

Отзыв

официального оппонента на диссертационную работу
Рулёвой Евгении Валерьевны

«Теоретическое и экспериментальное исследование влияния массового уноса на тепловую защиту при пульсации газового потока», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника.

В настоящее время, тепловая защита используется в ракетных двигателях и в наиболее теплонапряженных частях летательных аппаратов (ЛА). Решение задачи тепловой защиты от воздействия набегающего высокоэнтальпийного потока является крайне сложно и важной фундаментальной и прикладной задачей. При термической нагрузке на теплозащитное покрытие происходит много взаимосвязанных между собой процессов. В реальных условиях системы тепловой защиты эксплуатируются при воздействии на них малых энергетических возмущений: вибрации стенки, акустические колебания, пульсации газовых потоков. При этом характеристики теплообмена могут существенно изменяться. Поэтому актуальность диссертационной работы не вызывает сомнения. Объектом исследований выступают элементы активной и пассивной тепловой защиты из различных материалов; а так же восприимчивость таких теплозащитных систем к малым энергетическим возмущениям.

Работа состоит из введения, четырех глав, заключения и приложения. Текст диссертации и автореферата изложен ясным и грамотным языком. Автореферат работы в полной мере отражает содержание диссертации.

Во **введении** работы представлен обзор литературы с привлечением отечественных и зарубежных работ по теме исследования. Выполнен анализ современных экспериментальных и численных подходов к описанию тепловой защиты теплонагруженных элементов ЛА. Также во введении обоснована актуальность темы диссертации, приведены цели и задачи диссертационного исследования, научная новизна, практическая значимость, данные об апробации работы и положения, выносимые на защиту.

Первая глава приведен анализ проблем тепловой защиты тел при их движении с большими скоростями. Приведено описание и анализ основных известных способов тепловой защиты, который позволил выбрать направление дальнейших исследований. Представлено описание и анализ основных известных способов тепловой защиты, анализ которых позволил выбрать направление дальнейших экспериментальных и численных исследований.

Во **второй главе** выполнено математическое моделирование процессов теплообмена в системах тепловой защиты различного типа. Проведено сравнение экспериментальных данных с результатами аналитического решения Ю.В. Полежаева для систем пористого охлаждения при сильных вдувах. Реализована модификация математической модели Гришина–Якимова для расчета

характеристик теплообмена (ТМО) в системах пористого охлаждения при наличии пульсаций подачи газа-охладителя, а так же модифицирована математическая модель пористого реагирующего тела А.М. Гришина для нахождения характеристик термохимического разрушения теплозащитного материала с учетом воздействия пульсаций на тепловую защиту.

Третья глава включает в себя описание экспериментального стенда для изучения ТМО между поверхностью ЛА и высокотемпературным газовым потоком, приведены методики определения характеристик теплозащитных материалов, таких как температура защищаемой стенки, величина теплового потока в стенку и убыль массы образцов с течением времени. Приведены результаты экспериментального исследования взаимодействия высокотемпературного набегающего потока с композиционными ТЗМ. Представлены результаты экспериментального исследования процесса ТМО проницаемых затупленных тел, обтекаемых высокотемпературным газовым потоком с учетом вдува и при воздействии гармонических вибраций. Показана восприимчивость систем пористого охлаждения к МЭВ на примере фильтрационных характеристик и коэффициента лобового сопротивления.

В четвертой главе представлены новые способы повышения эффективности тепловой защиты головных частей ЛА. Выполнены экспериментальные исследования влияния линейных вибраций оболочки ЛА на эффективность охлаждения, способа повышения эффективности активной тепловой защиты путем наложения периодических тангенциальных вибраций на защищаемую стенку и способа повышения эффективности тепловой защиты с использованием разрушающихся теплозащитных покрытий.

Достоверность полученных результатов обеспечивается применением математически обоснованных методов решения; использованием подробных расчетных сеток и получением сеточной сходимости решений, тестированием численных методов на экспериментальных данных.

Степень апробации работы отвечает существующим требованиям ВАК. Основные результаты диссертационной работы представлены в 4 статьях из списка, рекомендованного ВАК, получен 1 патент на полезную модель и 3 патента на изобретения.

Среди основных научных результатов диссертанта отметим:

1. Модифицированы математические модели Гришина-Якимова для нахождения характеристик теплообмена в системах пористого охлаждения при наличии пульсаций газа-охладителя и Гришина для расчета характеристик термохимического разрушения теплозащитных материалов с учетом воздействия малых возмущений и найдено, что с ростом частоты пульсаций поведение расчетной температуры количественно согласуется с экспериментальными данными.

2. Разработан и апробирован испытательный комплекс для изучения систем тепловой защиты при защите рабочих поверхностей с использованием различных материалов от высокоэнтальпийного воздействия набегающего потока при наличии малых энергетических возмущений и без них.
3. Экспериментально показано, что системы тепловой защиты на основании вдува газа-охладителя через систему круглых отверстий восприимчивы к воздействию малых возмущений. В зависимости от выбора типа и интенсивности вибраций процесс ТМО можно как интенсифицировать так и ослаблять. Установлено, что устранение неустойчивых режимов течения охладителя вблизи защищаемой стенки линейными вибрациями головной части повышает тепловую защиту устройства. Определено, что повышение эффективности тепловой защиты с использованием разрушающихся покрытий возможно при выполнении их поверхности шероховатой.

Эти данные, несомненно, имеют как фундаментальный, так и прикладной интерес при разработке современных методов тепловой защиты рабочих поверхностей ЛА от воздействия высокоэнтальпийных течений газа.

По работе имеются следующие замечания:

1. Во второй главе диссертации идет речь о сопоставлении экспериментальных данных с результатами расчетов по теоретической модели Ю.В. Полежаева. При этом методика проведения экспериментов совершенно не описана. Из выводов к этой главе становится понятно, что это эксперименты диссертанта. Сначала даже не понятно, чьи это измерения? Необходимо было подробно описать метод измерений.
2. На стр. 40 говорится, что для больших вдувов ($B > 2$), которые были реализованы в экспериментах, подход Ю.В. Полежаева можно упростить до однотемпературной модели. Далее на стр. 42 при описании рис. 2.1.2 говорится, что «...кривая, полученная экспериментально, лежит ниже, чем рассчитанная по однотемпературной стационарной одномерной модели Ю.В. Полежаева для сильных вдувов $B > 2$. Однако для умеренных и слабых вдувов согласование теории и эксперимента удовлетворительно.» Аналогично дается описание рис. 2.1.4 на стр. 43. На наш взгляд, здесь имеется очевидное противоречие.
3. В параграфе 2.2 на стр. 48 и 49 дается описание физико-математической модели тепломассообмена в системах пористого охлаждения. Уравнение неразрывности одномерное и стационарное, уравнение энергии двумерное и нестационарное, а уравнение движения вырождается в соотношение для продольного градиента давления. Почему указанные уравнения разного типа? Необходимо объяснить физику использования данного подхода и его ограничения.
4. В Главе 2 говорится о модификации модели тепломассообмена в системах пористого охлаждения Гришина-Якимова и модели пористого реагирующего

тела Гришина. Не приведено в тексте диссертации четкого описания в чем конкретно заключаются данные модификации и каковы области применимости указанных подходов. Было бы гораздо нагляднее провести расчеты по модифицированной и исходным моделям и сделать по полученным результатам соответствующие выводы. Иначе трудно сделать заключение о целесообразности этих модификаций.

5. В диссертации очень сжато представлена информация по численному решению и валидации алгоритма при рассмотрении, приведенных в диссертации задач. Нет информации по размерам ячеек по пространству и временному шагу, по числам Куранта. Нет графиков по тестированию численного алгоритма. На стр. 51 приведена информация по погрешностям (диапазон изменения от 9.5 до 2.1 %), но что это за ошибки не очень понятно.

Высказанные замечания, в целом, не влияют на общую положительную оценку работы. Представленная диссертация Рулёвой Евгении Валерьевны «Теоретическое и экспериментальное исследование влияния массового уноса на тепловую защиту при пульсации газового потока» является законченным научным исследованием и **обладает** научной новизной и актуальностью. Считаю, что представленная работа **удовлетворяет** требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.14 – Теплофизика и теоретическая теплотехника, а ее автор, Рулёва Евгения Валерьевна, **заслуживает** присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по данной специальности.

Официальный оппонент
д. ф.-м. н., проф. РАН
в.н.с.

Пахомов
Максим Александрович

ИТ им. С.С. Кутателадзе СО РАН
22.03.2016

Сведения об организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт теплофизики им. С.С. Кутателадзе
Сибирского отделения Российской академии наук
Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1
Тел.: 8 (383) 330-70-50, e-mail: aleks@itp.nsc.ru, <http://www.itp.nsc.ru>
Лаборатория термогозодинамики