

УДК 536.24

На правах рукописи

Баринов Дмитрий Яковлевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕСТРУКЦИИ  
ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ ИЗ  
ПОРИСТЫХ УГЛЕРОД-КЕРАМИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.07.03 – «Прочность и тепловые режимы летательных  
аппаратов»

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук



Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана» (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель:

**Просунцов Павел Викторович**

доктор технических наук, доцент, профессор кафедры ракетно-космических композитных конструкций МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Официальные оппоненты:

**Страхов Валерий Леонидович**

доктор технических наук, профессор, помощник генерального директора по науке, АО «Центральный Научно-исследовательский институт специального машиностроения»

**Нетелев Андрей Викторович**

кандидат технических наук, доцент кафедры 601 «Космические системы и ракетостроение», Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)

Ведущая организация:

Федеральное государственное унитарное предприятие «Центральный аэрогидродинамический институт имени профессора Н.Е. Жуковского», г. Жуковский

Защита диссертации состоится «\_\_» \_\_\_\_ 2020 г. в 14:30 на заседании диссертационного совета Д 212.141.22, при Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005 г. Москва, Госпитальный переулок, дом 10, факультет Специального машиностроения МГТУ им. Н.Э. Баумана, аудитория 407м.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана <http://www.bmstu.ru>

Автореферат разослан «\_\_» \_\_\_\_ 2020 года.

Ваш отзыв в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, просьба направлять по адресу: 105005, г. Москва, 2-я Бауманская улица, дом 5, стр.1, МГТУ им. Н.Э. Баумана, ученому секретарю диссертационного совета Д 212.141.22.

Учёный секретарь  
диссертационного совета Д 212.141.22,  
к.т.н., доцент

А.Ю. Луценко

## **ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ**

**Актуальность темы исследования.** В настоящее время в ряде стран ведутся работы по созданию нового поколения космических летательных аппаратов с более высокой, чем у существующих, весовой эффективностью. Это достигается за счет применения передовых конструктивно-технологических и материаловедческих решений. Новые летательные аппараты должны иметь большую массу выводимого полезного груза и время автономного полета на околоземных орбитах и при полетах к другим небесным телам. В повышении весовой эффективности летательного аппарата заметную роль играет масса тепловой защиты. К перспективным материалам тепловой защиты относятся углерод-керамические композиционные материалы с переменной пористостью, имеющие высокую термохимическую стойкость и хорошие механические характеристики. Они состоят из углеродных волокон с оболочкой из карбида кремния. Экспериментальная отработка теплозащитных материалов и оценка их термохимической стойкости сопряжена с необходимостью проведения дорогостоящих стендовых испытаний в условиях, приближенных к эксплуатационным. Использование методов математического моделирования тепло- и массопереноса позволит значительно сократить сроки и стоимость отработки систем тепловой защиты летательных аппаратов. Для обоснованного выбора углерод-керамических композиционных материалов в тепловой защите летательных аппаратов необходимо углубленное изучение всей совокупности физико-химических процессов, протекающих в материале. Однако в настоящее время физические и математические модели, позволяющие определять температурное состояние и фазовый состав углерод-керамических композиционных материалов в процессе деструкции и учитывающие особенности микроструктуры материала, отсутствуют.

Таким образом, создание новых физической и математической моделей, позволяющих детально изучить поведение углерод-керамических композиционных материалов в процессе деструкции и сделать выводы о возможности их применения в системах тепловой защиты многоразовых летательных аппаратов является актуальной задачей.

**Целью диссертационной работы** является определение возможности многоразового применения теплозащитных покрытий летательных аппаратов из пористых углерод-керамических композиционных материалов на основе многомасштабного моделирования прогрева и деструкции.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Провести анализ физических процессов, происходящих в пористых углерод-керамических композиционных материалах с плотностью  $1000 \div 2000 \text{ кг}/\text{м}^3$  при их прогреве и деструкции, сформулировать многомасштабные физическую и математическую модели тепло- и массопереноса, учитывающие изменение температуры, состава и давления окружающей газовой среды.

2. Создать программный комплекс для многомасштабного моделирования тепло- и массопереноса в пористых углерод-керамических композиционных

материалах, позволяющий определять нестационарные температурные поля и фазовые составы представительных элементов объема и элементов конструкции.

3. Комплексно исследовать теплофизические характеристики пористых углерод-керамических композиционных материалов различной плотности и их компонент во всем диапазоне температур эксплуатации.

4. Провести стендовые испытания образцов пористых углерод-керамических композиционных материалов и элемента конструкции в условиях, приближенных к эксплуатационным.

5. Установить зависимости характеристик деструкции пористых углерод-керамических композиционных материалов от плотности, температуры и давления окружающей газовой среды, верифицировать их по данным эксперимента, сформулировать рекомендации по рациональному использованию пористых углерод-керамических композиционных материалов в теплозащитных покрытиях летательных аппаратов.

**Объектом исследования** являются пористые углерод-керамические композиционные материалы, состоящие из покрытых карбидом кремния углеродных волокон.

**Предметом исследования** является тепло- и массоперенос в пористых углерод-керамических композиционных материалах при их прогреве и деструкции.

**Методы исследования.** В работе используются методы математического моделирования, для решения системы уравнений которой на языке программирования C++ был разработан оригинальный многомасштабный программный комплекс DMA, позволяющий проводить анализ температурно-фазового состояния материала с учетом микроструктуры и параметров набегающего потока. Для обеспечения программного комплекса DMA исходными данными проведены лабораторные исследования теплофизических характеристик и стендовые испытания образцов из пористых углерод-керамических композиционных материалов.

#### **Научная новизна диссертационной работы:**

1. Разработаны физическая и математическая модели тепло- и массопереноса в представительных элементах объема пористых углерод-керамических композиционных материалов с плотностью  $1000\div2000 \text{ кг}/\text{м}^3$ , состоящих из покрытых карбидом кремния углеродных волокон, и элементах конструкции из них, учитывающие изменение температуры, состава и давления окружающей газовой среды.

2. Расчетным путем определены зависимости характеристик деструкции пористых углерод-керамических композиционных материалов от их плотности, температуры и давления окружающей газовой среды.

3. Выполнен анализ влияния температуры и давления окружающей газовой среды на скорость деструкции теплозащитных покрытий из пористых углерод-керамических композиционных материалов. Показано, что при увеличении температуры скорость деструкции нелинейно возрастает, при этом повышение давления окружающей газовой фазы сначала ведет к росту скорости

деструкции, а затем снижению, что определяется динамикой протекания процессов.

**Практическая значимость диссертационной работы:**

1. Разработан оригинальный программный комплекс DMA, основанный на методе конечных элементов, предназначенный для решения двухмерных задач тепло- и массопереноса в пористых углерод-керамических композиционных материалах на микро-, мезо- и макроуровне и позволяющий определять температурные поля и фазовый состав образцов и элементов конструкций.

2. Экспериментально исследованы теплофизические характеристики пористых углерод-керамических композиционных материалов с различной плотностью и их компонентов во всем диапазоне температур эксплуатации.

3. Отдельные результаты исследований использовались в АО «Композит» при выполнении научно-исследовательских работ по созданию материалов теплозащитного покрытия перспективного космического аппарата.

**Рекомендации по внедрению.** Результаты диссертационной работы могут быть рекомендованы к применению при проектировании элементов тепловой защиты в АО «Композит», ПАО «РКК «Энергия» им. С.П. Королева, АО «НПО Лавочкина», а также в учебном процессе в курсах лекций, посвященных моделированию процессов тепло- и массопереноса в теплоагруженных конструкциях ракетно-космической техники из композиционных материалов.

**Достоверность и обоснованность** результатов обеспечивается использованием фундаментальных физических законов, известных математических зависимостей и методов, верификацией программного комплекса по результатам проведения серии расчетов модельных задач, хорошим согласием результатов моделирования в разработанном программном комплексе с экспериментальными данными, полученными при стендовых испытаниях.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Математическая модель тепло- и массопереноса в представительных элементах объема пористых углерод-керамических композиционных материалов, учитывающая реальную микроструктуру материала, включая процессы исчезновения и возникновения фаз материала.

2. Программный комплекс DMA, позволяющий проводить моделирование температурного и фазового состояния представительных элементов объема пористых углерод-керамических композиционных материалов и определять характеристики деструкции.

3. Результаты численного моделирования деструкции пористых углерод-керамических композиционных материалов различной плотности в условиях, приближенных к эксплуатационным, и зависимости скоростей деструкции от температуры и давления окружающей среды.

**Личный вклад соискателя.** Соискателем разработаны физическая и математическая модели тепло- и массопереноса в представительных элементах объема пористых углерод-керамических композиционных материалов с учетом

особенностей деструкции всех компонентов материала. Алгоритм экономичного численного решения этой задачи реализован в разработанном автором программном комплексе DMA и верифицирован. Соискателем проведено исследование теплофизических свойств образцов углерод-керамических композиционных материалов различной плотности. Проведено моделирование прогрева и деструкции пористых углерод-керамических композиционных материалов с различной плотностью, определены эффективные характеристики деструкции в зависимости от температуры и давления окружающей газовой среды. Все основные научные результаты и выводы получены лично автором.

**Апробация работы.** Результаты исследований докладывались и обсуждались на следующих научно-технических конференциях: конференция «Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства» (Москва, 2015, 2017, 2018, 2019, 2020); 12-й международный симпозиум «Передовые технические системы и технологии» (Севастополь, 2016), международная молодежная научная конференция «Теплоперенос в системах обеспечения тепловых режимов энергонасыщенного технического и технологического оборудования» (Томск, 2019).

**Публикации.** Основные положения и результаты диссертационной работы опубликованы в 5 научных статьях, из них 3 в журналах Перечня изданий, рекомендованных ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации, в 2 публикациях, индексируемых в базе данных Scopus, и 5 сборниках тезисов конференций.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы (197 наименований, в том числе 136 на иностранных языках), приложения, 114 рисунков и 14 таблиц.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, поставлены цель и необходимые для ее достижения задачи, определены объект и предмет исследования, сформулированы научная новизна, практическая значимость, предложения по внедрению результатов работы, описаны структура и краткое содержание.

**Первая глава** посвящена анализу физико-химических процессов, физических и математических моделей тепло- и массопереноса в теплозащитных материалах. Показано, что традиционно, начиная с первых космических аппаратов, для защиты силовой конструкции применяются деструктирующие теплозащитные материалы, состоящие из полимерной матрицы и наполнителя в виде углеродных или стеклянных тканей, волокон или сот. Отмечено, что в настоящее время создаются космические аппараты нового поколения, одним из основных требований к которым является возможность их многоразового использования. В связи с этим, в качестве альтернативы для использования в новых космических аппаратах

рассматриваются углерод-углеродные и керамические композиционные материалы, среди которых особое место занимают пористые углерод-керамические композиционные материалы.

Анализ отечественной и зарубежной научно-технической литературы показал, что в большинстве разработанных моделей тепло- и массопереноса теплозащитные материалы рассматриваются как квазизотропные с эффективными характеристиками, зависящими от температуры. Модели такого типа созданы различными авторами, как в нашей стране, так и за рубежом: F.S. Milos, Y.K. Chen, B.E. Deal, A.S. Grove, Y. Hijikata, J. Dec, H. Mohammadiun, T. Yin, П.В. Никитин, Ю.В. Полежаев, К.Г. Омельченко, В.М. Юдин, А.Г. Беда, Е.А. Кудлович, Ф.Б. Юрьевич, В.В. Горский, О.М. Алифанов, А.В. Ненарокомов, А.М. Гришин и др. К настоящему времени разработаны программные пакеты для решения двух- и трехмерных задач тепло- и массопереноса.

Отмечено, что для высокотемпературных теплозащитных материалов необходимо учитывать реальную микроструктуру и характеристики каждой фазы композиционного материала и принимать во внимание физико-химическое взаимодействие между ними. Перспективным при моделировании является многомасштабный подход, рассматривающий материал на нескольких масштабных уровнях: микроуровне, мезоуровне и макроуровне. Многомасштабные математические модели широко развивались такими авторами, как Ю.И. Димитриенко, J. Lachaud, J.C. Ferguson, F. Panerai, N.N. Mansour, N. Liu, J. Wei, T.A. Parthasarathy и др. За рубежом создан комплекс программ, предназначенный для многомасштабного моделирования термоокислительной деструкции углерод-углеродных композиционных материалов и волокнистых материалов на полимерной основе (PATO, RuMa), которые недоступны в России. Показано, что использование для анализа тепло- и массопереноса коммерческих конечно-элементных пакетов ограничено сравнительно узким кругом решаемых задач.

**Во второй главе** диссертации сформулированы физическая и математическая модели для описания тепло- и массопереноса в углерод-керамических композиционных материалах, а также алгоритм их численного решения.

Для построения моделей применен многомасштабный подход, в соответствии с которым изучаемый объект рассматривается на нескольких масштабных уровнях. Выделяется микроуровень, имеющий характерный размер  $10\div20$  мкм, мезоуровень –  $100\div200$  мкм и макроуровень – более 1 мм, при этом проводится последовательный анализ с определением эффективных характеристик материала.

Рассматривается пористый углерод-керамический композиционный материал, состоящий из углеродных волокон со средним диаметром 20 мкм с покрытием из карбида кремния (Рисунок 1). Толщина карбида кремния изменяется от 1 до 8 мкм при увеличении эффективной плотности материала от 1200 до 1800 кг/м<sup>3</sup>. При изготовлении углерод-керамических композиционных материалов происходит подпрессовка преформы, при которой углеродные

волокна ориентируются в одной плоскости, что дает возможность перейти к двухмерной постановке задачи.

К рассматриваемым физико-химическим процессам относятся: радиационно-кондуктивный теплообмен в слое пористого материала, окисление карбида кремния с образованием конденсированного диоксида кремния, сублимация диоксида кремния, диффузия газообразных продуктов через пленку конденсированного диоксида кремния, а также через микропоры и микротрешины в карбиде кремния, окисление углеродных волокон с образованием газообразных продуктов, проникновение жидкой фазы вглубь пористого материала.

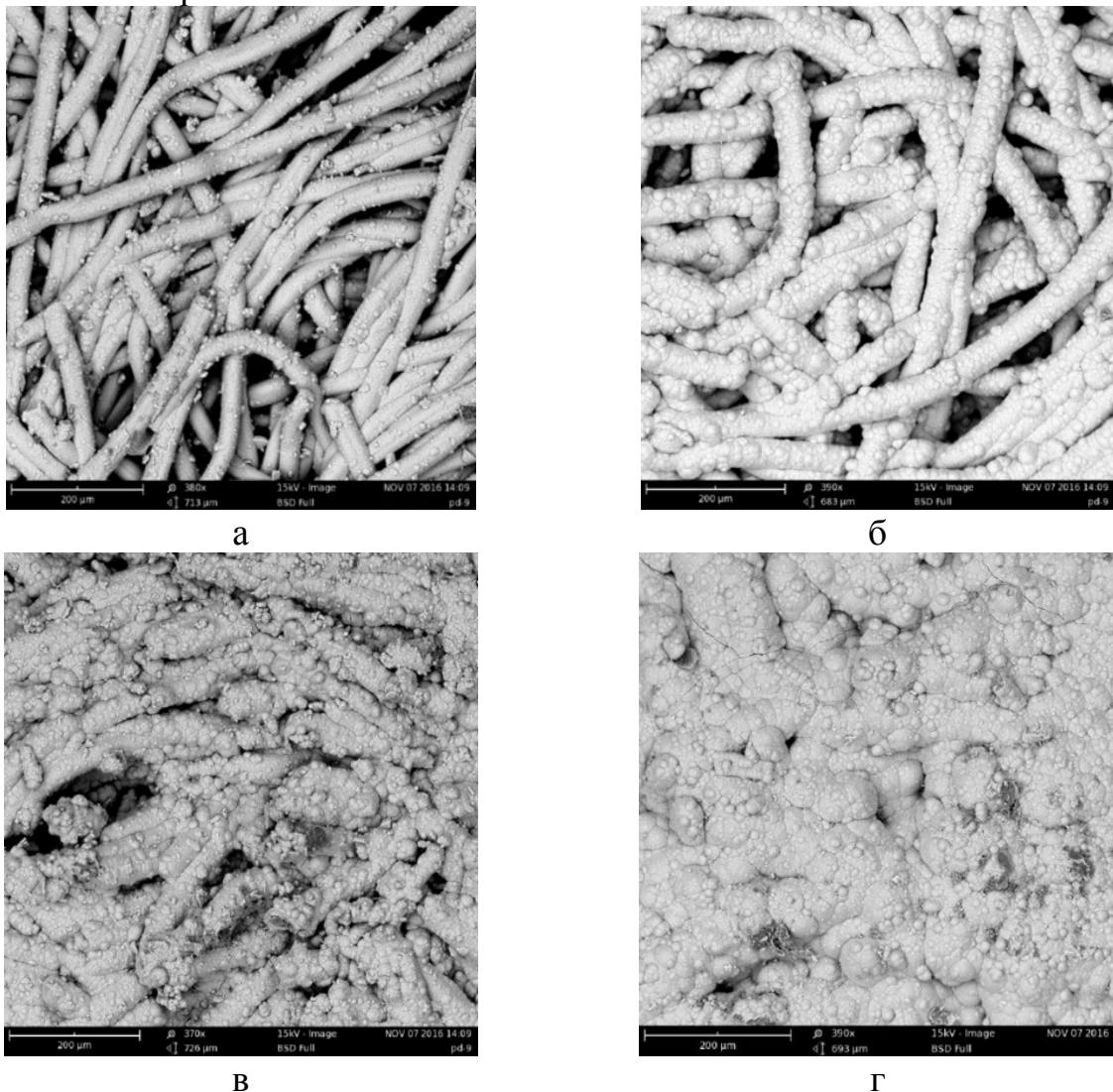


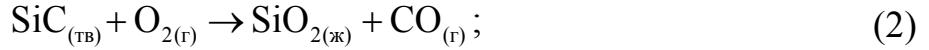
Рисунок 1. Пористые углерод-керамические композиционные материалы различной плотности  
а – 1200 кг/м<sup>3</sup>; б – 1400 кг/м<sup>3</sup>; в – 1600 кг/м<sup>3</sup>; г – 1800 кг/м<sup>3</sup>

В основе математической модели теплопереноса лежит нестационарное уравнение теплопроводности (1) с начальными и граничными условиями, а также условиями стыка на границах смежных областей.

$$\rho_{s,p} c_{s,p} \frac{\partial T}{\partial \tau} = \operatorname{div}(\lambda_\Sigma \cdot \operatorname{grad} T) + Q_p, \quad (1)$$

где  $\rho_{s,p}$  – плотность твердого материала, кг/м<sup>3</sup>;  $c_{s,p}$  – удельная теплоемкость твердого материала, Дж/(кг·К);  $\lambda_\Sigma$  – теплопроводность твердого материала и газообразных продуктов, Вт/(м·К);  $T$  – температура, К;  $\tau$  – время, с;  $Q_p$  – энталпия деструкции, Дж/кг.

Гетерогенное химическое взаимодействие карбида кремния и углерода и кислородом происходит в соответствии с реакциями (2, 3).



Для описания окисления карбида кремния и углерода используется уравнение Аррениуса (4, 5).

$$G_{ox,SiC} = \frac{2}{3} \cdot \rho \cdot \frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} \cdot M_{SiC} \cdot B_{ox,SiC} \cdot \exp\left(-\frac{E_{ox,SiC}}{R \cdot T_g}\right); \quad (4)$$

$$G_{ox,C} = 2 \cdot \rho \cdot \frac{C_{O_2}}{M_{O_2}} \cdot M_C \cdot B_{ox,C} \cdot \exp\left(-\frac{E_{ox,C}}{R \cdot T_g}\right), \quad (5)$$

где  $G_{ox,SiC}$  – массовая скорость окисления карбида кремния, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $G_{form,SiO_2}$  – массовая скорость образования диоксида кремния, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\rho$  – плотность газовой фазы, кг/м<sup>3</sup>;  $M_i$  – молярная масса  $i$ -го вещества, кг/моль;  $C_i$  – массовая концентрация  $i$ -го вещества;  $B_{ox}$  – предэкспоненциальный множитель;  $E_{ox}$  – энергия активации, Дж/кг;  $R$  – универсальная газовая постоянная, Дж/(моль·К);  $T$  – температура, К.

Диффузионный массоперенос описывается законом Фика, в соответствии с которым скорость массообмена зависит от концентраций компонентов смеси газов на внешней поверхности (индекс «w») и на границе между карбидом и диоксидом кремния (индекс «g») (6).

$$J_{i,SiO_2} = D(p_e, M_{w,g}, T_{w,g}) \cdot \frac{\rho_g \cdot C_{i,g} - \rho_w \cdot C_{i,w}}{\delta_{SiO_2}}, \quad (6)$$

где  $J_{i,SiO_2}$  – проекция вектора диффузионного массового расхода  $i$ -го газообразного вещества через пленку диоксида кремния на нормаль к поверхности, кг/с;  $D(p_e, M_{w,g}, T_{w,g})$  – коэффициент бинарной газовой диффузии, м<sup>2</sup>/с;  $\delta_{SiO_2}$  – толщина пленки конденсированного диоксида кремния, м;  $M_{w,g}$  – молярная масса газовой фазы, кг/моль;  $T_{g,w}$  – полусумма температур в пограничном слое и слое между карбидом и диоксидом кремния, К;  $p_e$  – давление газа в пограничном слое, Па.

Для описания скорости сублимации диоксида кремния записываются балансы массы элемента кремния (7, 8).

$$G_{sub,SiO_2,g} \cdot \frac{M_{Si}}{M_{SiO_2}} = G_g \cdot \Theta_{Si,g} + D \cdot \frac{(\Theta_{Si,g} - \Theta_{Si,w})}{\delta_{SiO_2}}. \quad (7)$$

$$G_{sub,SiO_2,w} \cdot \frac{M_{Si}}{M_{SiO_2}} = \left( G_{sub,SiO_2,w} + \beta \right) \cdot \Theta_{Si,w} + D \cdot \frac{(\Theta_{Si,w} - \Theta_{Si,g})}{\delta_{SiO_2}}, \quad (8)$$

где  $G_{sub,SiO_2,g,w}$  – массовая скорость сублимации, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\Theta_{Si,g,w}$  – массовая концентрация вещества кремния;  $G_g$  – массовая скорость конвективного движения газа, кг/(м<sup>2</sup>·с);  $\beta$  – коэффициент массообмена в пограничном слое, кг/(м<sup>2</sup>·с).

Для замкнутой системы диффузно серых тел уравнение теплового баланса излучения k-й площадки имеет вид (9).

$$\sum_{j=1}^N \left( \frac{\delta_{kj}}{\varepsilon_j} - \varphi_{k-j} \cdot \frac{1-\varepsilon_j}{\varepsilon_j} \right) \cdot \frac{Q_{pez,j}}{F_j} = \sum_{j=1}^N (\delta_{kj} - \varphi_{k-j}) \cdot \sigma \cdot T_j^4, \quad (9)$$

где  $Q_{pez,i}$  – результирующий тепловой поток, излучаемый i-й поверхностью, Вт;  $F_i$  – площадь i-й поверхности, м<sup>2</sup>;  $\varepsilon_i$  – излучательная способность i-й поверхности,  $\varphi_{ij}$  – взаимный угловой коэффициент площадок i и j;  $\sigma$  – постоянная Стефана-Больцмана, Вт/(м<sup>2</sup>·К<sup>4</sup>);  $q_{nad,i}$  и  $q_{\varphi,i}$  – плотности падающего и эффективного тепловых потоков, Вт/м<sup>2</sup>,  $\delta_{kj}$  – символ Кронекера.

Для решения системы уравнений построенной математической модели применен численный метод конечных элементов, реализованный в оригинальном многомасштабном программном комплексе DMA. Для моделирования подвижной границы применен метод отслеживания границы раздела фаз. Для оптимизации времени проведения расчетов программа содержит алгоритм, позволяющий корректировать временной шаг по времени в зависимости от максимального изменения температуры и степени превращения материала между итерациями.

**В третьей главе** диссертации представлены методики и результаты экспериментальных исследований всего комплекса теплофизических характеристик углерод-керамических композиционных материалов и их компонентов в диапазоне температур от 20 до 1700 °С, для чего применялись термоаналитические методы исследований: импульсный метод, дифференциальная сканирующая калориметрия, метод гидростатического взвешивания и газовая пикнометрия. Результаты исследований теплоемкости и теплопроводности материалов приведены на Рисунке 2. Также методом термогравиметрического анализа исследована скорость уноса массы материалов. Установлено, что в окислительной среде материал является стабильным до температуры 600÷700 °С, при которой начинается деструкция углеродных волокон, в инертной среде – до температуры ~1330 °С.

Оценка термохимической стойкости углерод-керамических композиционных материалов проводилась при испытаниях образцов в режиме ступенчатого нагрева до температуры 1720 °С в потоке воздушной плазмы на установке ВГУ-4 (ИПМех РАН), при этом давление в испытательной камере составляло 30 кПа. Исследование, проведенное на растровом микроскопе, показало, что в зависимости от плотности материала наблюдается различная

микроструктура фронтальной поверхности образцов после испытаний: застывшая пленка диоксида кремния, пустые карбидокремниевые оболочки, выгоревшие углеродные волокна, микротрешины (Рисунок 3).

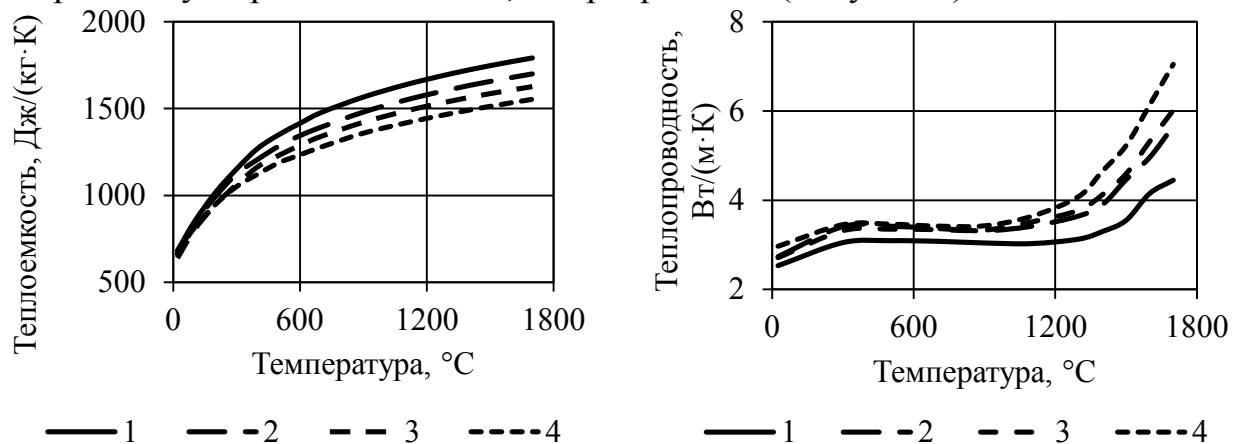


Рисунок 2. Зависимости теплофизических характеристик пористых углерод-керамических материалов от температуры  
 1 –  $1200 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 2 –  $1400 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 3 –  $1600 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; 4 –  $1800 \text{ кг}/\text{м}^3$

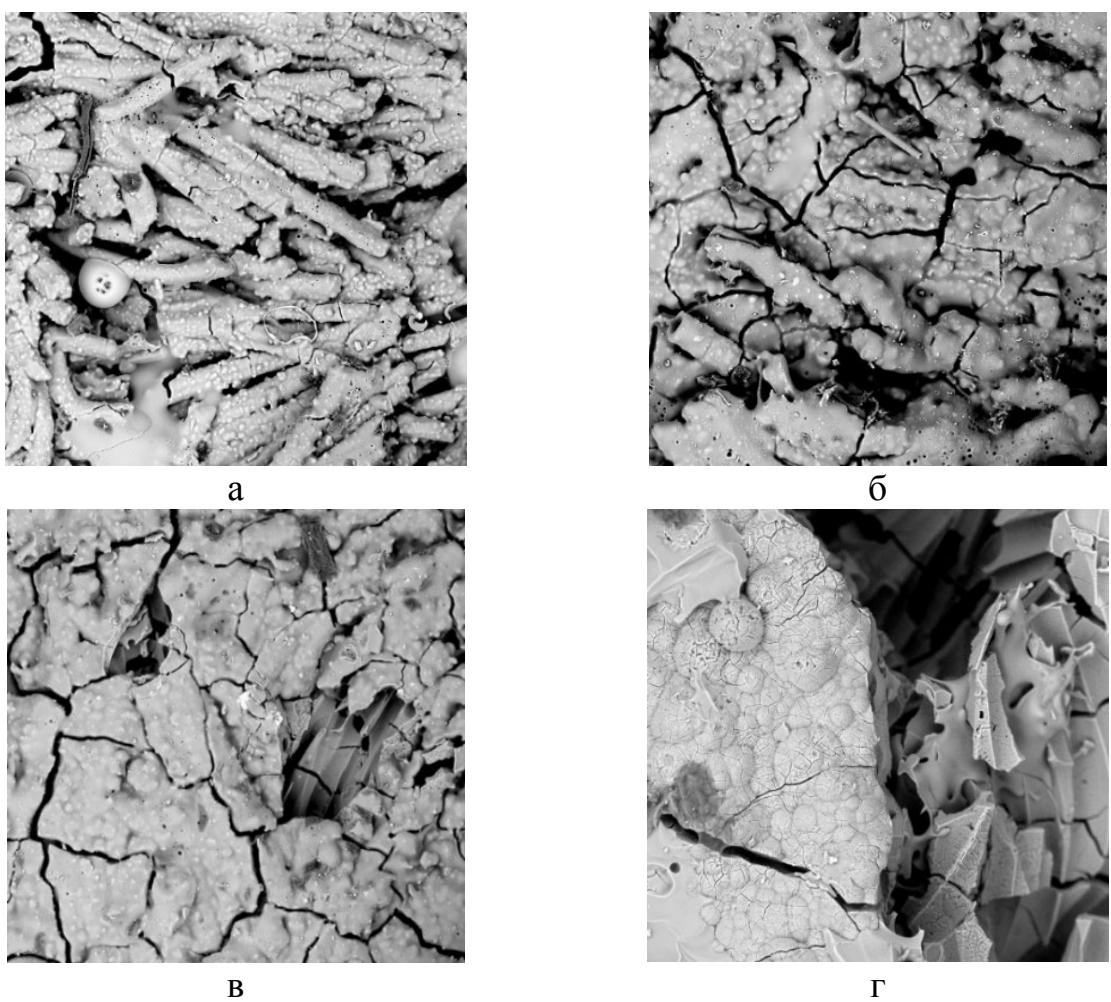


Рисунок 3. Микроструктура поверхности пористых углерод-керамических композиционных материалов различной плотности  
 а –  $1200 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; б –  $1400 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; в –  $1600 \text{ кг}/\text{м}^3$ ; г –  $1800 \text{ кг}/\text{м}^3$

Также исследованы микроструктура бокового среза образцов материалов с плотностью 1200 и 1600 кг/м<sup>3</sup> (Рисунок 4). Установлено, что по толщине образца имеют место три характерные зоны: поверхностная, заканчивающаяся на глубине 30÷50 мкм и характеризующаяся застывшей пленкой диоксида кремния, выгоревшими углеродными волокнами и увеличенной толщиной карбида кремния, промежуточная, заканчивающаяся на глубине 1000÷1300 мкм, содержащая частично окисленные оболочки из карбида кремния и выгоревшие углеродные волокна, и глубинная, в которой полностью сохранилась структура исходного материала.

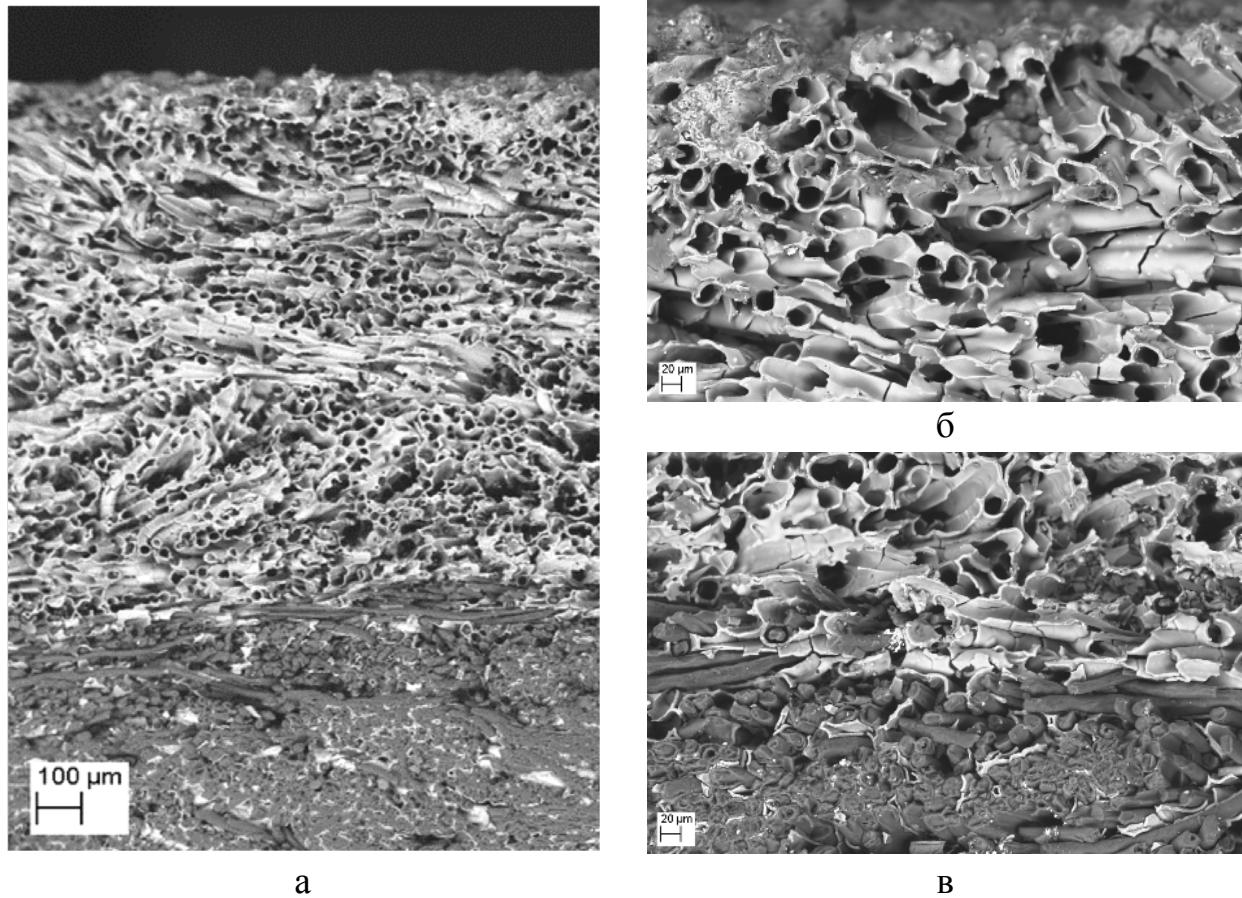


Рисунок 4. Микрофотография бокового среза образца материала с плотностью 1600 кг/м<sup>3</sup>

а – общий вид; в – граница поверхностной и промежуточной зон; в – граница промежуточной и глубинной зон

**В четвертой главе** диссертации приведены результаты расчетно-теоретического определения эффективных скоростей и энтальпий деструкции пористых углерод-керамических композиционных материалов в зависимости от их плотности, температуры и давления газовой фазы.

Для проведения моделирования на основе реальной микроструктуры материала были построены представительные элементы объема микро- и мезоуровня. Представительный элемент объема микроуровня представляет собой квадратную область размером 50×50 мкм, содержащую одиночное углеродное волокно с карбидокремниевым покрытием и окружающую газовую

фазу, а представительный элемент объема мезоуровня – область с размером  $200 \times 200$  мкм, содержащую группу углеродных волокон с покрытиями из карбида кремния и межволоконную газовую фазу. Характерный вид представительного элемента объема мезоуровня для материала с плотностью  $1600$  кг/м<sup>3</sup> показан на Рисунке 5.

Оценка температурного состояния образца в процессе испытаний позволила сделать допущения о малости перепада температуры и квазистационарном режиме теплообмена в представительном элементе объема.

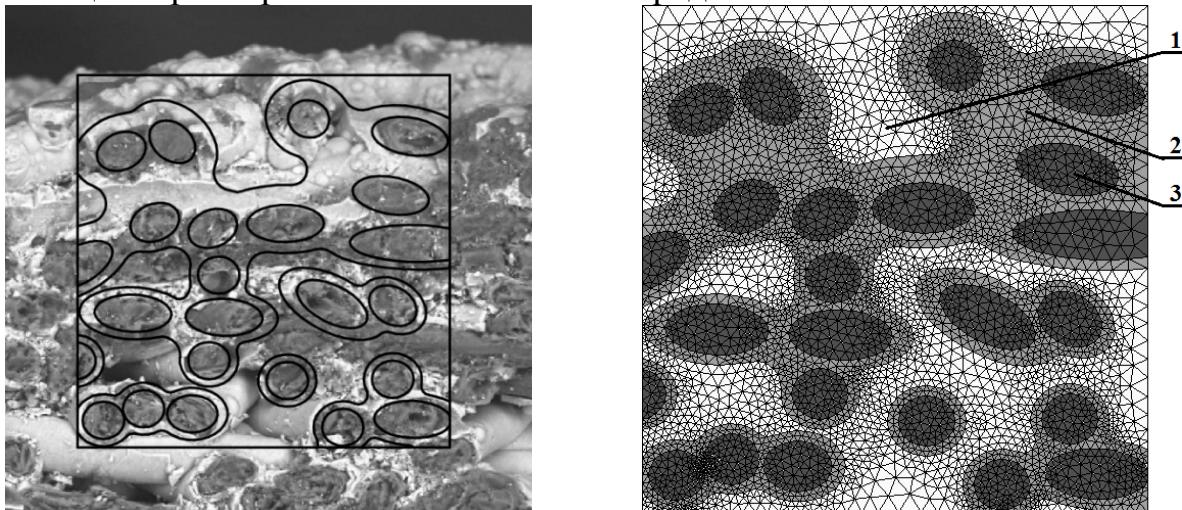


Рисунок 5. Построение представительных элементов объема  
 а – реальная микроструктура материала;  
 б – представительный элемент объема мезоуровня  
 1 – газовая фаза; 2 – карбид кремния;  
 3 – углеродные волокна

В результате моделирования деструкции представительного элемента объема микроуровня установлено, что физическая и математическая модели и программный комплекс DMA корректно описывают физико-химические процессы термоокислительной деструкции углерод-керамических композиционных материалов. Имеет место окисление карбида кремния с образованием диоксида кремния на поверхности, сублимация диоксида кремния, диффузия газообразных продуктов через пленку конденсированного диоксида кремния к нижележащим слоям карбида кремния и углерода.

Для моделирования деструкции были выбраны представительные элементы объема мезоуровня углерод-керамических композиционных материалов с плотностью от  $1200$  до  $1800$  кг/м<sup>3</sup> при температурах от  $1500$  до  $2100$  °С и давлениях газовой фазы  $10$ ,  $30$  и  $50$  кПа. В результате моделирования определены фазовые составы представительных элементов объема и найдены значения эффективных скоростей и энталпий деструкции углерод-керамических композиционных материалов в зависимости от плотности материала, температуры и давления газовой фазы.

Можно сделать вывод, что при повышении температуры увеличиваются скорости окисления карбида кремния и сублимации диоксида кремния, что

вызывает нелинейный рост скорости деструкции углерод-керамических композиционных материалов (Рисунок 6, а). Давление окружающей газовой фазы определяет соотношение между скоростями окисления и сублимации. При низком давлении (10 кПа) на поверхности карбидокремниевого покрытия волокон образуется достаточно тонкая пленка конденсированного диоксида кремния. Скорость деструкции углерод-керамических композиционных материалов в этом случае определяется скоростью окисления карбида кремния (Рисунок 6, б). С увеличением давления газовой фазы (до 30 кПа) значительно возрастает скорость деструкции, причем рост скорости окисления карбида кремния превосходит рост скорости сублимации диоксида кремния, что приводит к образованию и накоплению на поверхности пленки диоксида кремния. При увеличении толщины пленки диоксида кремния затрудняется диффузия кислорода к нижележащим слоям, что ведет к снижению скорости окисления карбида кремния. Дальнейшее увеличение давления газовой фазы (до 50 кПа) ведет к незначительному уменьшению скорости деструкции.

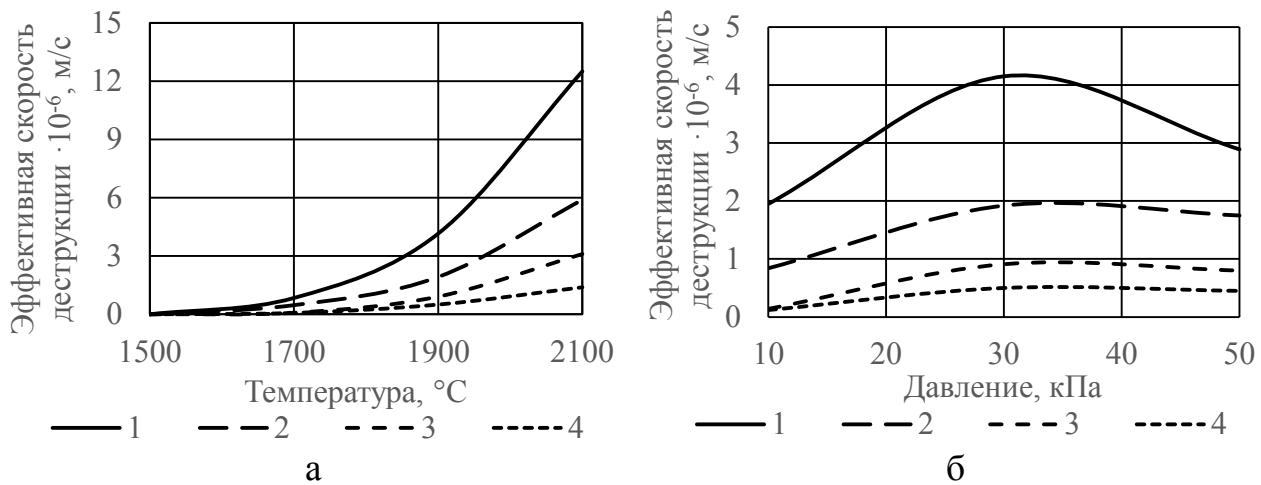


Рисунок 6. Зависимости эффективной скорости деструкции углерод-керамического композиционного материала с плотностью: 1 – 1200 кг/м<sup>3</sup>; 2 – 1400 кг/м<sup>3</sup>; 3 – 1600 кг/м<sup>3</sup>; 4 – 1800 кг/м<sup>3</sup>  
а – от температуры при давлении 30 кПа; б – от давления при температуре 1900 °С

При уменьшении плотности материала скорость деструкции значительно возрастает из-за небольшой толщины защитного карбидокремниевого покрытия, которое быстро деструктирует, обнажая углеродные волокна (Рисунок 7). Незащищенные волокна при взаимодействии с кислородом деструктируют с образованием газообразных продуктов реакции.

При низких температурах (до 1700 °С) скорости окисления карбида кремния и сублимации диоксида кремния невелики, и основной вклад в процесс деструкции вносит окисление углеродных волокон с выделением большого количества теплоты (Рисунок 8). При увеличении температуры увеличивается вклад эндотермических реакций окисления карбида кремния и диоксида кремния, при этом для некоторых расчетных случаев интегральный тепловой эффект деструкции носит эндотермический характер.

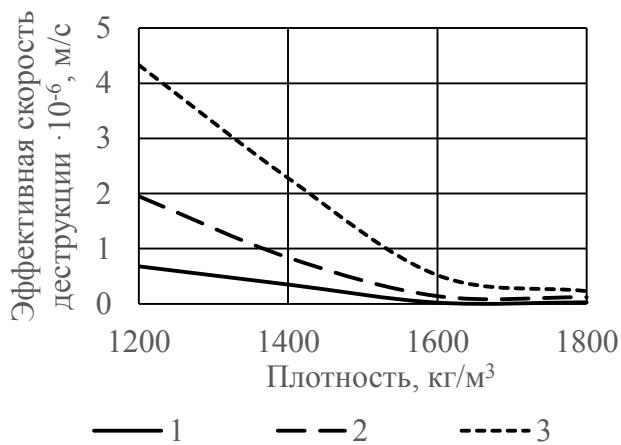


Рисунок 7. Зависимости эффективной скорости деструкции от плотности материала при температуре 1700 °C и давлении газовой фазы:  
1 – 10 кПа; 2 – 30 кПа; 3 – 50 кПа

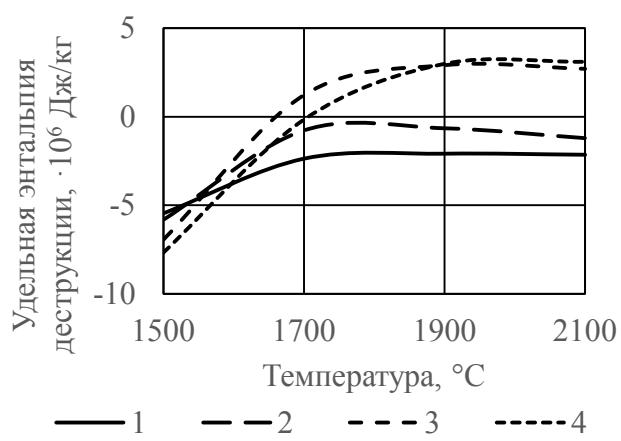


Рисунок 8. Зависимости удельной энталпии деструкции от температуры при давлении 30 кПа для материала с плотностью:  
1 – 1200 кг/м<sup>3</sup>; 2 – 1400 кг/м<sup>3</sup>;  
3 – 1600 кг/м<sup>3</sup>; 4 – 1800 кг/м<sup>3</sup>

Сравнение массового уноса, определенного после испытаний в потоке воздушной плазмы на установке ВГУ-4 и полученного при моделировании деструкции, показало хорошее согласие результатов, при этом отличие не превышает 16 %.

**Пятая глава** диссертации посвящена испытаниям конструктивно подобного образца из пористого углерод-керамического композиционного материала на установке ВГУ-3 и сравнению с результатами моделирования.

На установке ВГУ-3 (ИПМех РАН) испытывался конструктивно подобный цилиндрический образец из пористого углерод-керамического материала с диаметром 96 мм и высотой 200 мм. В процессе испытаний температура фронтальной поверхности составляла 1720 °C, а давление в камере 30 кПа.

В программном комплексе DMA проводилось моделирование прогрева и деструкции данного образца. При этом использовалась зависимость эффективной скорости деструкции от температуры и давления газовой фазы, полученная расчетным путем ранее в главе 4. Установлено, что определенное при моделировании значение линейного уноса материала в окрестности критической точки (1,9 мм) хорошо согласуется с результатами, полученными при стендовом испытании (2,3 мм).

Для оценки возможности применения пористых углерод-керамических материалов в составе тепловой защиты многоразовых космических аппаратов проводилось моделирование прогрева и деструкции элемента тепловой защиты, состоящего из слоя углерод-керамического композиционного материала, волокнистой теплоизоляции и металлической оболочки. Использовались значения тепловых нагрузок, характерные для спуска космического аппарата типа «Союз» в атмосфере Земли. Проводилась серия последовательных расчетов, при этом результаты моделирования предыдущего варианта

становились исходными данными для последующего. При исходной толщине слоя углерод-керамического композиционного материала 6,35 мм линейный унос за каждый полетный цикл составил 0,6 мм при выполнении ограничений на температуру металлической оболочки. Таким образом, можно сделать вывод о возможности применения пористых углерод-керамических композиционных материалов для тепловой защиты многоразовых космических аппаратов.

**В общих выводах и заключении** сформулированы основные выводы по диссертационной работе и даны рекомендации по использованию пористых углерод-керамических композиционных материалов для тепловой защиты многоразовых летательных аппаратов.

**В приложении** диссертации приведены результаты стендовых испытаний образцов из углерод-керамических композиционных материалов в потоках воздушной плазмы на установках ВГУ-3 и ВГУ-4 (ИПМех РАН).

## **ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

1. Разработаны новые многомасштабные физическая и математическая модели комбинированного тепло- и массопереноса в пористых углерод-керамических композиционных материалах переменной плотности. Модели учитывают все основные физико-химические и теплообменные процессы: радиационно-кондуктивный теплообмен в слое пористого материала, окисление карбида кремния кислородом с образованием конденсированного диоксида кремния, сублимацию диоксида кремния, гетерогенное взаимодействие углеродных волокон с кислородом, диффузию газообразных продуктов из пограничного слоя через пленку расплава, проникновение жидкой пленки вглубь пористого материала.

2. Разработан оригинальный программный комплекс DMA, впервые позволяющий решать двухмерные нестационарные задачи тепло- и массопереноса в пористых углерод-керамических композиционных материалах на микро-, мезо- и макроуровне и определять температурные поля и фазовый состав представительных элементов объема материала и элементов конструкций.

3. Для обеспечения программного комплекса DMA необходимыми исходными данными с помощью термоаналитических методов определены теплофизические характеристики углерод-керамических композиционных материалов с плотностью 1200, 1400, 1600 и 1800 кг/м<sup>3</sup> и их компонентов во всем диапазоне рабочих температур (до 1700 °C). Методом термогравиметрического анализа исследована скорость деструкции углерод-керамических композиционных материалов и углеродной преформы материала в зависимости от температуры.

4. Проведены испытания образцов из углерод-керамических композиционных материалов различной плотности в режиме ступенчатого нагрева до температуры 1720 °C в потоке воздушной плазмы на установке ВГУ-4. Установлено, что при воздействии высокотемпературного потока воздушной плазмы на поверхности образуется пленка диоксида кремния, при этом выгорают углеродные волокна, оставляя пустые карбидокремниевые оболочки.

5. Впервые с помощью программного комплекса DMA проведено моделирование деструкции представительных элементов объема микро- и мезоуровня углерод-керамических композиционных материалов с плотностью 1200, 1400, 1600 и 1800 кг/м<sup>3</sup>, в результате чего определены зависимости скоростей и удельных энталпий деструкции от давления окружающей газовой фазы, температуры и плотности материала. При этом установлено:

– при повышении температуры скорость уноса нелинейно увеличивается, что вызвано ростом скорости окисления карбида кремния и сублимации диоксида кремния;

– повышение давления газовой фазы ведет к росту толщины пленки диоксида кремния, так как скорость окисления карбида кремния увеличивается быстрее скорости сублимации диоксида кремния. При этом рост толщины пленки диоксида кремния ведет к снижению скорости диффузии кислорода к слоям карбида кремния, приводящему к уменьшению скорости уноса при дальнейшем повышении давления;

– снижение плотности материала вызывает значительный рост скорости уноса из-за уменьшения толщины защитного карбидокремниевого покрытия, которое быстро деструктирует и обнажает углеродные волокна.

6. Достоверность результатов моделирования подтверждена сравнением экспериментальных и расчетных значений массового и линейного уноса для образцов из пористых углерод-керамических композиционных материалов. Установлено, что разница между расчетными и экспериментальными значениями потери массы для образцов, прошедших испытания на установке ВГУ-4, не превышает 16 %. Величины расчетного и экспериментально измеренного линейного уноса конструктивно подобного образца после испытаний в потоке воздушной плазмы на установке ВГУ-3 составляют 1,9 и 2,3 мм соответственно.

7. Моделирование прогрева и деструкции типового элемента тепловой защиты, состоящего из слоя углерод-керамического композиционного материала, волокнистой теплоизоляции и силовой металлической оболочки, при спуске в атмосфере Земли с низкой околоземной орбиты показало принципиальную возможность использования пористых углерод-керамических композиционных материалов для создания теплозащитных покрытий многоразовых космических аппаратов.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

1. Баринов Д.Я., Просунцов П.В. Моделирование теплопереноса в слое разлагающегося материала теплозащитного покрытия спускаемого аппарата // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2016. №6. С. 22–32. (0,9 п.л./0,5 п.л.).
2. Просунцов П. В., Баринов Д. Я. Разработка математической модели прогрева и разрушения углерод-керамических композиционных материалов // Тепловые процессы в технике. 2017. Т. 9. № 7. С. 311–318. (0,92 п.л./0,5 п.л.).
3. Баринов Д.Я., Просунцов П.В. Моделирование деструкции углерод-керамического композиционного материала // Тепловые процессы в технике. 2018. Т. 10. №5-6. С. 198–206. (1 п.л./0,5 п.л.).

4. Просунцов П.В., Баринов Д.Я., Богачев Е.А. Исследование термоокислительной деструкции материала на основе углеродных волокон // Инженерный журнал: наука и инновации. 2019. № 7(91). 14 с. DOI: 10.18698/2308-6033-2019-7-1899. (0,81 п.л./0,4 п.л.).
5. Изучение динамики прогрева деструктирующего материала методом математического моделирования температурных полей / Баринов Д.Я. [и др.] // Труды ВИАМ: электрон. науч.-техн. журн. 2019. № 8. Ст.12 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 16.08.2019). DOI: 10.18577/2307-6046-2019-0-8-109-118. (1,06 п.л./0,8 п.л.).
6. Barinov D.Ya., Prosuntsov P.V. Modelling the heating and ablation of carbon-ceramic composite materials of various density // AIP Conference Proceedings 2135, 020008. 2019. 5 p. DOI: 10.1063/1.5120645. (0,45 п.л./0,2 п.л.).
7. Barinov D.Ya., Prosuntsov P.V. Modelling of destruction of carbon-ceramic composite materials with variable density // AIP Conference Proceedings 2171, 170011. 2019. 9 p. DOI: 10.1063/1.5133322. (0,94 п.л./0,45 п.л.).
8. Просунцов П.В., Баринов Д.Я. Моделирование прогрева и разрушения теплозащитного покрытия спускаемых аппаратов капсулного типа // Актуальные проблемы российской космонавтики. Труды XXXIX академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. 2015. С. 27. (0,06 п.л./0,03 п.л.).
9. Баринов Д.Я., Просунцов П. В. Разработка математической модели прогрева и разрушения углерод-керамических композиционных материалов // XLI Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов. 2017. С. 46–47. (0,06 п.л./0,03 п.л.).
10. Баринов Д.Я. Моделирование прогрева и уноса углерод-керамического композиционного материала // Актуальные проблемы российской космонавтики: Труды XLII академических чтений по космонавтике, посвященных памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства. 2018. С. 32. (0,06 п.л./0,03 п.л.).
11. Баринов Д.Я., Просунцов П.В. Моделирование деструкции углерод-керамических композиционных материалов различной плотности // XLIII Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов: в 2 т. 2019. Т. 1. С. 47–48. (0,13 п.л./0,06 п.л.).
12. Баринов Д.Я., Просунцов П.В. Анализ комбинированного радиационно-кондуктивного теплообмена при деструкции пористого углерод-керамического композиционного материала тепловой защиты // XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королёва и других выдающихся отечественных ученых – пионеров освоения космического пространства: сборник тезисов: в 2 т. 2020. Т. 1. С. 119–210. (0,15 п.л./0,07 п.л.).