



Акционерное общество  
«Государственный ракетный центр  
имени академика В.П.Макеева»  
(АО «ГРЦ Макеева»)  
Российская Федерация, Челябинская область,  
г. Миасс

✉ Тургоякское шоссе, 1, г. Миасс,  
Челябинская область, 456300  
☎ 351-3/28-63-70 📠 351-3/55-51-91; 24-12-33  
Телеграфный адрес: «Рубин» 624013  
E-mail: src@makeyev.ru  
ОКПО 07549733, ОГРН 1087415002168  
ИНН/КПП 7415061109/742150001

От 23.03.2016 № 102/208

На № \_\_\_\_\_ от \_\_\_\_\_

УТВЕРЖДАЮ

И.О. генерального конструктора



П.В. Петров

## ОТЗЫВ

ведущей организации Акционерного общества «Государственный ракетный центр имени академика В.П. Макеева» на диссертацию Рулевой Евгении Валерьевны на тему «Теоретическое и экспериментальное исследование влияния массового уноса на тепловую защиту при пульсации газового потока», представленную к защите на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника

Создание конструкций из теплозащитных материалов, способных работать в области высоких температур и больших тепловых потоков, является важной проблемой, стоящей перед разработчиками авиационной, космической, ракетной и других видов техники. Прямое (натурное) экспериментальное исследование теплофизических и газодинамических процессов, протекающих, например, при входе космического аппарата в атмосферу, представляет огромные трудности и требует больших экономических затрат.

Поэтому тема диссертации Рулевой Е.В., посвященная математическому и физическому моделированию задач тепловой защиты применительно к космическим и другим летательным аппаратам, является **актуальной**.

Во введении формулируется актуальность темы, цель работы, ее практическая ценность, новизна, излагается краткое содержание диссертации.

В первой главе приводится обзор литературы по теме работы; обосновывается необходимость и направление исследований.

Во второй главе: 1) на основе модифицированной математической модели пористого реагирующего тела А.М. Гришина произведен расчет характеристик термохимического разрушения углепластика с учетом воздействия малых энергетических возмущений. Показано, что вибрации композиционных материалов могут приводить к интенсификации межфазного теплообмена между связующим и наполнителем, при этом появляется дополнительный, вибрационный «транспорт» тепла вглубь материала. Происходит более раннее разложение связующего и фильтрация продуктов газификации через поры поверхности материала, а температура стенки уменьшается.

2) Модифицирована математическая модель инертного пористого тела Гришина – Якимова для расчета характеристик теплообмена в системах пористого охлаждения при наличии пульсаций газа-охладителя. Найдено, что восприимчивость систем пористого охлаждения обусловлена появлением дополнительных нормальных и касательных напряжений трения при фильтрации газа-охладителя сквозь поры, а также дополнительного переноса тепла вглубь пористой стенки. Последнее приводит к возможности регулировать и управлять гидродинамическими и тепловыми характеристиками таких систем.

В третьей главе разработан и апробирован испытательный комплекс (имеется патент) для изучения систем тепловой защиты при воздействии малых энергетических возмущений. Экспериментально установлено, что системы тепловой защиты на основании вдува газа-охладителя через систему круглых отверстий восприимчивы к воздействию малых энергетических воз-

мущений. В зависимости от выбора типа и интенсивности вибраций процесс теплообмена можно как интенсифицировать, так и ослаблять. Таким образом, появляется возможность управлять гидродинамическими характеристиками течения газа вблизи стенки, а также процессом теплообмена.

В четвертой главе экспериментально подтверждено, что наличие тангенциальных вибраций, действующих на модель головной части летательного аппарата с активной защитой вдувом через проникающую оболочку, позволяет снизить воздействие высокотемпературного набегающего газового потока на 27 %. Для случаев пассивной тепловой защиты экспериментально определено, что нанесение начальной шероховатости на поверхность разрушающихся покрытий приводит к снижению её температуры при последующем уносе массы. При этом отмечается, что скалывание частиц непрореагировавшего материала приводит к снижению эффективности теплозащиты.

**Достоверность** результатов обоснована тестированием при численном решении краевой задачи путем сгущения разностной сетки по пространству и времени, а в некоторых случаях расчет характеристик теплообмена подтвержден качественно и количественно известным экспериментом.

В целом диссертация вносит значительный вклад в развитие моделирования и понимания процессов теплообмена в композиционных материалах при влиянии малых энергетических возмущений.

**Практическая значимость** результатов диссертации обусловлена тем, что полученные в работе теоретико-экспериментальные данные исследований композиционных материалов и систем могут быть использованы при разработке и проектировании новых способов и устройств тепловой защиты конструктивных элементов летательных аппаратов различного типа и перспективных изделий ракетно-космической техники.

По содержанию работы имеются следующие вопросы и **замечания**:

1. Почему не учитывается течение газа-охладителя вдоль пластины по  $y$  (см. рис. 2.2.1), хотя температура изменяется вдоль тела?

2. Из содержания работы недостаточно ясно, насколько обоснованно используется однотемпературная математическая модель при вдуве газа через проницаемую стенку и при фильтрации продуктов пиролиза углепластика к поверхности.

3. Не указаны условия выполнения линейного закон Дарси для течения газообразных продуктов фильтрации при термохимическом разрушении в теплозащитном материале.

4. Почему на рис. 2.3.1 не приведен результат расчета при  $v = 0$ ?

5. Из содержания работы не ясно, какое действие оказывает дополнительный вибрационный коэффициент теплопроводности  $\lambda'_4$  формулы (2.3.15) в процентах по отношению к  $\lambda_{4y}$ .

6. Не везде указан диапазон чисел Re при проведении экспериментов.

7. Почему автор считает показания пирометра достаточно верными, ведь они снимаются через струю плазмы? При этом из содержания работы не ясно, по какой причине увеличение шероховатости сначала приводит к снижению (при  $R_z = 1 \cdot 10^{-4}$  м), а затем, при  $R_z > 5 \cdot 10^{-4}$  м, к росту температуры поверхности. Одной из причин этого может быть вскрытие менее нагретых слоев при механическом уносе частиц с поверхности, а механический унос не влечёт повышения эффективности тепловой защиты, как это и утверждается в диссертации.

8. Не указан личный вклад соискателя в разработку патентов.

### **Заключение**

Несмотря на отмеченные выше недостатки, представленная диссертация отвечает требованиям п. 9 Положения о присуждения ученых степеней, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук и соответствует паспорту научной специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, а её автор Рулева Евгения Валерьевна заслуживает присуждения ей ученой степени кандидата физико-математических наук.

Отзыв на диссертацию Е.В. Рулевой обсужден на совещании отдела аэрогазодинамики и теплообмена и одобрен на заседании секции № 1 научно-технического совета.

Протокол № 2 от 18 марта 2016 г.

Заместитель генерального  
конструктора, председатель  
секции № 1 НТС

С.Ф. Молчанов

Начальник отдела аэрогазодинамики  
и теплообмена, доктор  
физико-математических наук

В.И. Хлыбов

Главный научный сотрудник отдела  
аэрогазодинамики и теплообмена,  
доктор физико-математических  
наук, доцент

Ю.А. Мокин

Подписи С.Ф. Молчанова, В.И. Хлыбова и Ю.А. Мокина удостоверяю  
И.о. главного ученого секретаря  
кандидат физико-математических наук



И.И. Валов

Я, Мокин Юрий Александрович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Рулевой Евгении Валерьевны, и их дальнейшую обработку.

Я, Хлыбов Владимир Ильич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Рулевой Евгении Валерьевны, и их дальнейшую обработку.

Я, Молчанов Сергей Филиппович, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с защитой диссертации Рулевой Евгении Валерьевны, и их дальнейшую обработку.