

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор –  
проректор по научной работе  
и стратегическому развитию

М.П. Профессор  
« 23 » 2016 г.



*Handwritten signature in blue ink.*

### ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» на диссертацию **Чаплыгина Алексея Владимировича «Экспериментальное исследование теплообмена пластин в струях высокоэнтальпийных газов высокочастотных индукционных плазмотронов»**, представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – механика жидкости, газа и плазмы

Диссертация Чаплыгина А.В. посвящена экспериментальному исследованию теплообмена пластин в струях высокоэнтальпийных газов, истекающих из водоохлаждаемых щелевых сопел высокочастотных индукционных плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4, а также экспериментальному исследованию особенностей режимов течений плазмы в данных установках при использовании щелевых сопел.

#### Актуальность темы

Актуальность темы диссертации связана с высокой ролью экспериментальных исследований перспективных теплозащитных материалов для высокоскоростных летательных аппаратов на установках, моделирующих натурное термохимическое воздействие диссоциированного газового потока на поверхность. Образцы материалов в форме пластин и теплозащитных плиток позволяют моделировать теплообмен на боковых поверхностях летательных аппаратов, где уровни тепловых потоков ниже, чем на таких теплонагруженных элементах конструкции, как кромки крыльев и носовой обтекатель. Испытания образцов в форме пластин в высокоэнтальпийных струях ВЧ-плазмотронов востребованы организациями авиационно-космической отрасли, а их корректное планирование требует предварительного исследования режимов теплообмена и течения плазмы для выбранных конфигураций экспериментов. В установках ВГУ-3 и ВГУ-4 при

моделировании теплообмена пластин, устанавливаемых под углами атаки, применяются водоохлаждаемые щелевые сопла с различными размерами выходных сечений. Поэтому отдельно следует отметить актуальность исследований особенностей режимов течения и теплообмена в струях плазмы, истекающих из щелевых сопел. Представленные в диссертации Чаплыгина А.В. экспериментальные результаты существенно расширяют возможности планирования работ по исследованию термохимической стойкости образцов материалов в виде пластин, а также могут послужить основой для валидации программных кодов по расчетному моделированию соответствующих режимов теплообмена и течений плазмы.

### Краткий анализ содержания работы

Диссертация содержит введение, три главы, заключение, приложение и список литературы из 160 наименований. Общий объем диссертации составляет 138 страниц.

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.

В **первой главе** представлен обзор экспериментальных установок, позволяющих исследовать теплообмен пластин, обтекаемых под углом атаки диссоциированным газовым потоком. Приведено подробное описание ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4, на которых выполнено диссертационное исследование.

Во **второй главе** приведены результаты экспериментов по исследованию течений плазмы и режимов ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4 при установке за разрядным каналом щелевых сопел с различными размерами выходных сечений. Исследовано влияние щелевых сопел на область существования индукционного разряда. Проведены измерения динамических давлений в дозвуковых струях плазмы, истекающих из щелевых сопел. Проведены измерения избыточных давлений на поверхности пластины, обтекаемой диссоциированным воздушным потоком под углом атаки. Представлены результаты оценки температуры и скорости потока за выходным сечением щелевого сопла для одного из характерных режимов. Предложен метод визуализации течения у поверхности пластины, основанный на вдуве в пограничный слой ацетилена или пропана.

В **третьей главе** представлены результаты масштабной серии экспериментов по исследованию теплообмена в струях высокоэнтальпийных газов ВЧ-плазмотронов ВГУ-3

и ВГУ-4. Исследовано влияние каталитических свойств материалов (металлов и кварца) на тепловой поток к охлаждаемой поверхности модели в струях диссоциированного воздуха. Приведены результаты экспериментов по определению тепловых потоков к высококаталитической медной поверхности пластины, обтекаемой под углом атаки диссоциированным воздухом, азотом и смесью азота и углекислого газа. Получены распределения тепловых потоков на пластинах разных габаритов в зависимости от мощности установки, давления в барокамере и угла атаки. Представлены результаты экспериментов по исследованию теплообмена теплозащитных плиток орбитального корабля «Буран» и крупногабаритной панели, собранной из данных плиток. Реализован метод спектральной пирометрии, позволивший определить температуру образца с выраженной зависимостью спектральной излучательной способности от длины волны, что было затруднительно сделать традиционными методами оптической пирометрии. Представлены результаты экспериментального исследования эффекта сверхравновесного нагрева, наблюдавшегося при обтекании диссоциированным химически неравновесным потоком плоской поверхности с разрывом каталитических свойств. Впервые реализован эффект сверхравновесного нагрева при переходе от участка поверхности теплозащитной плитки орбитального корабля «Буран» с низкокatalитическим покрытием к участку, покрытому среднекаталитическим по отношению к реакциям гетерогенной рекомбинации атомов азота и кислорода ниобием.

В **заключении** кратко сформулированы основные выводы по результатам, полученным в диссертационной работе.

В **приложении** в табличном виде представлены основные результаты экспериментов, проведенных в рамках диссертационного исследования.

### **Достоверность полученных результатов**

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается физической обоснованностью постановок экспериментальных задач, строгой и корректной постановкой экспериментов, применением общепринятых и отработанных методов измерений в потоках плазмы, использованием в рамках одного эксперимента, где это возможно, нескольких независимых средств измерений, повторяемостью результатов экспериментов, сравнением результатов экспериментов с доступными расчетными и экспериментальными данными других авторов.

## Оценка научной новизны и практической значимости

В диссертационной работе представлен ряд новых результатов:

1. Проведено экспериментальное исследование широкого спектра режимов теплообмена пластин с различными габаритами и каталитическими свойствами поверхности, обтекаемых под углами атаки струями высокоэнтальпийных газов, истекающими из щелевых сопел ВЧ-плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4. Ранее детальные и систематические экспериментальные исследования особенностей теплообмена пластин в установках ВГУ-3 и ВГУ-4 не проводились.

2. За счет применения новых щелевых сопел и форм моделей расширены диапазоны тепловых потоков (на плоской высококаталитической поверхности пластины получены тепловые потоки от 150 до 3750 кВт/м<sup>2</sup>) и конфигураций экспериментов, которые могут быть реализованы в ВЧ-плазмотронах ВГУ-3 и ВГУ-4.

3. Предложен и отработан метод визуализации течения воздушной плазмы у поверхности пластины под углом атаки, основанный на вдуве ацетилена или пропана в пространственный пограничный слой.

4. С помощью метода спектральной пирометрии удалось определить температуру нагреваемой поверхности образца с покрытием, имевшим выраженную зависимость спектральной излучательной способности от длины волны, что затрудняло диагностику традиционными методами оптической пирометрии.

5. В потоке диссоциированного воздуха экспериментально наблюдался эффект сверхравновесного нагрева поверхности с разрывом каталитических свойств для нового сочетания материалов – при переходе от низкоккаталитического участка теплозащитной плитки с среднекаталитическому участку, покрытому ниобием.

**Практическая значимость** диссертационной работы не вызывает сомнения, поскольку ряд её результатов уже используется при выполнении научно-исследовательских работ в интересах таких ведущих предприятий авиационно-космической отрасли, как ФГУП «ВИАМ», ПАО РКК «Энергия», АО «Композит», АО «ВПК «НПО Машиностроения» и АО «Корпорация «МИТ».

По работе можно высказать несколько замечаний:

1. В обзоре недостаточное внимание уделено анализу имеющихся в литературе данных о теплофизике взаимодействия высокоэнтальпийных потоков с преградами.

2. Не проведена оценка точности, полученных экспериментальных результатов.
3. В работе приведена оценка скорости и температуры потока воздушной плазмы, истекающей из щелевого сопла при максимальной мощности установки ВГУ-4, но не поясняется, почему подобные оценки не были проведены для других режимов. Представляло бы интерес также оценить энтальпию и получить зависимости скорости и температуры как функций мощности установки и других режимных параметров плазменной установки.
4. Было бы важным установить влияние на величину теплового потока на пластине параметров набегающего потока и геометрических параметров пластины.

Указанные замечания не являются критическими, позволяя в целом положительно оценить представленную к защите работу и квалификацию диссертанта. В целом, несмотря на имеющиеся погрешности, работа представляет серьезное и обширное научное исследование, выполненное на достаточно высоком уровне. Практически все полученные результаты являются новыми. Материал диссертации изложен последовательно и развернуто доступным и ясным для понимания языком без существенных замечаний по стилю и форме изложения, хорошо иллюстрирован качественно оформленными рисунками, фотографиями и таблицами.

**Общее заключение.** Тема диссертации соответствует указанной научной специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы». Автореферат диссертации соответствует ее содержанию, отражает актуальность темы исследования, ее цели и задачи, научную новизну, практическую значимость, обоснованность и достоверность научных положений, результатов и выводов, сформулированных в диссертации. Публикации также отражают основные положения диссертации.

Выявленные диссертантом, на основе экспериментальных исследований, результаты и физические закономерности теплообмена пластин в струях высокоэнтальпийных газов, истекающих из водоохлаждаемых щелевых сопел высокочастотных индукционных плазмотронов ВГУ-3 и ВГУ-4, а также особенностей режимов течений плазмы в данных установках при использовании щелевых сопел и сформулированные в диссертации практические рекомендации представляют собой в совокупности решения важной научно-технической задачи в области сложного теплообмена материалов и моделей в струях диссоциированных газов.

Диссертация представляет собой завершенную научно-квалификационную работу, которая отвечает всем требованиям п. 9 Положения «О порядке присуждения ученых степеней» (утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 г. № 842) ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Ее автор Чаплыгин Алексей Владимирович, несомненно, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.02.05 – «Механика жидкости, газа и плазмы».

Диссертационная работа была заслушана и обсуждена на заседании кафедры Э6 «Теплофизика» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э.Баумана (национальный исследовательский университет)». Присутствовало на заседании чел. Результаты голосования «за» - 15 чел., «против» - нет, «воздержалось» - нет, протокол № 11 от 02.06.2021 г.

Заведующий кафедрой «Теплофизика»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана  
доктор физико-математических наук

А.Ю. Чирков

Профессор кафедры «Теплофизика»  
МГТУ им. Н.Э. Баумана,  
доктор технических наук

Ю.М. Гришин

Подписи А.Ю. Чиркова и Ю.М. Гришина заверяю

