прозрачных материалов и, в частности кварцевой керамики, основанные на приближенных асимптотических решениях уравнения переноса излучения, и методах Монте-Карло и инвариантного погружения.

2. Предложена матричная форма уравнения инвариантного погружения в квадратурах, позволяющая ускорить его численное решение.

3. Впервые установлена возможность применения модели независимых пор – рассеивателей в однородной среде, использующей полученные экспериментальным путем статистические данные о распределении пор по размерам, для расчета спектральной зависимости показателя рассеяния и индикатрисы рассеяния в частично прозрачном материале на примере кварцевой керамики.

4. Впервые определен полный комплекс оптических характеристик кварцевой керамики различной пористости (спектральные показатели поглощения, рассеяния и индикатриса рассеяния) в широком спектральном диапазоне, необходимых для решения задач радиационно-кондуктивного теплопереноса в строгой постановке на основе уравнения переноса излучения.

5. Впервые предложен и реализован метод определения распределения пор по размерам в частично прозрачных сильно рассеивающих материалах по спектральным коэффициентам отражения или пропускания слоев двух или более геометрических толщин.

6. Впервые расчетно – экспериментально исследовано влияние пористости кварцевой керамики на спектральную и температурную зависимости излучательной способности в спектральном диапазоне 0,4-18 мкм и температурном диапазоне 20-1500 °С.

7. Впервые методами численного моделирования проведено сравнение результатов расчета теплопереноса в конструкционной кварцевой керамике для различных тепловых режимов с использованием моделей эффективной теплопроводности и решения задачи радиационно-кондуктивного теплопереноса в строгой постановке на основе уравнения переноса излучения, позволяющее судить

об ошибках, которые могут вноситься использованием моделей эффективной теплопроводности.

8. Впервые численно исследовано влияние распределения по размерам пор в кварцевой керамике на распределение температур и тепловых потоков в слое материала в условиях нестационарного радиационно-кондуктивного теплопереноса.

Практическая значимость работы определяется следующим:

1. Разработаны методики расчета и идентификации оптических характеристик частично прозрачных материалов, исследована граница их применимости, погрешность результата, на примере кварцевой керамики предложен способ учета температурной зависимости показателя поглощения. Подходы реализованы в виде пакета программ в среде MATLAB™, которые используются в практике «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

2. Получены оптические характеристики (спектральные показатели поглощения и рассеяния, индикатриса рассеяния, излучательная способность) кварцевой керамики с открытой пористостью 7 – 11 % в диапазоне длин волн 0,4 – 4,5 мкм и в температурном диапазоне 20-1500 °С. Оптические характеристики используются для решения задач радиационно-кондуктивного теплопереноса в практике «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина» при проектировании изделий из кварцевой керамики.

3. Предложен и реализован в виде набора компьютерных программ метод определения размеров пор в частично прозрачных материалах, используемый в практике «ОНПП «Технология» им. А.Г. Ромашина».

Основные положения, выносимые на защиту.

1. Расчетно-экспериментальные методы определения спектральных показателей поглощения и рассеяния частично прозрачных материалов на основе асимптотических решений уравнения переноса излучения, на основе метода Монте-Карло и метода инвариантного погружения.

2. Математическая микроструктурная модель кварцевой керамики для расчета оптических характеристик материала.

3. Метод имитационного статистического моделирования с использованием теории Ми на основе построенной математической микроструктурной модели материала.

4. Способ учета температурной зависимости показателя поглощения кварцевой керамики для расчета радиационно-кондуктивного теплопереноса.

5. Способ определения распределения пор по размерам по спектральным коэффициентам отражения от слоев керамики двух толщин.

6. Методика расчетно-экспериментального определения излучательной способности кварцевой керамики в спектральном диапазоне 0,4-18 мкм и в температурном диапазоне 20-1500 °С.

7. Результаты расчетно-экспериментального определения оптических характеристик кварцевой керамики (спектральных показателей поглощения и

рассеяния, индикатрисы рассеяния, излучательной способности) в спектральном диапазоне 0,4-4,7 мкм.

8. Результаты расчета радиационно-кондуктивного теплопереноса в кварцевой керамике в строгой постановке на основе уравнения переноса излучения с использованием полученных оптических характеристик.

Достоверность полученных результатов обеспечена использованием методик измерения, реализованных на поверенном или калиброванном оборудовании, согласием результатов полученных расчетным путем с литературными данными, а также согласием альтернативных расчетных и экспериментальных методов между собой в границах их применимости.

Апробация работы. Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на: XX и XXI международных конференциях «Конструкции и технологии получения изделий из неметаллических материалов» (Обнинск, 2014 г. и 2016 г.). XV Минском международном форуме по тепло-массообмену (Беларусь, Минск, 2016 г.), семинаре научной школы МАИ (НИУ) под руководством чл.-корр. РАН Алифанова О.М. (Москва, 2015 г. и 2017г.), Седьмой Российской Национальной конференции по теплообмену (Москва, 2018), 9-th International Symposium on Radiative Transfer (Greece, Athens, 2019 г.).

Публикации. Всего по теме диссертации опубликовано 8 статей в журналах, включённых в Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание учёной степени кандидата наук, на соискание учёной степени доктора наук и один патент. В опубликованных работах достаточно широко представлены материалы диссертации. Список публикаций приводится в конце автореферата.

Личный вклад автора заключается в: постановке задач исследования; проведении экспериментов; поиске литературных данных; выборе, адаптации или модификации, практическом применении наиболее эффективных методов математического моделирования; написании программ математической обработки и их пользовательского интерфейса; систематизации и обобщении полученных результатов. Все основные результаты получены лично автором, заимствованный материал обозначается ссылками.

Структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 214 страниц, включая 71 рисунок, 16 таблиц и список литературы из 171 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность исследований, проводимых в рамках диссертации, формулируются цели, задачи, научная новизна и практическая значимость, приведены положения, выносимые на защиту.

В первой главе проводится обзор литературы по теме диссертации.

Во второй главе излагаются численные методы, применяемые в работе для решения обратной задачи переноса излучения. Обратная задача решается методом оптимизации. При этом рассмотрены три различных метода решения прямой

задачи: асимптотические формулы, метод Монте-Карло и метод инвариантного погружения. Каждый из методов имеет ряд преимуществ, поэтому они используются в совокупности. Асимптотические формулы – аналитические выражения для коэффициентов полного пропускания и отражения слоя материала, которые позволяют быстро решать обратные задачи. Их основной недостаток состоит в ограниченной области применимости. В работе путем сравнения с численными методами представлено обоснование использования асимптотических формул, оценены границы их применимости, вносимые погрешности. Метод Монте-Карло - метод численного интегрирования уравнения переноса излучения, его программная реализация в данной работе строится на основе хорошо известных и описанных в литературе алгоритмов. Правильность реализации метода проверяется путем сравнения с литературными данными. Расчет по методу Монте-Карло используется с одной стороны как проверочный для двух другим методов, так как решение с его помощью занимают длительное время. С другой стороны он может применяться для слоев малой оптической толщины. Метод инвариантного погружения является менее распространенным, чем метод Монте-Карло, однако значительно превосходит его по скорости. В работе подробно описывается численная реализация метода инвариантного погружения и предлагается матричная форма записи уравнения инвариантного погружения в квадратурах, которая позволяет ускорить процесс вычисления в среде MATLAB. Метод инвариантного погружения используется для слоев достаточно большой оптической толщины в той области оптических параметров, где применение асимптотических формул не оправдано.

Описанные методы в совокупности позволяют охватить весь диапазон оптических параметров. Согласие всех трех методов, реализованных независимо друг от друга, подтверждает корректность использованного в работе подхода (Рисунок 1).

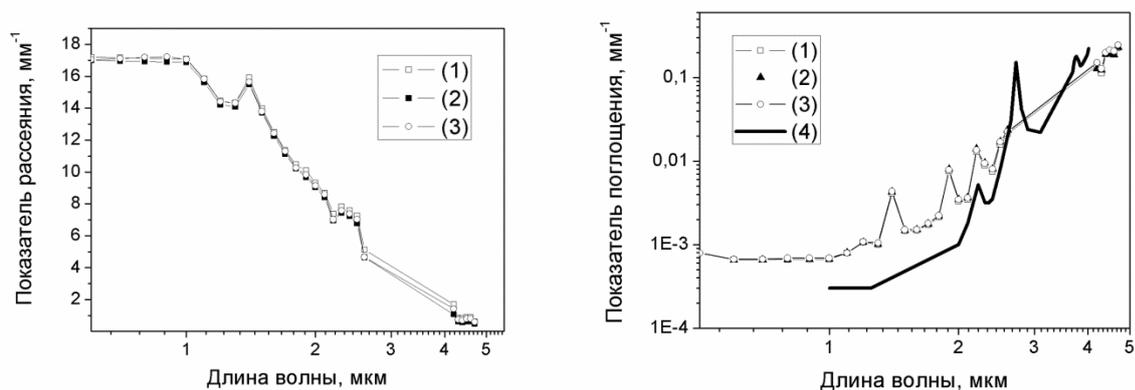


Рисунок 1. Спектр показателя рассеяния (слева) и поглощения (справа) кварцевой керамики пористостью 10%. Приводятся результаты, полученные с использованием различных методов решения прямой задачи: асимптотические формулы - (1), численное решение уравнения инвариантного погружения - (2), метод Монте-Карло - (3), (4) – показатель поглощения кварцевого стекла по литературным данным

По измеренным спектрам коэффициента полного отражения определяются спектральные показатели поглощения и рассеяния кварцевой керамики с различной открытой пористостью в диапазоне 7 – 11 % (Рисунок 2).

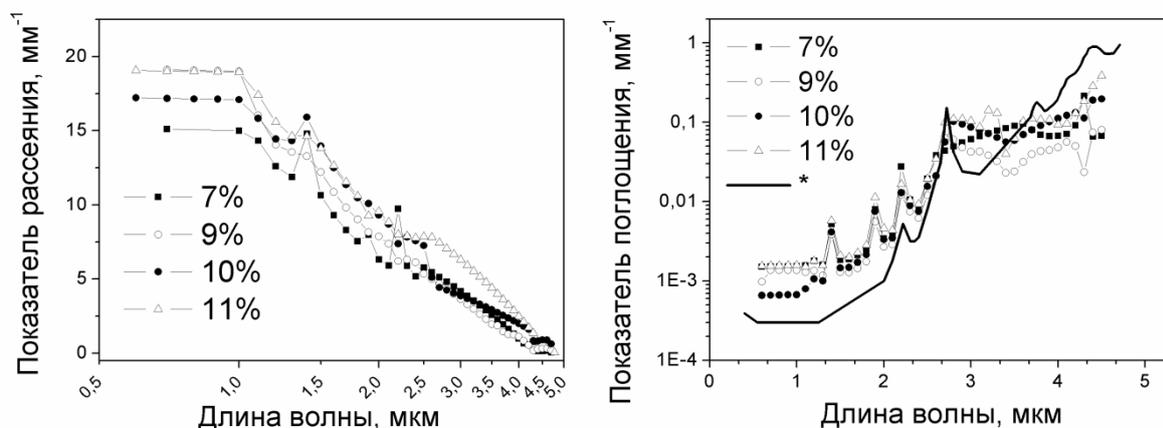


Рисунок 2. Спектры показателя рассеяния (слева) и показателя поглощения (справа) образцов кварцевой керамики различной пористости.* – спектр показателя поглощения кварцевого стекла марки КВ

Проводится сравнение полученных результатов с имеющимися литературными данными для кварцевой керамики. Путем внесения погрешности в исходные данные оценена погрешность определения оптических параметров. Показано, что абсолютная погрешность величины коэффициента полного отражения от слоя керамики в 1% приводит к относительной погрешности определения показателя рассеяния – 5 - 8% и поглощения < 10% в области частичной прозрачности. Абсолютная погрешность в определении толщины слоя на уровне 0,05 мм (при исследуемых толщинах слоев 1 – 10 мм) приводит к относительной погрешности s и k не превышающей 4% во всем спектральном диапазоне.

На основе литературных данных по температурной зависимости показателя поглощения кварцевого стекла спрогнозирована температурная зависимость излучательной способности. При этом предполагалось, что температурная зависимость показателя поглощения кварцевого стекла и кварцевой керамики подобны. Полученные результаты хорошо согласуются с экспериментальными данными из литературы. Таким образом, подтверждается правомерность использования определенных в настоящей работе оптических параметров для решения прямых задач переноса излучения.

В заключительной части второй главы приводятся результаты по численному исследованию единственности решения обратной задачи, показано, что описанными во второй главе методами показатели поглощения и рассеяния могут быть определены только при известной индикатрисе рассеяния. Поэтому в третьей главе проводится подробное исследование данных о структуры материала, а в четвертой главе для исследования индикатрисы рассеяния применен аналитический расчет, основанный на теории Ми и данных о структуре.

В третьей главе дается описание экспериментальных методов исследования структуры кварцевой керамики. Структура кварцевой керамики исследуется с помощью электронной, оптической и атомно-силовой микроскопии, статического лазерного рассеяния, гелиевой пикнометрии, газовой и ртутной порозиметрии, методом гидростатического взвешивания.

Качественно морфология кварцевой керамики различной пористости исследовалась при помощи сканирующей электронной и атомно-силовой микроскопии (Рисунок 3).

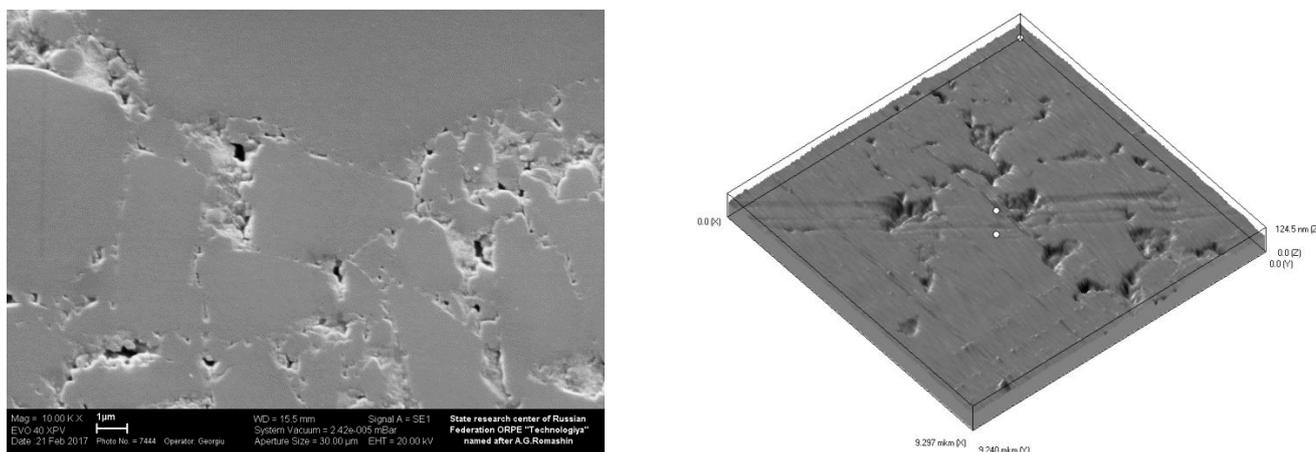


Рисунок 3. Изображение полированной поверхности (слева) кварцевой керамики полученное на сканирующем электронном микроскопе при увеличении 10 тыс., (справа) – изображение поверхности по данным атомно-силовой микроскопии (размер области сканирования $\sim 9,3 \times 9,3 \times 0,1$ мкм)

Для получения количественных данных по размерам частиц в шликере, используемом для получения керамики, применялся метод статического лазерного рассеяния. Распределения по размерам зерен с размерами > 1 мкм определялись путем цифровой обработки изображений тонких шлифов керамики, полученных методом оптической микроскопии в режиме темного поля на просвет.

Полученные данные по размерам зерен и пор приведены на Рисунке 4.

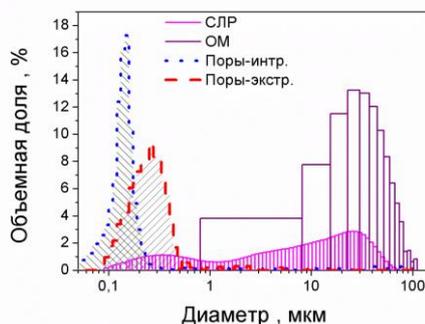


Рисунок 4. Распределение частиц в шликере по данным статического лазерного рассеяния (СЛР), зерен в керамике под данным оптической микроскопии (ОМ) и пор по размерам по данным интрузии (Поры-интр.) и экструзии (Поры-экстр.) ртути

Распределения пор по размерам в диапазоне диаметров (0,01 – 100 мкм) измерялось на образцах кварцевой керамики с открытой пористостью 7-11% методом ртутной порозиметрии. Распределение пор по размерам в области диаметров от 2 до 110 нм и удельная площадь поверхности исследовались на образцах при помощи газовой адсорбции.

В четвертой главе дается описание теоретической модели расчета оптических свойств. Модель базируется на теории рассеяния Ми и предположении о независимом характере рассеяния.

Анализируются два способа представления материала: в виде упаковки шаров и в виде шаровидных пор в монолите стекла. На основе предложенной модели рассчитана спектральная среднего косинуса угла рассеяния, характеризующего индикатрису рассеяния, и показателей рассеяния (Рисунок 5).

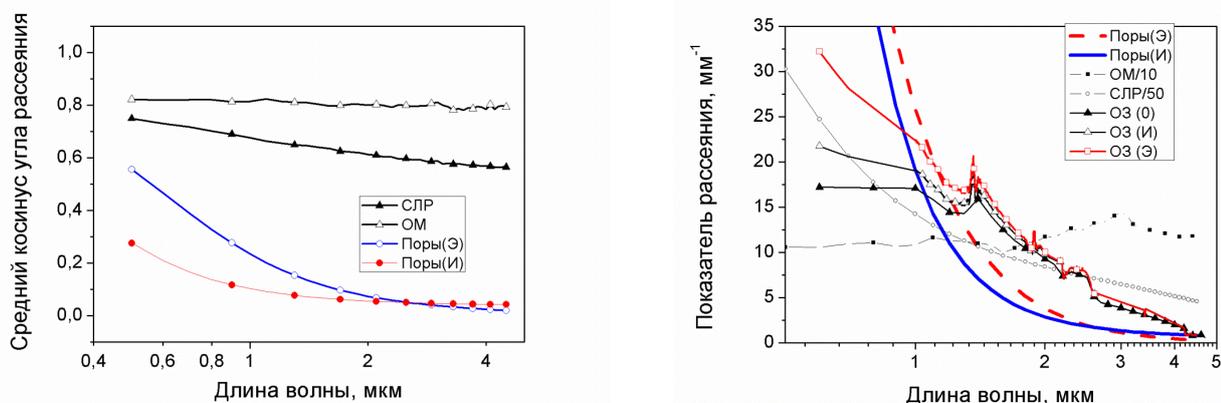


Рисунок 5. Спектральная зависимость среднего косинуса угла рассеяния (слева) и показателя рассеяния (справа), рассчитанных по теории Ми по данным: «СЛР» – статического лазерного рассеяния (значения показателя рассеяния, деленные на 50), «ОМ» –оптической микроскопии (значения показателя рассеяния, деленные на 10), «Поры(И)» и «Поры(Э)» –ртутной порозиметрии, «ОЗ»–результат обратной задачи: (0) – изотропное рассеяние, (И) и (Э) –по данным интрузии и экструзии соответственно, с учетом спектральной зависимости среднего косинуса угла рассеяния

Приведенные результаты показывают, что наиболее близкой к результату обратной задачи оказывается модель материала в виде пористого стекла, где основным рассеивающим элементом являются поры. Моделирование по теории Ми позволяет обосновать использование близкой к изотропной формы индикатрисы рассеяния при решении обратной задачи. Таким образом, этот результат дополняет подход, описанный во второй главе.

Совмещение возможностей методов идентификации и статистического расчета на основе структурных свойств материала позволило предложить оригинальный способ определения распределения пор по размерам в частично прозрачных материалах. Основная идея метода состоит в том, чтобы минимизировать разницу между спектральным коэффициентом рассеяния получаемым при помощи теории Ми и методом идентификации (Рисунок 6).

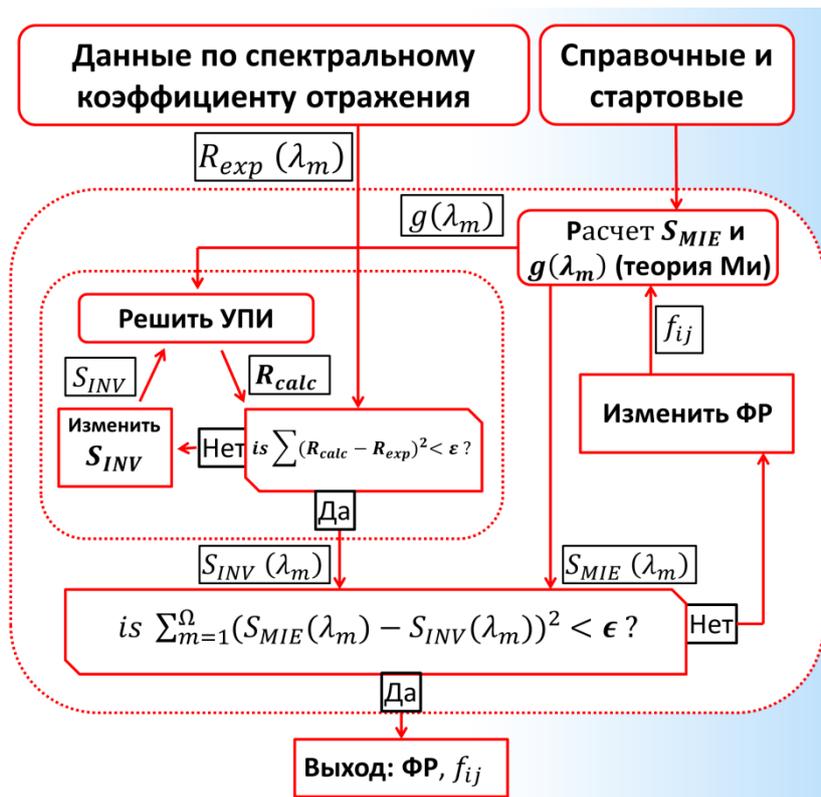


Рисунок 6. Схема алгоритма оптимизации для определения параметров распределения пор по размерам

На Рисунке 6 введены следующие обозначения $R_{exp}(\lambda_m)$ и $R_{calc}(\lambda_m)$ – измеренные и рассчитанные по теории переноса излучения спектральные коэффициенты отражения соответственно; $g(\lambda_m)$ – средний косинус угла рассеяния; $S_{MIE}(\lambda_m)$ и $S_{INV}(\lambda_m)$ – спектральные показатели рассеяния рассчитанные по теории Ми и из обратной задачи переноса излучения соответственно; f_{ij} – относительная объемная доля рассеивателей j -й фазы с i -м диаметром; ϵ, ϵ – параметры, определяющие точность оптимизации, УПИ – уравнение переноса излучения, ФР – функция распределения по размерам.

Результаты метода демонстрируют значения размеров пор близкие к данным метода ртутной порозиметрии. Метод спектрального рассеяния имеет ряд плюсов по сравнению с традиционными методами анализа пористой структуры: позволяет анализировать закрытые поры; может рассматриваться как рутинный метод анализа или как метод *in situ*, так как процесс измерения занимает несколько минут; не требует специального оборудования (порозиметра), так как для измерения используется универсальный прибор – ИК-спектрометр; является неразрушающим и может быть использован для анализа крупногабаритных изделий; с применением портативных спектрометров метод может быть адаптирован для исследования стационарных и крупногабаритных объектов.

В заключительной части четвертой главы приводятся экспериментальные результаты по насыщению кварцевой керамики иммерсионной жидкостью, которые подтверждают, что рассеивающими объектами в данном материале являются открытые поры.

В пятой главе при помощи программного пакета ANSYS FLUENT™ производится решение задачи радиационно-кондуктивного теплопереноса в слое кварцевой керамики. При анализе полученных результатов и выборе объекта для моделирования внимание уделяется аспектам, касающимся спектральной и температурной зависимости оптических свойств и корректному заданию теплофизических свойств материала.

На нагреваемой границе слоя задавались граничные условия первого рода в виде зависимости температуры от времени. На Рисунке 7, для примера, приведен один из режимов.

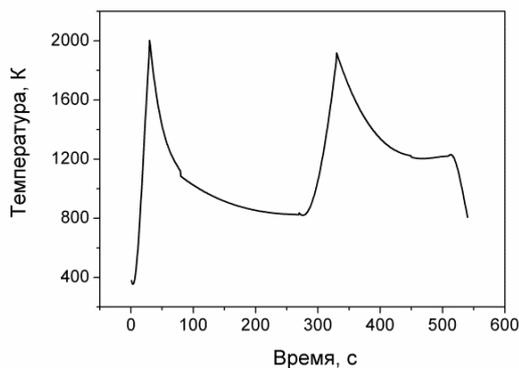


Рисунок 7. Режим нагрева, имитирующий режима эксплуатации керамики в летательных аппаратах

Задача для радиационной составляющей теплопроводности решалась методом дискретных ординат. Спектральная зависимость оптических параметров учитывалась по модели gray-band, которая предполагает постоянное значение спектральных коэффициентов в рамках каждой полосы. Спектральная область разбивалась на шесть полос. Решение задачи РКТ сравнивалась с расчетами по модели эффективной теплопроводности. В качестве значений эффективной теплопроводности кварцевой керамики использованы данные двух методов: нестационарного и квазистационарного нагрева, которые брались из литературы. Метод нестационарного нагрева основан на нагреве керамики с постоянной скоростью (5 К/с) и решении нестационарной обратной задачи теплопроводности. Метод квазистационарного нагрева заключается в измерении теплопроводности в условиях стационарного нагрева. В качестве температурной зависимости кондуктивной теплопроводности использовались данные метода лазерной вспышки.

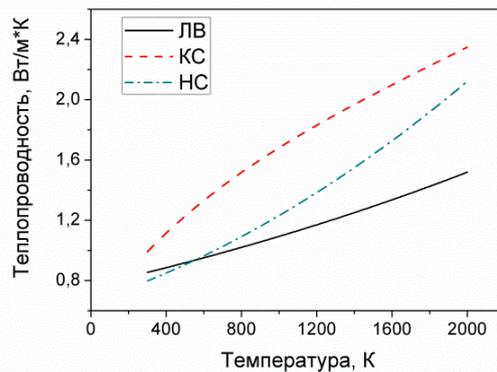


Рисунок 8. Зависимость теплопроводности от температуры согласно различным методам: ЛВ – метод лазерной вспышки, КС – метод квазистационарного нагрева, НС – метод нестационарного нагрева

Различие в значении теплопроводности между тремя методами ее определения связано с различным вкладом радиационной составляющей теплопереноса при проведении эксперимента по определению теплопроводности. При квазистационарном нагреве этот вклад наибольший, при измерении методом лазерной вспышки – наименьший.

Показано, что в некоторых случаях использование модели эффективной теплопроводности может приводить к существенным погрешностям, как при определении температуры (Рисунок 9 слева), так и теплового потока (Рисунок 9 справа) на границе слоя противоположной нагреваемой.

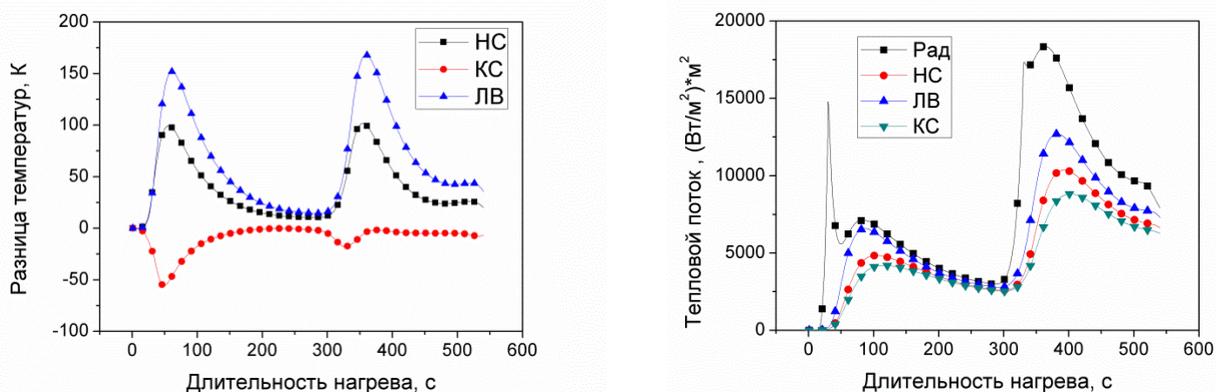


Рисунок 9. Слева - разница температур на границе противоположной нагреваемой между рассчитанной по модели радиационно-кондуктивного теплопереноса и кондуктивной (кривая ЛВ) и эффективной теплопроводности (кривые НС и КС) для режима нагрева, приведенного на Рисунке 7. Справа - зависимость от времени теплового потока через границу слоя, противоположную нагреваемой для этого же режима нагрева, рассчитанная в соответствии с различными моделями теплопроводности, (Рад) – решение строго задачи радиационно – кондуктивного теплопереноса

Модель эффективной теплопроводности принципиально не учитывает ряд эффектов частичной прозрачности материала. Так, например, в материале могут

быть созданы такие условия нагрева, при которых тепловое излучение, проходящее через границу слоя, противоположную нагреваемой, будет иметь не характерный для ее текущей температуры спектральный состав и значительно отличающиеся от рассчитанных по модели эффективной теплопроводности значения теплового потока. В работе также приводятся результаты расчета распределения температуры в объеме материала для различных режимов нагрева. Полученные результаты показывают, что для достаточно сложного режима адекватно описать его в рамках модели эффективной теплопроводности (с погрешностью не более 50 К) не удается.

На основе взаимосвязи распределения пор по размерам в кварцевой керамике и спектрального показателя рассеяния, установленной в четвертой главе диссертационной работы, в пятой главе численно исследовано влияние размеров пор на распределение температур и тепловых потоков в слое кварцевой керамики (Рисунок 10). Рассмотрены две модификации, которые состояли в смещении максимума распределения пор по размерам. Суммарная пористость керамики при этом соответствовала 10% и не менялась при модификации размеров пор. Далее по теории Ми рассчитывалась спектральная зависимость показателя рассеяния и среднего косинуса угла рассеяния для данных модификаций, которые далее использовались для решения задачи радиационно-кондуктивного теплопереноса.

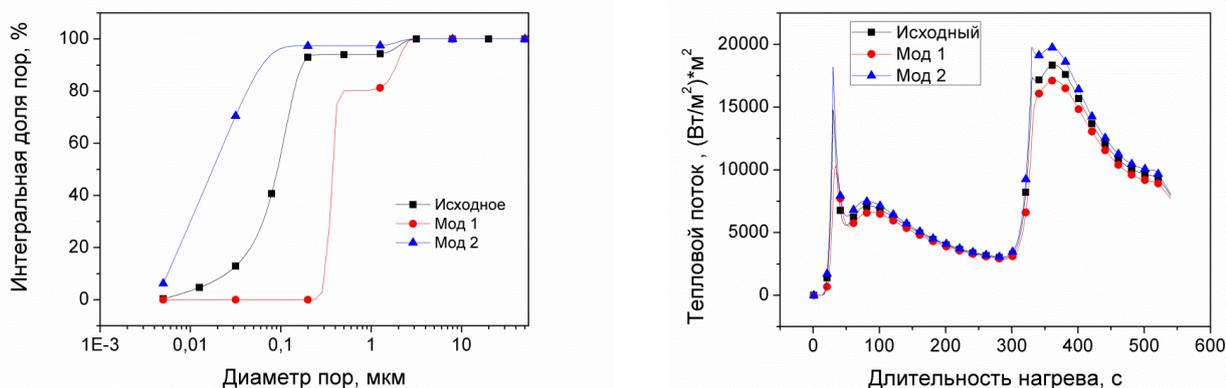


Рисунок 10. Распределение пор по размерам до (исходное) и после (мод1 и мод2) модификации (слева) и рассчитанная зависимость от времени теплового потока через нижнюю границу (Б). Средний размер пор при Мод 1 - 0,73 мкм, Мод 2 - 0,08 мкм, Исходное – 0,25 мкм

Численно показано, что путем увеличения размеров пор (мод 1) тепловой поток в максимумах частичной прозрачности может быть снижен на ~60%. Подобное моделирование открывает возможности имитационного моделирования, то есть проектирования материала под заданные условия его эксплуатации.

В приложении к диссертационной работе описываются возможности пакета прикладных программ, состоящего из семи подпрограмм, написанных автором в среде MATLAB™.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы, состоящие в следующем:

1. Предложена и реализована методология (комплекс методов) экспериментального и расчетного определения оптических свойств частично прозрачных керамических материалов и последующего использования этих свойств для моделирования процессов радиационно-кондуктивного теплопереноса. Предложенный подход включает следующие этапы: (1) решение обратной задачи переноса излучения для определения спектров показателей рассеяния и поглощения материала; (2) исследование микроструктуры материала для определения распределения рассеивателей по размерам; (3) определение наиболее адекватной модели взаимодействия материала с излучением и расчет параметра анизотропии его индикатрисы рассеяния на основе теории Ми; (4) прогнозирование температурной зависимости оптических параметров на основе литературных данных; (5) решение задачи радиационно-кондуктивного теплопереноса в строгой постановке. Использование предложенной методологии позволяет повысить достоверность теплофизических расчетов конструкций из частично прозрачных материалов, работающих в условиях мощного нагрева, за счет корректного учета вкладов радиационных потоков в процесс теплопереноса. Предложенный подход апробирован на кварцевой керамике с пористостью в диапазоне 7–11%.

2. Методом оптимизации решена обратная задача переноса излучения, с использованием в качестве исходных данных спектров полусферического отражения, измеренных для слоев полупрозрачной керамики различной толщины. Прямая задача переноса излучения решена тремя численными методами: методом Монте-Карло, методом инвариантного погружения и при помощи асимптотических формул. На примере кварцевой керамики показано, что методы Монте-Карло и инвариантного погружения целесообразно использовать вне границ применимости асимптотических формул. Метод Монте-Карло наиболее подходит для слоев малой оптической толщины. Для метода инвариантного погружения предложена матричная форма уравнения в квадратурах, которая позволяет ускорить процесс решения прямой задачи в программной среде MATLAB™. Использование трех методов решения прямой задачи позволило найти способ решения обратной задачи с требуемой точностью и за оптимальное время.

3. С целью получения статистически достоверных данных по структуре материала, необходимых для расчета оптических параметров, проведено комплексное исследование кварцевой керамики методами оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, газовой и ртутной порозиметрии. В результате были получены распределения зерен и пор керамики по размерам.

4. На основании теории рассеяния Ми в рамках предположения о независимых рассеивателях, проведен расчет спектрального показателя рассеяния кварцевой керамики на основе двух моделей материала. В первой модели

рассмотрена компактная система шаров из кварцевого стекла с распределением по размерам, соответствующим данным оптической и электронной микроскопии. Во второй модели рассмотрена система шаровидных пор, равномерно распределенных в матрице стекла с распределением пор по размерам, соответствующим данным ртутной и газовой порозиметрии. Расчет для системы шаровидных пор показал результаты, наиболее близкие к результатам решения обратной задачи. Показано, что простая модель независимых рассеивателей в системе шаровидных пор в рамках теории Ми применима для оценки показателя и индикатрисы рассеяния частично прозрачной кварцевой керамики с пористостью, по крайней мере, до 10%.

5. Разработан и реализован оригинальный способ расчета распределения пор по размерам, основанный на одновременном решении обратной задачи переноса излучения и расчете показателя рассеяния для модели независимых рассеивателей в системе шаровидных пор в рамках теории Ми. Метод опробован на кварцевой керамике различной пористости.

6. Решение обратной задачи переноса излучения позволяет разделить коэффициенты процессов поглощения и рассеяния. Это позволило на основе имеющихся в литературе данных по спектру показателя поглощения кварцевого стекла обосновать и реализовать способ прогнозирования температурной зависимости показателя поглощения частично прозрачных материалов и, в частности, кварцевой керамики. Полученная таким образом температурная зависимость использована для расчета температурной зависимости спектральной излучательной способности кварцевой керамики.

7. Разработанные методики расчета спектральных оптических свойств частично прозрачных материалов реализованы в виде пакета программ, возможности которых описаны в приложении к диссертационной работе.

8. Показано, что в исследованной кварцевой керамике доминируют открытые поры. Пропитка кварцевой керамики иммерсионной жидкостью (олеиновая кислота) позволяет полностью устранить рассеяние света. Предложен оригинальный метод определения оптической толщины слоя частично прозрачного материала в процессе его насыщения иммерсионной жидкостью. Метод основан на анализе изменений спектра пропускания слоя материала непосредственно в процессе его пропитки.

9. При помощи программного пакета ANSYS FLUENT™ произведено численное моделирование комбинированного радиационно-кондуктивного теплопереноса в слое кварцевой керамики толщиной 10 мм. Исследовано влияние размеров пор на распределение температуры и тепловых потоков. Сравнительный анализ результатов расчета радиационно-кондуктивного переноса с расчетами по традиционно применяемым макроскопическим моделям кондуктивной и эффективной теплопроводности показал, что пренебрежение радиационным вкладом в теплоперенос приводит к существенным ошибкам, как по температуре, так и по тепловому потоку. В рамках моделей эффективной теплопроводности ошибки могут быть снижены, однако, для нестационарного режима, особенно в условиях интенсивного нагрева, невозможно адекватно описать распределение температуры в объеме и на поверхности материала при использовании одинаковой

температурной зависимости полной теплопроводности для всего диапазона температур.

Основные результаты отражены в следующих работах

1. Миронов Р.А., Забежайлов М.О., Бородай С.П. Определение показателей поглощения, рассеяния и излучательной способности кварцевой керамики по измеренным спектрам коэффициента диффузного отражения в диапазоне длин волн 0.5—5 мкм // *Тепловые процессы в технике*. 2013. Т. 5. №6 . С. 262-269. (0,38 п.л./ 0,28 п.л.).

2. Миронов Р.А., Забежайлов М.О., Бородай С.П. Расчетно – экспериментальное определение температурной зависимости интегральной излучательной способности алюмооксидной керамики // *Новые Огнеупоры*. 2014. №10. С. 51-54. (0,25 п.л./ 0,20 п.л.).

3. Расчетно - экспериментальное определение температурной зависимости спектральных и интегральных коэффициентов излучения кварцевой керамики различной пористости / Р.А. Миронов [и др.] // *Теплофизика высоких температур*. 2016. Т.54. №5. С.724- 732. (0,56 п.л./ 0,4 п.л.).

4. Черепанов В.В., Миронов Р.А. О некоторых возможностях и перспективах комплексного подхода в исследовании оптических свойств теплозащитных аэрокосмических материалов. // *Тепловые процессы в технике*, 2017. Т.9. № 8. С. 360-369. (0,63 п.л./ 0,2 п.л.).

5. Определение оптических параметров частично прозрачных материалов методом инвариантного погружения / Р.А. Миронов [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. 2017. Т.123. №4. С.642-649. (0,5 п.л./ 0,4 п.л.).

6. Расчет оптических свойств кварцевой керамики на основе данных о ее структуре / Р.А. Миронов [и др.] // *Теплофизика высоких температур*. 2018. Т.56. №1. С. 41-49. (0,56 п.л./ 0,46 п.л.).

7. Определение размеров пор в частично прозрачной керамике по спектрам коэффициента полного отражения / Р.А. Миронов [и др.] // *Оптика и спектроскопия*. 2018. Т. 124. № 3. С. 295-302. (0,5 п.л./ 0,4 п.л.).

8. Transient radiative-conductive heat transfer modeling in constructional semitransparent silica ceramics / R.A. Mironov [et.al.] // *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2018. V. 127. Part C. P. 1230-1238. (0,56 п.л./ 0,46 п.л.).

9. Способ определения распределения по размерам и концентрации включений в частично прозрачных сильно рассеивающих материалах. а.с. 2018125091/29(039775) РФ / Миронов Р.А., Забежайлов М.О., Русин М.Ю. 09.07.2018. (0,5 п.л./0,4 п.л.)

Миронов Роман Александрович

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ
ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ КОНСТРУКЦИОННОЙ КВАРЦЕВОЙ
КЕРАМИКИ РАЗЛИЧНОЙ ПОРИСТОСТИ И ИХ ВЛИЯНИЯ НА
ПРОЦЕСС ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ТЕПЛООБМЕНА

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Подписано в печать 16.10.2019 г. Формат 60x84 1/16
Бумага офсетная. Печать офсетная. Печ. л. 1.0.
Усл.печ.л. 0,93. Тираж 100 экз. Заказ № _____

Отпечатано ООО «Бизнесгрупп»
Г. Обнинск, ул. Калужская, 4, ИНН 4025077637