



**НПО  
ЛАВОЧКИНА**

Акционерное общество  
«Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина»  
(АО «НПО Лавочкина»)

Ленинградская ул., д. 24, г. Химки, Московская область, 141402, ОГРН 1175029009363, ИНН 5047196566  
тел.: +7 (495) 573-56-75, факс: +7 (495) 573-35-95, e-mail: npol@laspace.ru, www.laspace.ru

«12» ноября 2019 г. № 110/24628

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

Ученому секретарю диссертационного совета  
Д 212.141.17 на базе ФГБОУ ВО «Московский  
государственный технический университет им.  
Н.Э.Баумана (национальный исследовательский  
университет)

к.т.н., доценту Лоскутову С.А.

248000, г. Калуга, ул. Баженова, д. 2.

### ОТЗЫВ

на автореферат диссертационной работы Миронова Романа Александровича на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование оптических свойств конструкционной кварцевой керамики различной пористости и их влияния на процесс высокотемпературного теплообмена», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния

Судя по автореферату диссертации Миронова Р.А., **объектом** его исследований являются материалы для тепловой защиты поверхности высокоскоростных летательных аппаратов (ЛА) в воздушных средах, **предметом** – высокотемпературный материал в виде пористой кварцевой керамики, используемый в конструкциях авиационной и ракетно-космической техники (РКТ), а **инструментом** – расчетные и экспериментальные методы исследования.

**Целью** своих исследований автор ставит разработку методов расчетно-экспериментального исследования оптических свойств (спектрального оптического показателя рассеяния, поглощения и индикатрисы рассеяния) пористой керамики, необходимых для решения задачи о радиационно-кондуктивном переносе тепла внутри её структуры. Положительным результатом этих исследований, полагает автор, должно явиться более точное по сравнению с использованием коэффициента эффективной теплопроводности, определяемого обычно в условиях тепловой нагрузки при лабораторных испытаниях, существенно отличающихся от реальных, определение количества тепла, достигающего несущей конструкции ЛА, что неминуемо приведёт к сужению диапазона её температурного состояния, а, следовательно, и к уменьшению толщины теплозащитного слоя и снижению доли



его веса в конструкции ЛА. Задачи, решение которых способствует уменьшению массы изделий авиации и РКТ, относятся к категории **актуальных**.

Для достижения поставленной цели Миронов Р.А. решает ряд логически правильно выбранных направлений исследования.

Сначала во Введении и в Главе 1 на базе анализа и оценки результатов расчета температурного состояния конструкции ЛА, защищаемой от нагрева высокотемпературным потоком газа полупрозрачным материалом, полученных с помощью существующих методов, он находит, что решение этой задачи целесообразно проводить с учетом радиационно-кондуктивного теплопереноса в его структуре, используя уравнение переноса излучения (УПИ). Далее он формулирует постановку задачи и приходит к выводу о необходимости найти способы определения входящих в УПИ оптических свойств этого материала.

Глава 2 посвящена исследованию автором существующих расчетных методов идентификации показателей рассеяния и поглощения частично прозрачных материалов на основе решения обратной задачи переноса излучения. Описаны и реализованы в виде набора программ в среде MATLAB три метода решения задачи идентификации указанных параметров на основе экспериментальных данных по спектрам коэффициента полного отражения нескольких материала, содержащего несколько слоев. Также им определены показатели поглощения и рассеяния кварцевой керамики пористостью 7, 9, 10 и 11% в диапазоне длин волн 0,6-4,7 мкм.

В Главе 3 автором экспериментальными методами исследуется структура кварцевой керамики, определяются распределения зерен и пор по размерам и на основе полученных данных о ее структуре приводятся некоторые способы математического моделирования оптических свойств кварцевой керамики.

В Главе 4 проведено комплексное исследование структуры кварцевой керамики методами статического лазерного рассеяния, оптической, электронной и атомно-силовой микроскопии, ртутной и газовой порозиметрии и дается описание аналитического подхода к определению оптических свойств. Проведено сравнение полученных результатов показателей рассеяния и поглощения с результатами, определенными в Главе 2 на основе решения обратной задачи переноса излучения. Установлено достаточное близкое сходство результатов обоих подходов.

Наконец, в Главе 5 описан пример применения полученных в предыдущих главах спектральных оптических параметров и структурных параметров пластины кварцевой керамики для решения задачи радиационно-кондуктивного переноса в ней тепла и приведены результаты этих расчетов, полученные при помощи программного пакета ANSYS FLUENT™.

Результаты расчета температуры и теплового потока для слоя кварцевой керамики толщиной 10 мм по модели радиационно-кондуктивного теплопереноса сравниваются с расчетом при помощи моделей эффективной и кондуктивной теплопроводности. Показано, что разница температуры конструкции ЛА с температурой нагреваемой поверхности кварцевой пластины для модели радиационно-кондуктивного и модели чисто кондуктивного теплопереноса



существенно зависит от режима нагрева (стационарного или квазистационарного) и может достигать 200 К при нагреве внешней поверхности до 2000 К. Это означает, что диапазон прогнозируемой температуры конструкции с помощью предлагаемой в диссертации Миронова Р.А. модели расчета может быть на 200 К, меньше, чем прогнозируемый по модели только кондуктивного теплопереноса, т.е. толщина теплозащитной пластины кварцевой керамики на конструкции ЛА может быть несколько уменьшена.

Кроме того в этой главе численно также показано, что путем увеличения размеров пор тепловой поток в максимумах частичной прозрачности кварцевой теплозащиты может быть снижен на ~60%.

Таким образом, в результате проведенных Мироновым Р.А. исследований выполнена поставленная цель с теоретически показанным достижением положительного эффекта. При этом основными **новыми теоретическими результатами исследований**, вытекающими из содержания автореферата и диссертации можно признать:

- метод и результаты численного исследования влияния распределения по размерам пор в кварцевой керамике на распределение температур и тепловых потоков в слое материала в условиях нестационарного радиационно-кондуктивного теплопереноса;

- предлагаемый перечень оптических характеристик кварцевой керамики различной пористости в широком спектральном диапазоне, необходимый и достаточный для решения задач радиационно-кондуктивного теплопереноса в строгой постановке на основе уравнения переноса излучения;

- предложенные расчетно-экспериментальные методики определения спектральных показателей поглощения и рассеяния частично прозрачных материалов (кварцевой керамики), основанные на приближенных асимптотических решениях уравнения переноса излучения, методах Монте-Карло и инвариантного погружения с использованием матричной формы уравнения инвариантного погружения в квадратурах, позволяющей ускорить численное решение УПИ;

- результаты экспериментального исследования влияния пористости кварцевой керамики на спектральную и температурную зависимости излучательной способности в спектральном диапазоне 0,4-18 мкм и температурном диапазоне 20-1500°C.

**Основными недостатками** рассматриваемой научной работы Миронова Р.А. являются:

1. Отсутствие сравнения результатов расчета перепада температуры между внешней нагреваемой и внутренней поверхностями керамической плитки с учетом механизма радиационно-кондуктивного теплопереноса с данными эксперимента по нагреву её образца, например, воздействием постоянного теплового потока. Наличие такой информации повысило бы степень доверительности к полученным в работе результатам и выводам. Например, остаётся неясным ответ на вопрос



увеличивает ли наличие пор в кварцевой теплозащите теплопроводимость такой теплозащиты или уменьшает, повышая её теплоизолирующее свойство.

2. Выводы о результатах работы, сформулированные автором, носят скорее характер достаточно длинного перечисления всего того, что выполнено в работе, а не отражают в полной мере основные, более важные по теоретической и практической значимости её результаты. Поэтому предлагается в заключение его доклада на защите в диссертационном совете, для лаконичности, отметить только практически значимые достигнутые результаты.

Однако отмеченные недостатки не умаляют достоинств самой диссертации.

Таким образом, диссертация Миронова Романа Александровича является законченной научно-квалификационной работой, в которой содержится решение актуальной задачи, относящейся к направлению расчетно-экспериментальных исследований оптических свойств и теплофизических характеристик материалов тепловой защиты конструкций авиационной и ракетно-космической техники, соответствует требованиям п. 28 «Положения о порядке присуждения ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор, Миронов Роман Александрович, заслуживает присуждения искомой ученой степени по специальности 01.04.07 – Физика конденсированного состояния.

Отзыв подготовил Финченко Валерий Семёнович, доктор технических наук, специальность 05.07.03 – Прочность и тепловые режимы летательных аппаратов, ведущий научный сотрудник отдела по научной работе Акционерного общества «Научно-производственное объединение им. С.А. Лавочкина», 141400, г. Химки, Московская область, ул. Ленинградская, д. 24, тел. +7 915 090 1044, valsemfi@yandex.ru. Не возражаю против обработки моих персональных данных.

/В.С Финченко/

Дата 12.11.2019

Подпись Финченко Валерия Семёновича удостоверяю

Заместитель генерального директора по научной работе

профессор, доктор технических наук

/С.Н. Шевченко/