

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Чаплыгина Алексея Владимировича «Экспериментальное исследование теплообмена пластин в струях высокоэнтальпийных газов высокочастотных индукционных плазмотронов», представленной на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 «Механика жидкости, газа и плазмы»

Актуальность темы диссертации обусловлена необходимостью создания надежной тепловой защиты возвращаемых космических аппаратов. Высокие тепловые нагрузки на поверхность возвращаемого космического аппарата предъявляют особые требования к материалам облицовки его внешней поверхности. Для исследования физических механизмов взаимодействия высокоскоростных высокотемпературных потоков с поверхностью теплозащитного материала и получения данных о теплозащитных свойствах таких материалов необходимо проведение экспериментальных исследований с применением электродуговых и индукционных плазмотронов.

Научная новизна. Впервые проведено систематическое исследование теплообмена пластин в струях высокоэнтальпийных газов, истекающих из щелевых сопел ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4. В диапазоне значений плотности теплового потока $60 - 3750 \text{ кВт/м}^2$ на различных моделях получены новые экспериментальные данные о характеристиках теплообмена пластин с высоко- и низкокatalитической поверхностями для различных режимов обтекания дозвуковыми высокоэнтальпийными струями.

Впервые проведены систематические исследования особенностей режимов работы мощных ВЧ-плазмотронов применительно к исследованию струйных дозвуковых течений индукционной плазмы и их теплообмена с плоскими поверхностями моделей при использовании щелевых сопел.

На основе разработанного метода визуализации течения воздушной плазмы у поверхности пластины под углом атаки, основанного на вдуве в

пограничный слой ацетилена или пропана, получены картины обтекания пластины при различных углах атаки, выявлено отклонение линий тока от продольного направления, обусловленное остаточной закруткой потока на выходе из щелевого сопла.

Реализован метод спектральной пирометрии, позволивший определить температуру нагреваемой поверхности образца из теплозащитного материала с белым низкокatalитическим покрытием, измерение которой традиционными методами оптической пирометрии затруднено из-за выраженной зависимости спектральной излучательной способности поверхности от длины волны.

Продемонстрирован эффект существенного увеличения температуры поверхности, обтекаемой струей диссоциированного воздуха при переходе от участка поверхности с низкокatalитическим покрытием к участку со средnekatalитическим покрытием.

Практическая значимость заключается в получении данных прямых измерений тепловых потоков к плоским поверхностям моделей плиточной теплозащиты орбитального корабля «Буран» с двумя разными покрытиями. Проведено экспериментальное изучение влияния кatalитических свойств ряда металлов, кварца и черного плиточного покрытия на теплообмен водоохлаждаемых и высокотемпературных поверхностей в струйных потоках диссоциированного воздуха, азота и смеси 70% N₂ 30% CO₂. Для решения фундаментальной проблемы моделирования аэродинамического нагрева при входе тел в атмосферу важное практическое значение имеет исследование газодинамической структуры и теплофизических характеристик струйных дозвуковых высокоэнтальпийных течений воздуха в широких диапазонах режимных и конструктивных параметров мощных ВЧ-плазмотронов при использовании щелевых сопел.

Результаты представленного исследования использовались при выполнении научно-исследовательских работ в интересах таких ведущих предприятий авиационно-космической отрасли как ФГУП «ВИАМ», ПАО

РКК «Энергия», АО «ВПК «НПО Машиностроения», АО «Корпорация «МИТ», АО «Композит».

Достоверность результатов диссертации обусловлена физической обоснованностью постановок экспериментальных задач, адекватностью и корректностью проведенных экспериментов, применением общепринятых и апробированных методов измерений в потоках плазмы, использованием в экспериментах двух и более независимых средств измерений, повторяемостью результатов экспериментов, сравнением результатов исследования с данными других авторов.

Диссертационная работа изложена на 138 страницах и состоит из введения, трех глав, заключения, списка литературы и одного приложения.

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, сформулирована цель и практическая значимость работы, изложена научная новизна представляемой работы, описаны методы исследований, сформулированы результаты, выносимые на защиту.

В главе I представлен обзор экспериментальных установок, позволяющих исследовать теплообмен пластин, обтекаемых под углом атаки высокоэнтальпийными газовыми потоками. Проанализированы результаты экспериментов по исследованию теплообмена на плоских пластинах в высокоэнтальпийных струях с использованием индукционных и электродуговых плазмотронов, проведенных в России, США, Европе, Японии и Китае.

Приведено подробное описание конструкции и основных технических параметров уникальных научных установок РФ - индукционных ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4 ИПМмех РАН, на которых выполнено данное исследование. Представлено описание четырех использованных водоохлаждаемых щелевых сопел.

Глава II посвящена исследованию особенностей режимов работы мощных индукционных ВЧ-плазмотронов и течений плазмы при использовании водоохлаждаемых щелевых сопел, устанавливаемых за

разрядным каналом. Исследованы параметры потока в плоских дозвуковых струях воздушной плазмы. Предложен метод визуализации, основанный на вдуве ацетилена или пропана в пограничный слой через инъекционные отверстия. Установлено, что остаточная закрутка потока сохраняется при выходе из щелевого сопла и влияет на обтекание модели.

В главе III приведены результаты исследования теплообмена в дозвуковых струях высокоэнтальпийных газов ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4 при осесимметричном обтекании моделей. Тепловые потоки в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха ВЧ-плазмотронов определялись в области лобовой точки водоохлаждаемой цилиндрической медной модели с помощью проточных калориметров. Зарегистрировано качественное совпадение шкал каталитичности материалов, полученных с использованием двух установок в разных режимах работы.

В дозвуковых струях диссоциированного воздуха для сложной пространственной конфигурации экспериментально исследован эффект сверхравновесного нагрева поверхности с разрывом каталитических свойств. Эффект сверхравновесного нагрева наблюдался при переходе от низкокatalитического участка поверхности пластины к высококatalитическому участку, покрытому хромоникелевой шпинелью, а также при переходе от участка поверхности теплозащитной плитки с низкокatalитическим покрытием к средnekatalитическому участку, покрытому ниобием. При этом скачок температуры на границе двух участков поверхности с различной каталитичностью достигал 400°C , что может быть критическим значением для возвращаемого космического аппарата.

При безусловно положительной оценке диссертационной работы имеется несколько замечаний:

1. Отсутствует сравнение полученных экспериментальных данных о характеристиках теплообмена, полученных в настоящей работе, с данными полученными на других подобных установках и с расчетными данными.

2. Непонятно, проводился ли контроль шероховатости поверхностей, на которых проводились измерения тепловых потоков.

3. В работе не используются безразмерные величины для представления результатов экспериментальных исследований.

4. При описании результатов измерений (рис. 2.16, стр. 50) диссертации не представлена система координат, что затрудняет понимание терминов «левая» или «правая» сторона.

5. Недостаточно подробно исследован и описан метод визуализации течения за счет вдува различных газов (углеводородных соединений).

Приведенные замечания не влияют на высокую оценку научной и практической значимости результатов, изложенных в диссертации.

Принципиальным научным достижением является реализация практической возможности определения геометрических конфигураций и теплофизических параметров экспериментов в высокоэнтальпийных струях ВЧ-плазмотронов, в которых реализуются оптимальные условия нагрева и испытаний на термохимическую стойкость плоских поверхностей образцов теплозащитных материалов. Результаты диссертации, полученные на основе подробного анализа большого объема экспериментальных данных, имеют научную и практическую значимость для дальнейших разработок технологий экспериментального моделирования аэродинамического нагрева с помощью высокоэнтальпийных газодинамических установок.

Надежность и достоверность новых результатов работы подтверждены сравнением измерений динамических давлений тремя водоохлаждаемыми трубками Пито различной геометрии и независимых измерений тепловых потоков проточными калориметрами и нестационарными калориметрическими датчиками.

Автором получены приоритетные научные результаты, как фундаментального, так и прикладного характера. В том числе выявлены особенности процессов теплообмена и нагрева поверхностей, имеющих различные каталитические свойства по отношению к гетерогенной

рекомбинации атомов. Ярко продемонстрирован эффект скачка температуры в струе диссоциированного воздуха (на 400°С) на низкокatalитической поверхности плитки при переходе к участку, покрытому средnekatalитичным ниобием.

Впервые проведена систематическая экспериментальная проработка ключевых аспектов моделирования аэродинамического нагрева в двух различных ВЧ-плазмотронах с применением щелевых сопел. Разработаны методики и сформулированы рекомендации для практики подбора и технической реализации оптимальных рабочих параметров ВЧ-плазмотронов при термохимических испытаниях плоских элементов тепловой защиты. Такая систематическая и детальная экспериментальная проработка ключевых аспектов моделирования аэродинамического нагрева в двух различных ВЧ-плазмотронах проделана впервые, что и определяет принципиальную новизну и научную значимость рассматриваемой диссертации.

Научные и технические подходы, предложенные и реализованные автором, позволяют определить и осуществить в ВЧ-плазмотронах различной мощности условия нагрева элементов поверхностей спускаемых аппаратов, близкие к натурным. Полученные результаты экспериментального моделирования сложного конвективного теплообмена безусловно будут стимулировать дальнейшее развитие экспериментальных и численных исследований струй индукционной низкотемпературной плазмы и их теплообмена с поверхностями элементов тепловой защиты различной геометрии. Диссертация вносит существенный вклад в решение современных экспериментальных задач аэротермодинамики и теплофизики пространственных высокотемпературных течений химически реагирующих газов при наличии теплообмена с кatalитически активными поверхностями различных материалов.

Результаты диссертации достаточно полно изложены в 11 научных публикациях, включая 6 статей в журналах из Перечня ВАК РФ и/или в изданиях, индексируемых в системах цитирования Web of Science и Scopus.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Считаю, что диссертационная работа Чаплыгина А.В. представляет собой законченную диссертационную работу и удовлетворяет требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата наук «Положения о присуждении учёных степеней», утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 № 842 (с изменениями, внесенными постановлением Правительства Российской Федерации от 21.04.2016 № 335). Уровень изложения материала диссертации отражает хорошую подготовленность и высокую квалификацию соискателя.

Выполненное исследование соответствует научной специальности 01.02.05 – Механика жидкости, газа и плазмы, а его автор, Чаплыгин Алексей Владимирович, безусловно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук.

Официальный оппонент Запрягаев Валерий Иванович,
Доктор технических наук, профессор, главный научный сотрудник
лаборатории «Экспериментальной аэрогазодинамики» Федерального
государственного бюджетного учреждения науки Институт теоретической и
прикладной механики им. С.А. Христиановича Сибирского отделения
Российской академии наук (ИТПМ СО РАН), 630090, г. Новосибирск, ул.
Институтская, 4/1, zapr@itam.nsc.ru.

Телефон организации: +7-383-330-42-68.

Адрес официального сайта организации в сети «Интернет»:
<http://www.itam.nsc.ru>.

Адрес электронной почты организации: admin@itam.nsc.ru

Подпись Запрягаева В.И. заверяю:

И.О. Ученого секретаря ИТПМ СО РАН
кандидат физико-математических наук

В. Запрягаев

