

На правах рукописи

Чаплыгин Алексей Владимирович

**Экспериментальное исследование
теплообмена пластин в струях
высокоэнтальпийных газов высокочастотных
индукционных плазмотронов**

Специальность 01.02.05 —
«Механика жидкости, газа и плазмы»

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2021

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,
Колесников Анатолий Федорович

Официальные оппоненты: **Запрягаев Валерий Иванович**,
доктор технических наук, профессор,
Институт теоретической и прикладной механики им. С.А. Христиановича СО РАН,
главный научный сотрудник

Юрченко Ирина Ивановна,
доктор технических наук,
Акционерное общество «Государственный научный центр Российской Федерации «Исследовательский центр имени М.В. Келдыша»,
главный научный сотрудник

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)»

Защита состоится 14 октября 2021 г. в 15:00 часов на заседании диссертационного совета Д002.240.01 при Институте проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН по адресу: 119526, г. Москва, проспект Вернадского, д. 101, к. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИПМех РАН
<http://ipmnet.ru/files/diss/2021/4/Chaplygin-diss.pdf>.

Автореферат разослан _____ 2021 года.

Ученый секретарь диссертационного совета Д002.240.01
при ИПМех РАН,
кандидат физико-математических наук

Сысоева Е. Я.

Общая характеристика работы

Актуальность темы. Важнейшими этапами на пути создания воздушно-космических самолетов и возвращаемых космических аппаратов являются разработка и экспериментальные исследования теплозащитных материалов, способных длительное время противостоять воздействию высокоэнтальпийного газового потока. Велика роль экспериментов в установках, моделирующих натурные условия термохимического взаимодействия диссоциированного потока с поверхностью материалов. В лабораторной практике широко применяются электродуговые и индукционные плазмотроны. Опыт работы с использованием установок этих типов накоплен в России (ЦНИИМаш [1; 2], ЦАГИ им. профессора Н.Е. Жуковского [3; 4], ИПМех РАН [5–7]), США [8; 9] и Европе [10]. Следует отметить, что Россия обладает уникальными компетенциями в части испытаний материалов в струях мощных индукционных ВЧ-плазмотронов и лидирует в этом направлении.

Работы Г.И. Бабата по исследованию безэлектродных разрядов и идея вихревой стабилизации, предложенная Т. Ридом, а также прогресс в разработке отечественных ВЧ-генераторов позволили ИПМех РАН с 1964 года успешно создавать и совершенствовать высокочастотные индукционные плазмотроны серии ВГУ для высокотемпературных газодинамических исследований теплозащитных материалов. Работы на этих установках долгое время велись под руководством М.И. Якушина, основавшего данное научное направление в ИПМех РАН. Теория высокочастотного индукционного разряда в плазмотроне предложена Ю.П. Райзером. Теория локального моделирования аэродинамического нагрева в ВЧ-плазмотроне разработана и развивается А.Ф. Колесниковым. Существенный вклад в экспериментальные исследования на установках серии ВГУ внес А.Н. Гордеев.

ВЧ-плазмотроны ИПМех РАН ВГУ-3 и ВГУ-4 [11] позволяют проводить продолжительные (до 1 часа) эксперименты по исследованию термохимической стойкости образцов в до- и сверхзвуковых струях диссоциированных газов высокой химической чистоты. В данных установках проводятся фундаментальные научные исследования процессов теплообмена поверхности материалов и катализа по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов в диссоциированных потоках воздуха, азота и углекислого газа.

Представленная работа посвящена экспериментальному исследованию новых режимов теплообмена пластины под углом атаки, реализованных в ВЧ-плазмотронах ИПМех РАН с использованием щелевых

сопел. Пластина как объект исследования представляет интерес при моделировании теплообмена боковой поверхности летательного аппарата и в случаях, когда необходимо обеспечить относительно низкий уровень тепловых потоков. Эксперименты с образцами в форме пластин востребованы организациями авиационно-космической отрасли, в особенности при исследованиях теплозащитных материалов для многоразовых возвращаемых космических аппаратов планирующего спуска.

При испытаниях пластины в струях диссоциированных газов, создаваемых плазмотронами ВГУ-3 и ВГУ-4, течение у ее поверхности приобретает сложный пространственный характер, обусловленный геометрией струи и закруткой потока в разрядном канале из-за конструктивных особенностей установок. Задача численного моделирования подобного течения для условий ВЧ-плазмотронов ИПМех РАН до настоящего времени не решена, что делает актуальными вопросы экспериментального исследования режимов теплообмена пластины в струях высокоэнтальпийных газов, истекающих из щелевых сопел ВЧ-плазмотронов, которые ранее систематически не изучались. Такие экспериментальные данные критически важны для корректного планирования работ по исследованию термохимической стойкости образцов материалов в виде пластин и повышения достоверности прогноза поведения тепловой защиты в условиях эксплуатации.

Целью данной работы является экспериментальное исследование теплообмена пластин, обтекаемых под углами атаки струями высокоэнтальпийных газов, истекающими из водоохлаждаемых щелевых сопел с различными размерами выходных сечений, а также экспериментальное исследование особенностей режимов течений, которые реализуются в высокочастотных индукционных плазмотронах ВГУ-3 и ВГУ-4 при использовании щелевых сопел.

Для достижения поставленной цели были решены следующие **задачи**:

1. Проведены экспериментальные исследования особенностей режимов работы высокочастотных плазмотронов и течений плазмы при установке за разрядным каналом щелевых сопел с различными размерами выходных сечений, включающие: определение области существования разряда в канале плазмотрона; измерения динамических давлений в дозвуковых струях диссоциированных газов, формируемых щелевыми соплами; измерения избыточных давлений на плоской поверхности, обтекаемой под различными углами атаки; оценки температуры

- и скорости потока за выходным сечением щелевого сопла для одного из характерных режимов истечения.
2. Разработан и реализован метод визуализации течения воздушной плазмы у поверхности пластины.
 3. Экспериментально исследовано влияние каталитических свойств материалов по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов на тепловой поток к поверхности, нагреваемой в дозвуковых струях диссоциированного воздуха, выбраны эталонные высоко- и низкокatalитические материалы для последующего исследования теплообмена пластин.
 4. Экспериментально исследован теплообмен пластин с высоко- и низкокatalитическими поверхностями, обтекаемых струями высокоэнтальпийных газов при различных углах атаки, давлениях в барокамере установки и мощностях ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию.
 5. В условиях установки ВГУ-4 реализован метод спектральной пирометрии для определения в процессе экспериментов температуры поверхности образцов, излучательная способность которых сильно зависит от длины волны.
 6. Экспериментально исследован эффект сверхравновесного нагрева поверхности с разрывом каталитических свойств в дозвуковой струе диссоциированного воздуха.

Научная новизна:

1. Впервые проведено систематическое исследование теплообмена пластин в струях высокоэнтальпийных газов, истекающих из щелевых сопел ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4. Получены новые экспериментальные данные о режимах теплообмена пластин различных габаритов с высоко- и низкокatalитической поверхностями для широкого спектра режимов обтекания.
2. Существенно расширены диапазоны параметров теплообмена и возможные геометрические конфигурации экспериментов для моделей различной формы и габаритов, исследуемых в ВЧ-плазмотронах ВГУ-3 и ВГУ-4.
3. Предложен оригинальный метод визуализации течения воздушной плазмы у поверхности пластины под углом атаки, основанный на вдуве в пограничный слой ацетилен или пропана. Метод позволил получить картины обтекания пластины при различных углах атаки и выявить систематическое отклонение линий тока из-за остаточной закрутки потока на выходе из щелевого сопла.

4. В условиях установки ВГУ-4 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.
5. Впервые наблюдался эффект сверхравновесного нагрева поверхности пластины в потоке диссоциированного воздуха при переходе от области с низкокatalитическим покрытием к среднекatalитическому участку, покрытому ниобием. Ранее данный эффект преимущественно исследовался с использованием высококatalитических покрытий, таких как платина и хромоникелевая шпинель.

Практическая значимость. Получен и систематизирован большой объем экспериментальных данных для новых режимов теплообмена, которые реализуются в высокочастотных плазмотронах ВГУ-4 и ВГУ-3 при обтекании струями высокоэнтальпийных газов пластины под углом атаки. Эти данные могут быть использованы для планирования испытаний на термохимическую стойкость образцов перспективных высокотемпературных материалов в виде пластин и плиток, что существенно сократит число предварительных экспериментов по отработке соответствующих режимов и повысит качество прогноза поведения материалов тепловой защиты в условиях эксплуатации. Некоторые результаты представленного исследования уже применялись при выполнении научно-исследовательских работ в интересах ведущих предприятий авиационно-космической отрасли (ФГУП «ВИАМ», ПАО РКК «Энергия», АО «ВПК «НПО Машиностроения», АО «Корпорация «МИТ», АО «Композит» и др.) и работ по темам государственных заданий №АААА-А17-117021310383-2 и №АААА-А20-120011690135-5. Результаты работы также могут быть полезны специалистам в области численного моделирования при валидации программных кодов по расчету течений плазмы в проточных трактах высокочастотных индукционных плазмотронов и обтекания моделей различной геометрии неравновесными струями диссоциированных газов.

Методология и методы исследования. Потоки плазмы воздуха и газовых смесей в установках ВГУ-3 и ВГУ-4 мощностью 1 МВт и 100 кВт были получены методом высокочастотного индукционного нагрева. В работе использованы методы определения тепловых потоков, основанные на применении нестационарных калориметрических

датчиков и водоохлаждаемых калориметров. Температура поверхности нагреваемых образцов определялась традиционными методами оптической пирометрии (яркостной и двухцветовой пирометрии), а также методом спектральной пирометрии. Давления в струях плазмы измерялись с использованием водоохлаждаемых трубок Пито. Для визуализации течения у поверхности пластины под углом атаки разработан новый метод, основанный на вдуве в пограничный слой ацетилен или пропана.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Совокупность результатов экспериментальных исследований особенностей режимов работы высокочастотных индукционных плазмотронов и течения плазмы при использовании щелевых сопел, включающая: результаты измерений динамических давлений в дозвуковых струях воздушной плазмы установок ВГУ-3 и ВГУ-4; оценки скорости и температуры за выходным сечением щелевого сопла для одного из характерных режимов работы установки ВГУ-4; результаты измерений избыточных давлений на плоской поверхности, обтекаемой под углом атаки дозвуковыми струями воздушной плазмы; данные о влиянии щелевых сопел на область существования индукционного разряда в плазмотроне ВГУ-4; результаты визуализации течения у поверхности пластины под углом атаки путем вдува в пограничный слой ацетилен или пропана, демонстрирующие систематическое отклонение линий тока от вертикальной оси из-за остаточной закрутки потока на выходе из щелевого сопла плазмотрона ВГУ-4.
2. Результаты экспериментального исследования теплообмена на охлаждаемых поверхностях ряда металлов (меди, серебра, тантала, молибдена, бериллия, ниобия, золота) и кварца в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4.
3. Результаты экспериментального исследования теплообмена медных пластин разных габаритов, теплозащитных плиток и крупногабаритной теплозащитной панели в дозвуковых струях высокоэнтальпийных газов, истекающих из водоохлаждаемых щелевых сопел ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4.
4. Результаты экспериментов по нагреву в дозвуковом потоке диссоциированного воздуха поверхности образца из теплозащитного материала с белым низкокatalитическим покрытием, имеющим выраженную зависимость спектральной излучательной способности поверхности от длины волны. Измерение температуры

поверхности образца традиционными методами оптической пирометрии затруднено. Был использован метод спектральной пирометрии, который позволил определить температуру нагреваемой поверхности и на ее основе сделать оценку интегральной излучательной способности поверхности в условиях эксперимента.

5. Результаты экспериментального исследования эффекта сверхравновесного нагрева поверхности в дозвуковых струях диссоциированного воздуха, наблюдавшегося при переходе от низкокatalитического участка поверхности нагреваемого образца из материала ТЗМК-10 к высококatalитическому участку, дополнительно покрытому хромоникелевой шпинелью, а также при переходе от низкокatalитического участка поверхности теплозащитной плитки орбитального корабля «Буран» к среднекatalитическому участку, покрытому ниобием.

Достоверность результатов диссертации обусловлена строгостью и физической обоснованностью постановок экспериментальных задач, адекватностью и корректностью проводимых экспериментов, применением общепринятых и апробированных методов измерений в потоках плазмы, использованием в экспериментах, где это возможно, двух и более независимых средств измерений, повторяемостью результатов экспериментов, критическим анализом результатов экспериментов с учетом доступных расчетных и экспериментальных данных других авторов.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на всероссийских и международных профильных научных конференциях и семинарах: XXX Научно-техническая конференция по аэродинамике (Московская обл., ЦАГИ, 2019); XII Всероссийский съезд по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики (Уфа, 2019); 13-я Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем» (Москва, 2019); Всероссийская научно-техническая конференция «Современные достижения и тенденции развития в области теплозащитных керамических и металлических композиционных материалов» (Москва, 2019); XLIV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства (Москва, 2020); XXXI Научно-техническая конференция по аэродинамике (Московская обл., ЦАГИ, 2020); XX Международная конференция по методам аэрофизических исследований (Новосибирск, 2020); 14-я Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика

классических и квантовых систем» (Москва, 2020); IV Всероссийская научно-техническая конференция «Высокотемпературные керамические композиционные материалы и защитные покрытия» (Москва, 2020); XLV Академические чтения по космонавтике, посвященные памяти академика С.П. Королева и других выдающихся отечественных ученых-пионеров освоения космического пространства (Москва, 2021).

Личный вклад. Все представленные в настоящей работе научные результаты получены лично автором. Все эксперименты в установках ВГУ-3 и ВГУ-4 были проведены под руководством А. В. Чаплыгина. В работах [А1—А4; А7—А9] постановка задач исследований проводилась А. В. Чаплыгиным совместно с А. Н. Гордеевым, но руководство проведением экспериментов, обработка и анализ их результатов осуществлялись лично автором. Работа [А5] выполнена и опубликована А. В. Чаплыгиным единолично. В работе [А10] А.В. Чаплыгиным выполнены эксперименты по исследованию теплообмена образцов материалов. Автор принимал активное участие в постановке задач и анализе результатов исследований [А6; А11] совместно с А. Н. Гордеевым и А. Ф. Колесниковым, экспериментальная часть работ и подготовка соответствующих разделов публикаций выполнены А. В. Чаплыгиным полностью самостоятельно.

Публикации. Основные результаты по теме диссертации изложены в 11 печатных изданиях, 6 из которых изданы в журналах, рекомендованных ВАК и/или индексируемых Web of Science и Scopus, 5 — в сборниках материалов и тезисах докладов конференций.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и одного приложения. Полный объем диссертации составляет 138 страниц, включая 53 рисунка и 28 таблиц. Список литературы содержит 160 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обоснована актуальность экспериментальных исследований, проводимых в рамках данной диссертационной работы, сформулирована цель, поставлены задачи работы, изложена научная новизна и практическая значимость представляемой работы, описаны методы исследований, сформулированы результаты, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена обзору экспериментальных установок, позволяющих исследовать теплообмен пластин, обтекаемых под углом

атаки диссоциированным газовым потоком. В §1.2 рассмотрены эксперименты в области теплообмена пластин в струях высокоэнтальпийных газов индукционных и электродуговых плазмотронов, проведенные в России, США, Европе, Японии и Китае.

В §1.3 приведено описание уникальных научных установок РФ — ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4, на которых выполнено данное исследование. Основные параметры ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4 представлены в таблице 1. При исследованиях образцов материалов в форме пластин использовались водоохлаждаемые щелевые сопла с размерами выходных сечений: 40×8 мм, 80×15 мм, 120×9 мм и 200×30 мм.

Таблица 1 — Основные параметры высокочастотных индукционных плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4

Параметр	ВГУ-3	ВГУ-4
Подведенная мощность, кВт	1000	100
Анодная мощность, кВт	$90 \div 850$	$12 \div 72$
Частота, МГц	0.44	1.76
Диаметр разрядного канала, мм	150/200	80
Давление в барокамере, гПа	$10 \div 1000$	$6 \div 1000$
Расход рабочего газа, г/с	$4 \div 14$	$1.8 \div 6$
Рабочие газы	Воздух, N ₂	Воздух, N ₂ , O ₂ , CO ₂ , Ar и их смеси, органические газы

Вторая глава посвящена исследованию особенностей режимов работы высокочастотных индукционных плазмотронов и течений плазмы при использовании водоохлаждаемых щелевых сопел, устанавливаемых за разрядным каналом.

Для щелевых сопел с выходными сечениями 40×8 , 120×9 и 80×15 мм проведены эксперименты по исследованию их влияния на область существования разряда в канале плазмотрона ВГУ-4 (§2.2). Установлено, что щелевые сопла не оказывают существенного влияния на границы области существования разряда. Срыв разряда для рассматриваемых сопел происходит при мощности ВЧ-генератора плазмотрона ВГУ-4 по анодному питанию $11 \div 13$ кВт.

В §2.3 приведены результаты экспериментального исследования влияния давления в барокамере на дозвуковую струю воздушной плазмы, истекающую из щелевого сопла с выходным сечением 80×15 мм при постоянных мощности и расходе воздуха. С ростом давления происходит распад струи и ее дальнобойность существенно снижается. Интерес при

испытаниях материалов с применением щелевых сопел представляет область относительно низких давлений (до 100 гПа).

С помощью трубок Пито проведены измерения динамических давлений в дозвуковых струях воздушной плазмы, истекающих из щелевых сопел с выходными сечениями 80×15 мм и 200×30 мм. Динамические давления вдоль оси симметрии струи, истекающей из щелевого сопла 80×15 мм, в зависимости от давления на стенке барокамеры p_t и расстояния до выходного сечения z представлены на рис. 1.

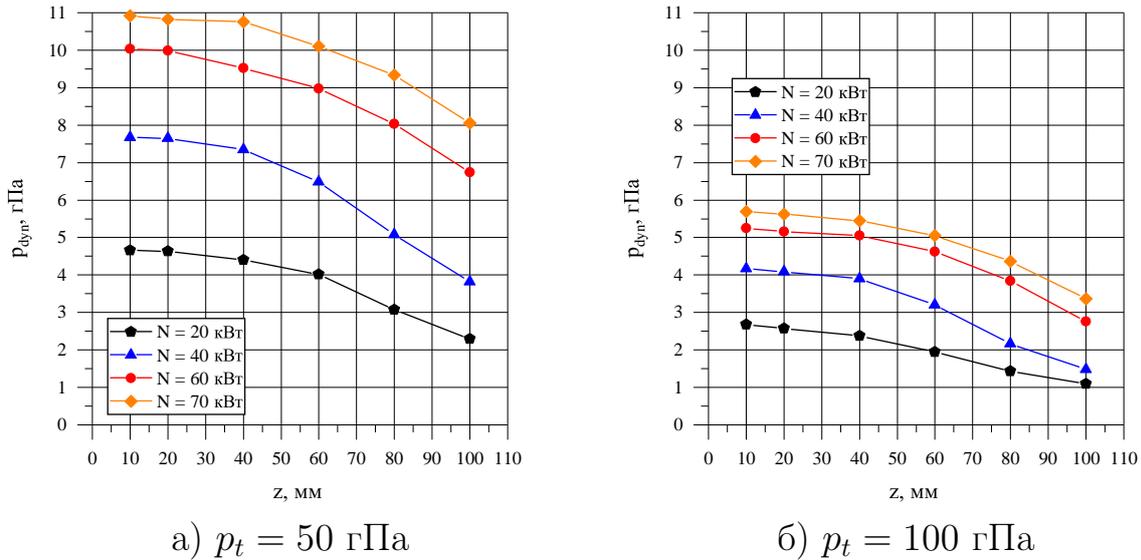


Рис. 1 — Динамические давления на оси струи, истекающей из щелевого сопла 80×15 мм, в зависимости от расстояния z до выходного сечения сопла

В §2.3.2 приведены оценки скорости и температуры потока на оси дозвуковой струи воздушной плазмы вблизи выходного сечения щелевого сопла 80×15 мм при давлении 50 гПа, расходе воздуха 2.4 г/с и мощности ВЧ-генератора плазмотрона ВГУ-4 по анодному питанию 70 кВт. Температура оценивалась методом относительных интенсивностей по спектру воздушной плазмы, зарегистрированному с помощью спектрометра Ocean Optics HR-4000 в интервале длин волн $500 \div 950$ нм, и составила ~ 6600 К.

Динамическое давление связано со скоростью дозвукового потока соотношением:

$$p_{dyn} = \xi \frac{\rho v^2}{2} \quad (1)$$

где p_{dyn} — измеряемое динамическое давление, ρ — плотность, v — скорость потока, ξ — коэффициент давления.

В рассмотренном режиме течения скорость на оси струи у выходного сечения сопла составила $v = 1330$ м/с.

В §2.3.3 приведены результаты экспериментов по измерению давлений на плоской поверхности, обтекаемой под углом атаки струями воздушной плазмы в установке ВГУ-4. Измерения проведены с помощью медной водоохлаждаемой пластины 100×100 мм с приемными отверстиями на оси симметрии. Избыточные давления на поверхности пластины на расстоянии от ее нижней кромки $40 \div 60$ мм малы и для углов атаки от 0° до 30° и мощности ВЧ-генератора плазмотрона по анодному питанию $20 \div 70$ кВт лежат в интервале от 0.15 до 0.50 гПа.

В §2.4 представлены результаты экспериментов по визуализации течения у поверхности пластины, обтекаемой под углом атаки. Предложен метод визуализации, основанный на вдуве ацетилена или пропана в пограничный слой через инжекционные отверстия, в результате чего наблюдаются вытянутые факелы, поджатые потоком к поверхности модели-пластины. На рис. 2 приведены спектр воздушной плазмы и спектр воздушной плазмы при вдуве в поток ацетилена.

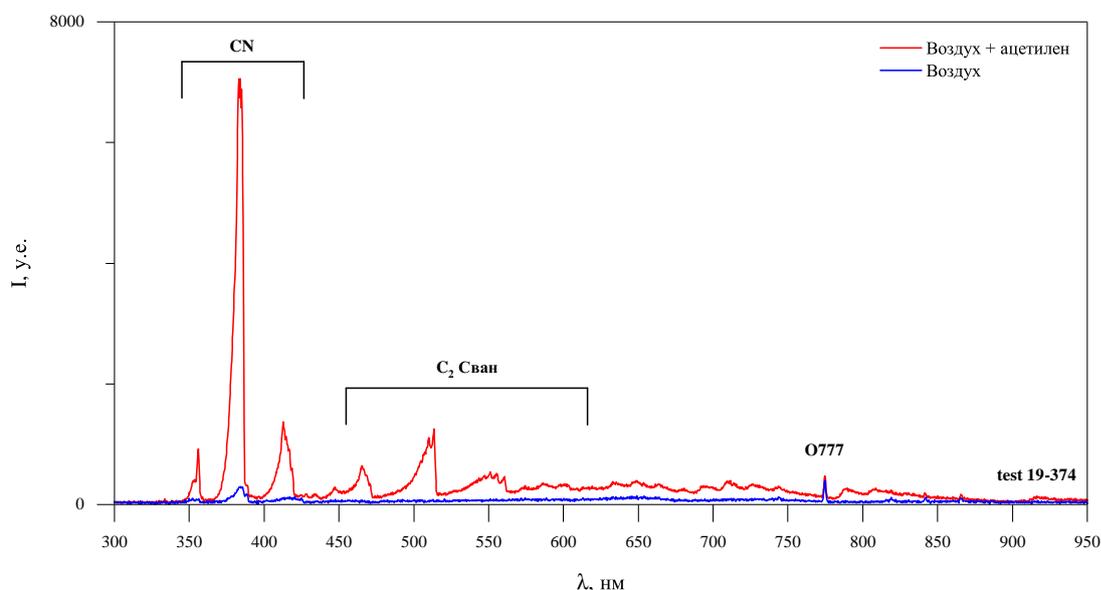


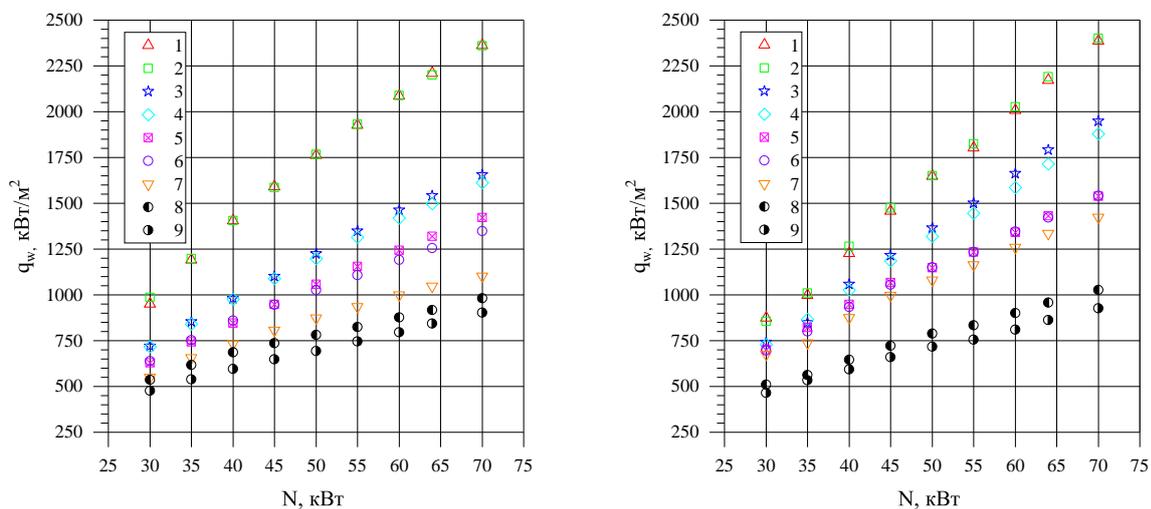
Рис. 2 — Спектр воздушной плазмы и спектр воздушной плазмы при вдуве в поток ацетилена

При вдуве ацетилена в воздушную плазму существенно возрастает интенсивность излучения циана CN, хорошо различимы полосы Свана C_2 . В экспериментах по визуализации течения отмечено отклонение наблюдаемых факелов в сторону, совпадающую с направлением закрутки потока на входе в разрядный канал плазмотрона, обусловленной его конструктивными особенностями. Таким образом, установлено, что остаточная закрутка потока сохраняется при выходе из щелевого сопла и влияет на обтекание модели.

Третья глава посвящена исследованию теплообмена в дозвуковых струях высокоэнтальпийных газов ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4.

В §3.2 обосновывается необходимость предварительного исследования влияния каталитических свойств материалов на тепловой поток в струях диссоциированного воздуха с помощью осесимметричных моделей. Осесимметричная конфигурация эксперимента повышает точность измерений, проводимых в струях высокоэнтальпийных газов, и существенно упрощает задачу численного моделирования дозвукового течения и расчета тепловых потоков в точке торможения на поверхности модели, что особенно важно при определении эффективных коэффициентов рекомбинации атомов O и N на поверхности материалов, нагреваемых в дозвуковых струях ВЧ-плазмотронов.

В §3.3 представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена охлаждаемых поверхностей металлов и кварца. Тепловые потоки в дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4 определялись в области лобовой точки водоохлаждаемой цилиндрической медной модели с помощью проточных калориметров. Результаты измерений в установке ВГУ-4 в зависимости от мощности ВЧ-генератора (N) и давления (p_{ch}) в барокамере представлены на рис. 3. Наблюдалось качественное совпадение шкал каталитичности материалов, полученных с использованием установок ВГУ-3 и ВГУ-4.



а) $p_{ch} = 50$ гПа

б) $p_{ch} = 100$ гПа

Рис. 3 — Тепловые потоки к поверхностям металлов и кварца в критической точке модели, обтекаемой дозвуковыми струями высокоэнтальпийного воздуха в установке ВГУ-4: 1 – Ag; 2 – Cu; 3 – Nb; 4 – Au; 5 – Ta; 6 – Вe; 7 – Mo; 8 и 9 – кварц с толщинами датчиков 0.61 и 0.81 мм

Для пластины рассмотрены два предельных случая: абсолютно каталитическая и низкокatalитическая поверхности. В качестве материала пластины с абсолютно каталитической поверхностью использовалась бескислородная медь. Для исследования теплообмена низкокatalитической поверхности использовались теплозащитные плитки орбитального корабля «Буран» с черным низкокatalитическим покрытием.

В §3.4 приведены результаты экспериментов по определению тепловых потоков к высококatalитической поверхности пластины, обтекаемой под углом атаки высокоэнтальпийным воздухом, азотом и смесью азота и углекислого газа. Для измерений использовались медные неохлаждаемые модели-пластины с интегрированными в них нестационарными датчиками тепловых потоков (рис. 4). Датчики располагались вдоль вертикальной оси симметрии пластин. В экспериментах со щелевыми соплами с выходными сечениями 80×15 мм и 120×9 мм применялась пластина 100×100 мм. В экспериментах со щелевым соплом с выходным сечением 40×8 мм использовалась пластина 50×50 мм.

В ходе эксперимента термопарой регистрируется изменение температуры на тыльной стороне датчика, плотность теплового потока определяется из соотношения:

$$q_w = \frac{M \cdot C \cdot \Delta T}{A \cdot \Delta t} \quad (2)$$

где M – масса датчика, C – удельная теплоемкость материала датчика; A – площадь нагреваемой поверхности датчика; $\frac{\Delta T}{\Delta t}$ – регистрируемая скорость роста температуры.

Примеры результатов измерений тепловых потоков к поверхности пластины 50×50 мм, проведенных в дозвуковых струях высокоэнтальпийных газов установки ВГУ-4, истекающих из щелевого сопла с выходным сечением 40×8 мм, представлены на рис. 5.

На поверхности медной пластины 100×100 мм в дозвуковых струях воздушной плазмы, истекающих из щелевых сопел с выходными сечениями 80×15 мм и 120×9 мм, реализованы тепловые потоки от 140 до 1830 кВт/м^2 . На поверхности медной пластины 50×50 мм в дозвуковых струях воздушной плазмы, истекающих из щелевого сопла с выходным сечением 40×8 мм, реализованы тепловые потоки от 380 до 3750 кВт/м^2 .

Тепловые потоки в струях чистого азота близки к потокам в струях воздушной плазмы. В смеси из 70 % N_2 и 30 % CO_2 (по массе) тепловые потоки более чем на 20 % ниже по сравнению с азотом и воздухом.

В §3.5 представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена теплозащитных плиток орбитального корабля «Буран» с черным низкокatalитическим покрытием. Для низкотеплопроводного

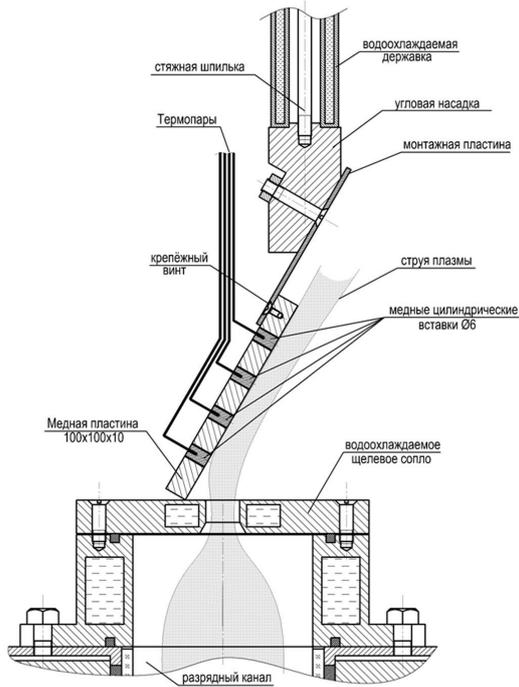
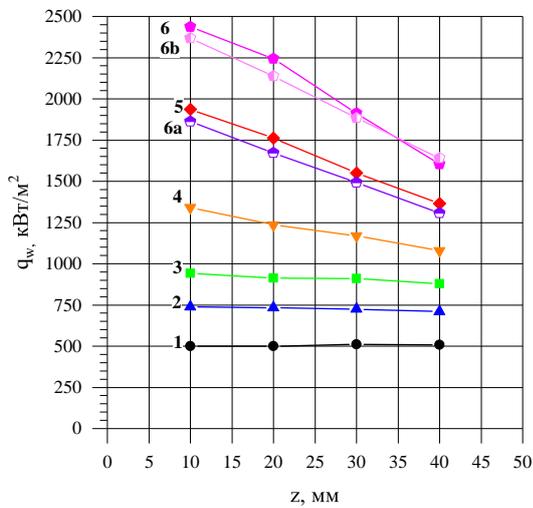
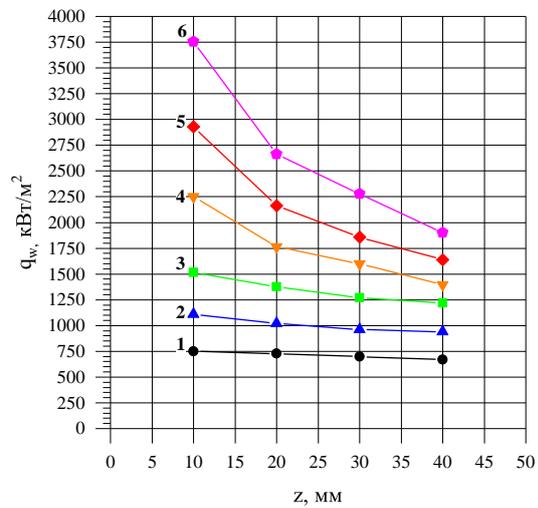


Рис. 4 — Модель-пластина для измерения тепловых потоков в установке ВГУ-4



а) Угол атаки 15°



б) Угол атаки 30°

Рис. 5 — Изменение теплового потока вдоль оси симметрии медной пластины, установленной под углом атаки за выходным сечением щелевого сопла 40×8 мм, для различных значений мощности плазмотрона при давлении в барокамере 100 гПа: z — координата, отсчитываемая по поверхности пластины от среза сопла, мощность плазмотрона по анодному питанию N : 1 — 20 кВт, 2 — 30 кВт, 3 — 40 кВт, 4 — 50 кВт, 5 — 60 кВт, 6 — 70 кВт, 6a — 70 кВт ($70\%N_2 + 30\%CO_2$), 6b — 70 кВт ($100\%N_2$)

материала тепловой поток к поверхности в установившемся режиме может быть определен из закона Стефана-Больцмана:

$$q_w = \varepsilon_t \sigma T_w^4 \quad (3)$$

где q_w – плотность поверхностного теплового потока; T_w – установившаяся температура поверхности (равновесная радиационная температура); ε_t – интегральная степень черноты поверхности; σ – постоянная Стефана-Больцмана.

На основе соотношения (3) определены тепловые потоки к поверхности теплозащитной плитки, нагреваемой в дозвуковых струях диссоциированного воздуха. Плитка размерами 150 × 150 мм устанавливалась под углом атаки за выходным сечением щелевого сопла (рис. 6).

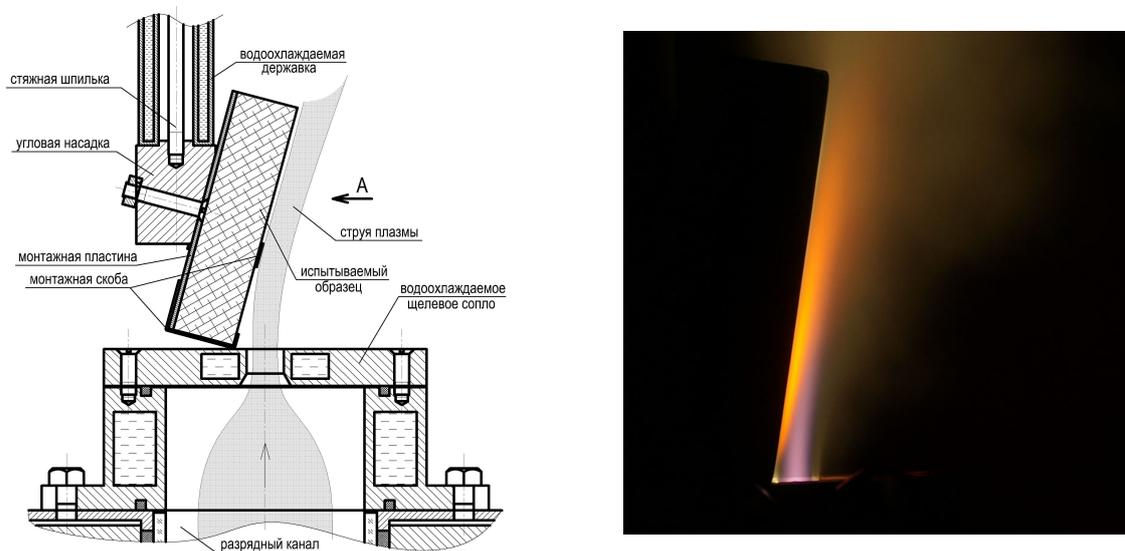


Рис. 6 — Теплозащитная плитка в экспериментах с использованием щелевого сопла

Поле температур регистрировалось термовизором Тандем VS-415U. Эксперименты со щелевым соплом с выходным сечением 80 × 15 мм проводились в дозвуковых режимах при давлении в барокамере 50 и 100 гПа для мощностей ВЧ-генератора плазмотрона ВГУ-4 20 ÷ 30 кВт, теплозащитная плитка устанавливалась под углами атаки 0°, 5° и 10°. Тепловые потоки к низкокatalитической поверхности теплозащитной плитки оказались в 2.4 ÷ 2.8 раза ниже зарегистрированных на медной поверхности для того же режима обтекания.

В экспериментах со щелевым соплом с выходным сечением 120 × 9 мм теплозащитная плитка устанавливалась под углом атаки 0°. Эксперименты проводились в дозвуковых режимах при давлении в барокамере 25, 50 и 100 гПа и мощности ВЧ-генератора 40 кВт. С ростом давления

в барокамере установки существенно уменьшается площадь нагреваемого участка поверхности плитки. Оптимальные режимы реализуются при давлении ниже 50 гПа. Типичные распределения плотности теплового потока по поверхности плитки приведены на рис. 7.

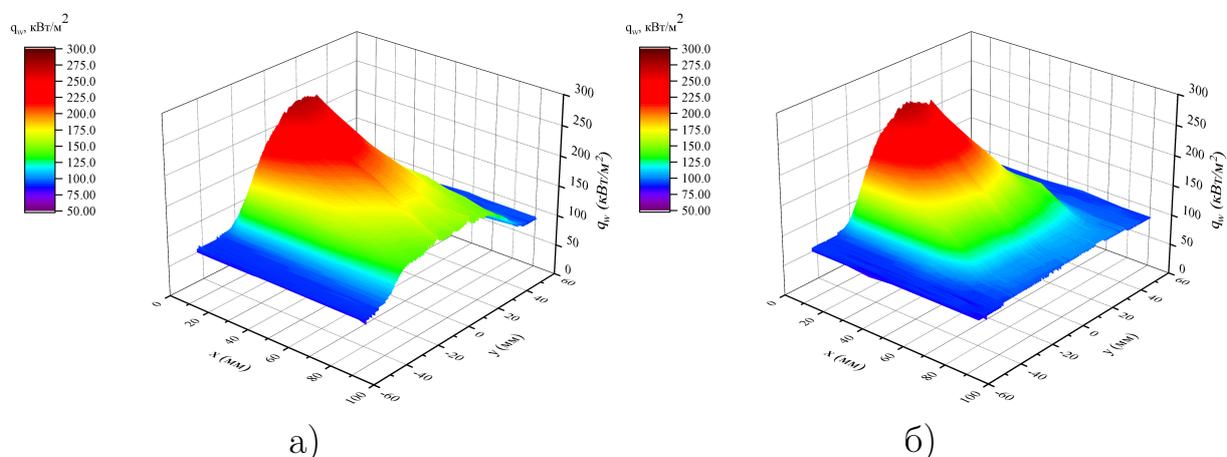


Рис. 7 — Пространственное представление распределения тепловых потоков по поверхности плитки, установленной под углом атаки 0° за целевым соплом с выходным сечением 120×9 мм, при мощности плазмотрона ВГУ-4 по анодному питанию $N = 40$ кВт и давлении в барокамере установки 25 гПа (а) и 50 гПа (б)

В §3.5.3 описан эксперимент по нагреву крупногабаритной панели 250×250 мм, собранной из теплозащитных плиток орбитального корабля «Буран» с черным низкокatalитическим покрытием. Эксперимент проведен в дозвуковых струях диссоциированного воздуха мегаваттного плазмотрона ВГУ-3. Панель устанавливалась под углом атаки 5° за целевым соплом с выходным сечением 200×30 мм. Мощность установки ВГУ-3 по анодному питанию в ходе эксперимента составляла 200 кВт. Давление в барокамере было равно 20 гПа. Зарегистрированное термовизором поле температур и полученное на его основе распределение теплового потока вдоль вертикальной оси панели представлены на рис. 8.

В §3.6 представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена образца теплозащитного материала (ТЗМК-10) с белым низкокatalитическим покрытием. Спектральная степень черноты поверхности образца имеет выраженную зависимость от длины волны, что затрудняет определение истинной температуры традиционными методами оптической пирометрии.

Для определения температуры образца при испытаниях в установке ВГУ-4 был реализован метод спектральной пирометрии [12].

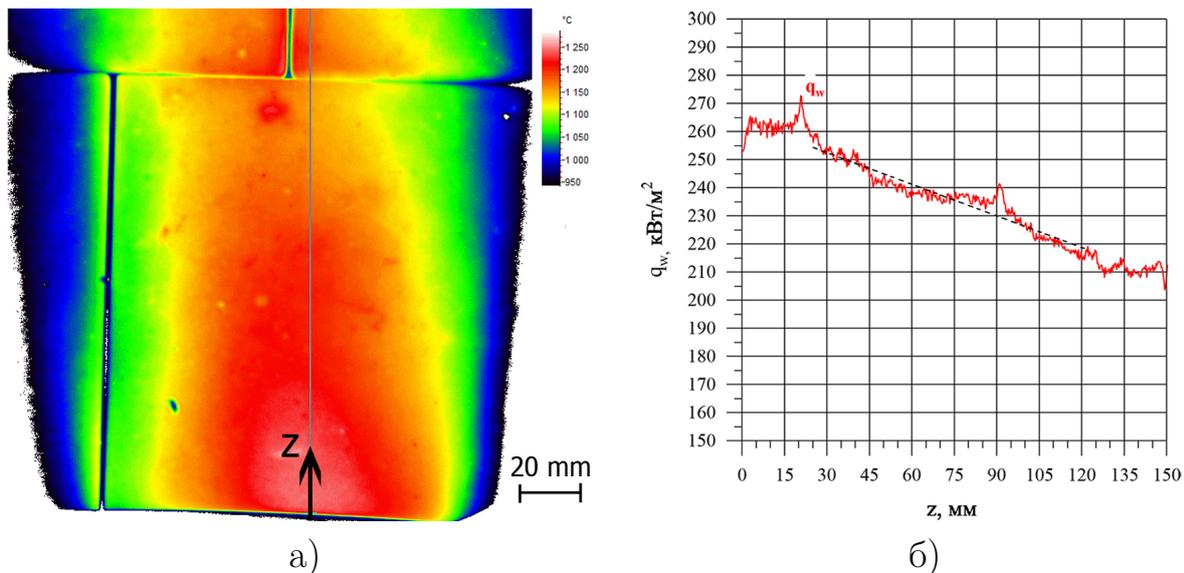


Рис. 8 — Поле температур на участке крупногабаритной панели (а) и распределение теплового потока вдоль оси z (б)

Спектр излучения нагретой поверхности образца регистрировался спектрометром Ocean Optics HR-4000. Спектрометр был откалиброван с помощью комбинированного источника излучения DH-2000-CAL. Радиационная температура в центре лицевой поверхности образца регистрировалась пирометром полного излучения Кельвин-2100.

Измерение температуры поверхности нагретых тел методом спектральной пирометрии основано на относительных измерениях интенсивности излучения в широком спектральном интервале.

Закон Вина, то есть закон излучения Планка в приближении $C_2/\lambda T \gg 1$:

$$I_{\lambda,T} = \varepsilon \cdot (C_1/\lambda^5) \cdot e^{-C_2/\lambda T} \quad (4)$$

где C_1 и C_2 – первая и вторая константы закона излучения Планка соответственно, $I_{\lambda,T}$ – интенсивность излучения, λ длина волны, T – термодинамическая температура.

Уравнение (4) можно переписать в виде:

$$\ln(\lambda^5 \cdot I_{\lambda,T}) - \ln(\varepsilon \cdot C_1) = -(C_2/\lambda)/T \quad (5)$$

Из (5) видно, что, построив экспериментальный спектр в координатах $C_2/\lambda - \ln(\lambda^5 \cdot I_{\lambda,T})$, по углу наклона линейного участка получившегося графика можно определить температуру источника теплового излучения.

Примеры спектров излучения нагретой поверхности образца из материала ТЗМК-10 с белым покрытием приведены на рис. 9. Выделяются спектральные линии, обусловленные излучением воздушной плазмы.

При определении температуры поверхности данные участки спектра не учитывались. Циклограмма эксперимента и температуры, полученные на основе спектральных данных, приведены на рис. 10.

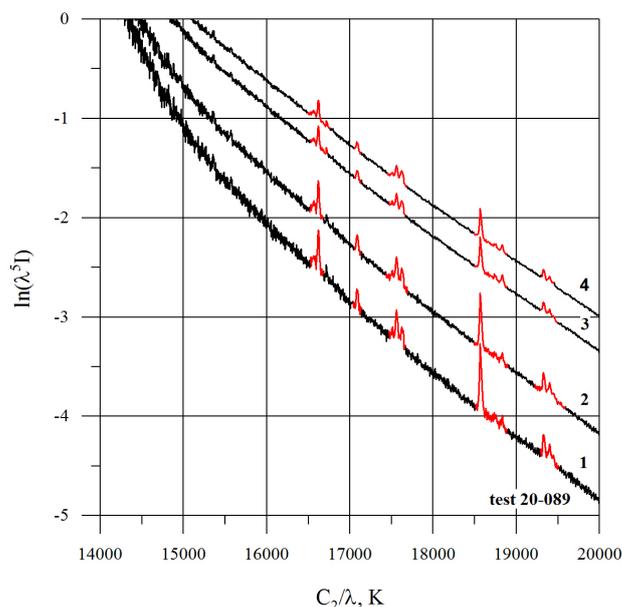


Рис. 9 — Спектры излучения поверхности материала ТЗМК-10 с белым покрытием (в координатах Вина) на 33-й (1), 62-й (2), 73-й (3) и 123-й (4) секундах эксперимента

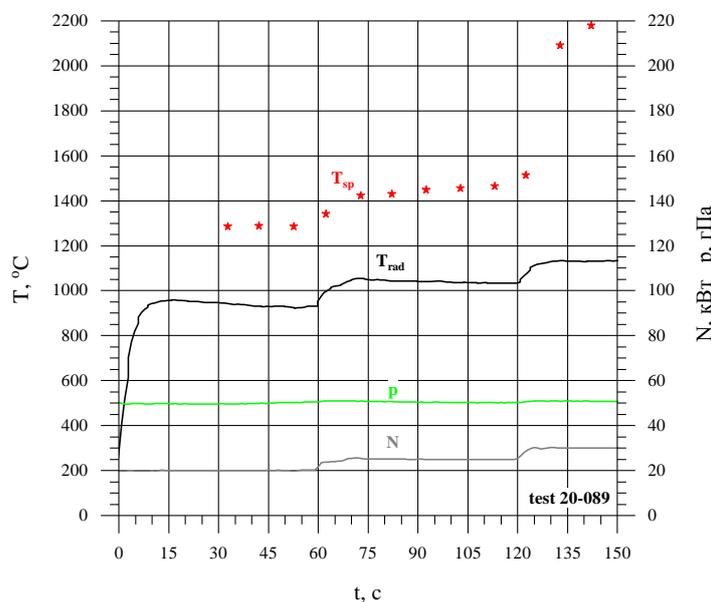


Рис. 10 — Зависимости от времени, мощности анодного питания ВЧ-генератора плазмотрона (N), давления в барокамере плазмотрона (p_{ch}), радиационной температуры (T_{rad}) и температуры (T_{sp}), полученной методом спектральной пирометрии

Пирометром полного излучения измерена радиационная температура, что позволяет использовать температуры, полученные методом

спектральной пирометрии, для оценки интегральной излучательной способности поверхности материала ε_t . При температуре ~ 1280 °С направленная интегральная излучательная способность поверхности материала, определенная из уравнения Стефана-Больцмана, составила $\varepsilon_t = 0.37$. По данным [13] интегральная излучательная способность материала ТЗМК-10 с белым покрытием составляет $\varepsilon_t = 0.43$. Таким образом, наблюдается удовлетворительное соответствие полученного значения результатам методически более строгих измерений.

В §3.7 представлены результаты экспериментального исследования эффекта сверхравновесного нагрева, который можно наблюдать при обтекании диссоциированным химически неравновесным газовым потоком поверхности с неоднородными каталитическими свойствами [14]. При переходе от некаталитического участка поверхности к каталитическому происходит скачок теплового потока и температуры до уровней, существенно превышающих значения, полученные на полностью каталитической поверхности или в случае равновесного пограничного слоя. Эффект обусловлен тем, что при одинаковых внешних условиях течения концентрации атомов диссоциированного газа в пограничном слое на некаталитической поверхности выше, чем в случае каталитической поверхности, и их рекомбинация далее по потоку на каталитической поверхности приводит к ее дополнительному нагреву. В дозвуковых струях диссоциированного воздуха исследованы образцы из материала теплозащитной плитки орбитального корабля «Буран» с черным низкокatalитическим покрытием. На поверхность образцов дополнительно были нанесены участки высококatalитического покрытия (хромоникелевой шпинели) или среднекаталитического покрытия (ниобия). В ходе экспериментов для регистрации температуры в характерных точках поверхности образцов использовались пирометры спектрального отношения Mikron M-770S и Термоконт-ТЦ5С8М, распределения температур по поверхности образцов получены с помощью термовизора Тандем VS-415U. На рис. 11 представлены результаты экспериментов, в которых на поверхность штатной теплозащитной плитки орбитального корабля «Буран» наносилась полоса из ниобия (кривая 1 - полностью низкокatalитическая поверхность, кривая 2 - низкокatalитическая поверхность со среднекаталитическим участком, кривая 3 - полностью среднекаталитическая поверхность). Температура за линией перехода от низко- к среднекаталитическому участку поверхности образца (т. 5 на рис. 11) превышала температуру, измеренную в той же области для случая обтекания полностью среднекаталитической поверхности (т. 6 на рис. 11), на величину ~ 120 ° С.

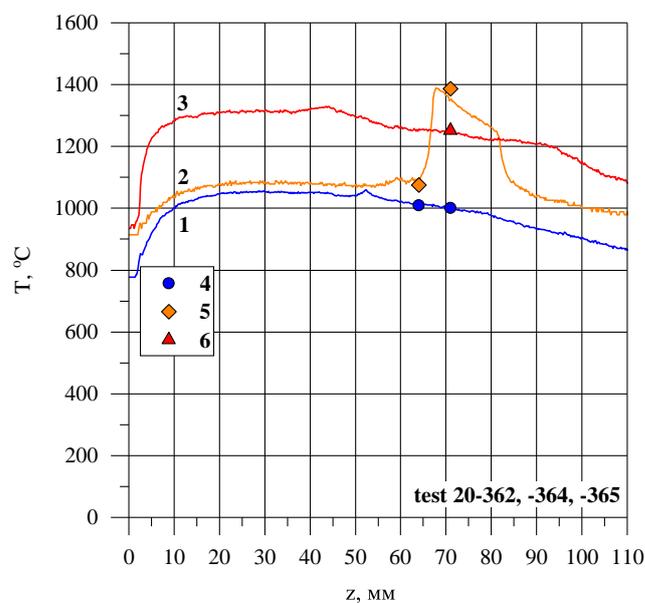


Рис. 11 — Температура поверхности теплозащитной плитки «Буран» со штатным черным низкокatalитическим покрытием (кривая 1, т. 4), с горизонтальной полосой Nb (кривая 2, т. 5), с вертикальной полосой Nb (кривая 3, т. 6)

В экспериментах с образцом, участки которого были покрыты хромоникелевой шпинелью, температура за линией перехода от низко- к высококatalитическому участку поверхности превышала температуру, измеренную в той же области при обтекании полностью высококatalитической поверхностью, на величину $\sim 140^\circ \text{C}$.

В **заклучении** приведены основные результаты работы:

1. Существенно расширен диапазон тепловых потоков к плоским поверхностям, обтекаемым дозвуковыми высокоэнтальпийными струями под углами атаки в установках ВГУ-3 и ВГУ-4.
2. Экспериментально исследованы особенности режимов работы ВЧ-плазмотронов и дозвуковых течений плазмы при использовании щелевых сопел. Установлено, что в дозвуковых режимах истечения щелевые сопла не оказывают заметного влияния на область существования индукционного разряда в канале ВЧ-плазмотрона. Измерены динамические давления в дозвуковых струях воздушной плазмы, истекающих из щелевых сопел. Проведена оценка скорости и температуры потока воздушной плазмы за выходным сечением щелевого сопла для одного из характерных режимов работы установки ВГУ-4. Измерены избыточные давления на плоской поверхности, обтекаемой под углом атаки струями воздушной плазмы. Предложен и реализован метод визуализации течения у поверхности пластины, основанный

- на вдуве ацетилена или пропана в пограничный слой. Полученные результаты дают возможность быстрого и конструктивного выбора оптимальных режимов работы установок ВГУ-3 и ВГУ-4 и конфигураций экспериментов при исследованиях теплообмена пластин с использованием щелевых сопел.
3. В дозвуковых струях высокоэнтальпийного воздуха установок ВГУ-3 и ВГУ-4 экспериментально исследован теплообмен охлаждаемых поверхностей ряда металлов (меди, серебра, тантала, молибдена, бериллия, ниобия, золота) и кварца. Проведено сравнение каталитичности указанных материалов по отношению к гетерогенной рекомбинации атомов О и N. Наблюдалось качественное совпадение шкал каталитичности материалов, полученных с использованием установок ВГУ-3 и ВГУ-4.
 4. Получены распределения тепловых потоков на поверхностях медных пластин разных габаритов и теплозащитных плиток орбитального корабля «Буран», которые устанавливались под углами атаки в дозвуковых струях высокоэнтальпийных газов, истекающих из щелевых сопел ВЧ-плазмотронов. В дозвуковых струях диссоциированного воздуха на плоской медной высококаталитической поверхности реализованы тепловые потоки плотностью от 150 до 3750 кВт/м². Экспериментально определены параметры теплообмена черной низкокatalитической поверхности теплозащитной плитки орбитального корабля «Буран», обтекаемой дозвуковым потоком диссоциированного воздуха. Тепловые потоки к низкокatalитической поверхности теплозащитной плитки оказались более чем в 2 раза ниже зарегистрированных на медной поверхности для тех же режимов обтекания. Получены распределения температур и тепловых потоков на крупногабаритной теплозащитной панели, обтекаемой дозвуковыми струями диссоциированного воздуха мегаваттного плазмотрона ВГУ-3.
 5. Методом спектральной пирометрии определена температура нагреваемой в диссоциированном потоке воздуха поверхности образца из теплозащитного материала с белым низкокatalитическим покрытием. Проведена оценка интегральной излучательной способности поверхности материала в условиях эксперимента.
 6. В дозвуковых струях диссоциированного воздуха экспериментально исследован эффект сверхравновесного нагрева поверхности с разрывом каталитических свойств. Эффект

сверхравновесного нагрева наблюдался при переходе от низкокаталитического участка поверхности пластины к высококаталитическому участку, покрытому хромоникелевой шпинелью, а также при переходе от участка поверхности теплозащитной плитки с низкокаталитическим покрытием к средnekаталитическому участку, покрытому ниобием.

Представленное исследование не исчерпывает вопросы, связанные с теплообменом пластин, обтекаемых под углом атаки в струях высокоэнтальпийных газов высокочастотных индукционных плазмотронов. Следующим закономерным шагом может служить расчетное моделирование рассмотренных экспериментальных режимов. Автор надеется, что приведенные результаты послужат основой для валидации подобных расчетов. Данная работа была бы невозможна без уникальной школы высокотемпературного эксперимента, которую автор прошел, работая под началом А.Н. Гордеева. Автор выражает большую благодарность и признательность научному руководителю А.Ф. Колесникову за поддержку, советы и научное руководство. Автор благодарит И.В. Лукомского и Ю.К. Рулева за помощь в подготовке и проведении экспериментов, С.А. Васильевского за помощь в расчете параметров потоков плазмы. Также автор благодарит весь коллектив лаборатории взаимодействия плазмы и излучения с материалами Института проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН за дружественную и творческую атмосферу, в которой проходила работа по подготовке диссертации.

Публикации автора по теме диссертации

В изданиях из списка ВАК РФ

- A1. *Гордеев А. Н., Чаплыгин А. В.* Экспериментальное исследование теплообмена диссоциированного потока воздуха с плоской пластиной под углом атаки в ВЧ-плазмотроне // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2019. — Т. 20, вып. 1. — С. 1–20.
- A2. *Чаплыгин А. В., Гордеев А. Н.* Влияние целевого сопла на устойчивость индукционного разряда в канале высокочастотного безэлектродного плазмотрона // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2019. — Т. 20, вып. 4. — С. 1–9.

- A3. Гордеев А. Н., Чаплыгин А. В. Теплообмен в высокочастотном индукционном плазматроне ВГУ-4 при использовании щелевых сопел // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2020. — Вып. 2. — С. 1–20.
- A4. Гордеев А. Н., Чаплыгин А. В. Теплообмен и визуализация течения на поверхности медной пластины при ее обтекании струями воздушной плазмы // Инженерный журнал: наука и инновации. — 2020. — Вып. 9. — С. 1–11.
- A5. Чаплыгин А. В. Экспериментальное исследование эффекта сверхравновесного нагрева поверхности в дозвуковой струе диссоциированного воздуха // Физико-химическая кинетика в газовой динамике. — 2021. — Т. 21, вып. 2. — С. 1–15.

В изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science и Scopus

- A6. Thermal Effect of Surface Catalysis in Subsonic Dissociated-Air Jets. Experiment on a High-Frequency Plasmatron and Numerical Modeling / S. A. Vasil'evskii, A. N. Gordeev, A. F. Kolesnikov, A. V. Chaplygin // Fluid Dynamics. — 2020. — Vol. 55, no. 5. — P. 708–720.

В сборниках трудов конференций

- A7. Гордеев А. Н., Лукомский И. В., Чаплыгин А. В. Экспериментальное исследование теплообмена при обтекании пластины под углом атаки потоком диссоциированного воздуха // Материалы XXX научно-технической конференции по аэродинамике. Материалы конференции, посвященной 150-летию со дня рождения С.А. Чаплыгина. — Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, 2019. — С. 95–96.
- A8. Гордеев А. Н., Чаплыгин А. В. Сравнение калориметров двух типов при определении тепловых потоков в струях воздушной плазмы // Материалы XXXI научно-технической конференции по аэродинамике. — Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н.Е. Жуковского, г. Жуковский, 2020. — С. 78–79.

- A9. *Гордеев А. Н., Чаплыгин А. В.* Моделирование теплообмена боковых поверхностей летательных аппаратов в высокочастотных индукционных плазмотронах // 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. — г. Москва: Издательство МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2020. — С. 323—324.
- A10. Возможности индукционных плазмотронов ИПМех РАН при исследованиях образцов высокотемпературных материалов в форме пластин / А. Н. Гордеев, А. В. Чаплыгин, В. Г. Бабашов, А. С. Беспалов // Современные достижения и тенденции развития в области теплозащитных, керамических и металлических композиционных материалов: материалы Всероссийской научно-технической конференции. — ВИАМ, Москва, 2019. — С. 229—238.
- A11. Новые режимы теплообмена в высокочастотном мегаваттном индукционном плазмотроне ВГУ-3 / А. В. Чаплыгин, С. А. Васильевский, А. Н. Гордеев, А. Ф. Колесников // Сборник трудов в 4 томах XII Всероссийского съезда по фундаментальным проблемам теоретической и прикладной механики. Т. 2: Механика жидкости и газа. Т. 2. — г. Уфа: РИЦ БашГУ, 2019. — С. 921—922.

Список литературы

1. *Anfimov N.* Capabilities of TSNIIMASH test facilities for experimental investigations of aerospace plane aerothermodynamics // 5th International Aerospace Planes and Hypersonics Technologies Conference, AIAA-93-5000. — 1993. — P. 1—15.
2. Высокочастотный плазмотрон – установка для исследований аэрофизических проблем с использованием высокоэнтальпийных газовых потоков / Г. Н. Залогин [и др.] // Космонавтика и ракетостроение. — 1994. — № 2. — С. 22—32.
3. *Neiland V. Y.* Review of TsAGI wind tunnels // Wind tunnels and wind tunnel test techniques. — 1992. — P. 1—19.
4. *Егоров И. В., Жестков Б. Е., Шведченко В. В.* Определение каталитической активности материалов при высоких температурах в гиперзвуковой трубе ВАТ-104 // Ученые записки ЦАГИ. — 2014. — Т. 45, № 1. — С. 3—13.

5. Обработка теплозащитных материалов орбитального корабля «БУРАН» на индукционных плазмотронах / П. Н. Баронец [и др.] // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации. — 1990. — Т. 1991. — С. 41—52.
6. *Gordeev A. N., Kolesnikov A. F., Yakushin M. I.* Induction plasma application to Buran's heat protection tiles ground tests // SAMPE Journal (Society of Aerospace Material and Process Engineers). — 1992. — Vol. 28, no. 3. — P. 29—33.
7. *Gordeev A. N., Yakushin M. I.* Thermochemical stability of carbon-carbon using an antioxidation coating for Buran-Part II // SAMPE Journal (Society of Aerospace Material and Process Engineers). — 1993. — Vol. 29, no. 2. — P. 27—31.
8. Predicting material surface catalytic efficiency using arc-jet tests / D. Stewart, Y.-K. Chen, D. Bamford, A. Romanovsky // 30th Thermophysics Conference, AIAA-95-2013. — 1995. — P. 1—23.
9. *Miller C.* Aerothermodynamic flight simulation capabilities for aerospace vehicles // 20th AIAA Advanced Measurement and Ground Testing Technology Conference, AIAA 98-2600. — 1998. — P. 1—35.
10. European plasma working group: status of activities and future plans / J. Muylaert [et al.] // Hot Structures and Thermal Protection Systems for Space Vehicles. Vol. 521. — 2003. — P. 321—331.
11. *Гордеев А. Н., Колесников А. Ф.* Высокочастотные индукционные плазмотроны серии ВГУ // Сб. Актуальные проблемы механики: Физико-химическая механика жидкостей и газов. Москва, Наука. — 2010. — С. 151—177.
12. *Magunov A. N.* Spectral pyrometry // Instruments and experimental techniques. — 2009. — Vol. 52, no. 4. — P. 451—472.
13. *Paderin L. Y., Prusov B. V., Tokarev O. D.* Facility for investigations of hemispherical emissivity of heat protection materials and thermal control coatings // TsAGI Science Journal. — 2011. — Vol. 42, no. 1. — P. 71—82.
14. *Chung P. M., Liu S. W., Mirels H.* Effect of discontinuity of surface catalycity on boundary layer flow of dissociated gas // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 1963. — Vol. 6, no. 3. — P. 193—210.