

НОВЫЕ РЕЖИМЫ ТЕЧЕНИЯ И ТЕПЛООБМЕНА ПЛАЗМЫ В ВЫСОКОЧАСТОТНОМ ИНДУКЦИОННОМ ПЛАЗМОТРОНЕ ВГУ-4

А.Н. Гордеев, А.Ф. Колесников

Институт проблем механики Российской академии наук, Москва

Аннотация

Представлены описания новых режимов течения и теплообмена воздушной плазмы, реализованных в индукционном плазматроне ВГУ-4 в последние годы, и их характеристики. Использование удлиненного водоохлаждаемого разрядного канала позволило получить потоки чистой воздушной плазмы с энтальпией 4-5 МДж/кг при сохранении всех преимуществ индукционного нагрева газовых потоков. Проведение экспериментов не в свободной дозвуковой струе, а внутри разрядного канала позволило вдвое повысить максимальный тепловой поток к модели и довести его до 700 Вт/см², что позволяет моделировать условия нагрева возвращаемой на Землю капсулы с марсианским грунтом. Использование водоохлаждаемых звуковых сопел малого диаметра позволило поднять максимальный тепловой поток к цилиндрической модели с плоским торцом диаметром 20 мм до 1300 Вт/см². Применение щелевого сопла открывает возможность моделирования на плазматроне ВГУ-4 теплообмена на боковых поверхностях спускаемых аппаратов для условий входа в атмосферу.

NEW REGIMES OF PLASMA FLOWS AND HEAT TRANSFER IN THE IPG-4 PLASMATRON

New regimes of the air plasma flows and heat transfer in the 100-kW RF-plasmatron IPG-4 and results of flow field and heat transfer characterization are presented. Maximum stagnation point heat flux 1300 W/cm² to water-cooled copper model with a flat nose of 20 mm diameter was achieved at the stagnation pressure 180 hPa due to using water-cooled sonic nozzle of a small diameter. Subsonic pure air plasma flows with relatively low enthalpies 4-5 MJ/kg were obtained using newly developed long water-cooled section of the IPG-4 plasmatron discharge channel. Performing experiments inside the plasmatron discharge channel instead of conventional tests in subsonic air plasma jets reveals the way to obtain on the water-cooled copper model the stagnation point heat flux 700 W/cm² and to realize experimental simulation of the reentry heating conditions related to the Earth entry of the capsule with the Martian ground samples. Slit nozzle application extends capability of the IPG-4 plasmatron for the simulation of the heat transfer to a side surface of the re-entry vehicles.

1. ВВЕДЕНИЕ

Индукционный плазматрон ВГУ-4 мощностью 100 кВт используется для моделирования термохимического взаимодействия потоков плазмы воздуха и углекислого газа с поверхностью теплозащитных материалов для условий спуска в атмосферах Земли и Марса. В основном испытания теплозащитных материалов и определение их каталитических свойств осуществлялись в дозвуковых высокоэнтальпийных потоках [1–3]. Использование как дозвуковых, так и сверхзвуковых режимов работы плазматрона открывает новые возможности моделирования процессов взаимодействия газов с поверхностью [4].

Цель настоящей работы — представить обзор реализованных в последнее время новых режимов течения и теплообмена плазмы в высокочастотном индукционном плазматроне ВГУ-4. Рассматриваются три новых возможности:

- повышение теплового потока к поверхности и энтальпии на внешней границе пограничного слоя за счёт проведения исследований теплообмена и испытаний ТЗМ внутри разрядного канала;
- получение низкоэнтальпийных (для индукционного плазматрона) потоков воздушной плазмы за счёт использования удлиненного охлаждаемого разрядного канала переменного диаметра;
- использование щелевого сопла для моделирования теплообмена на боковых поверхностях спускаемых аппаратов.

2. ИНДУКЦИОННЫЙ ПЛАЗМОТРОН ВГУ-4

2.1. Основные параметры плазматрона ВГУ-4

Плазматрон ВГУ-4 представляет собой компактную и экономичную установку универсального назначения, максимально унифицированную с мегаваттным индукционным плазматроном ВГУ-3 по элементам барокамер (люки, оптические окна и проч.), по датчикам и зондам для измерения тепловых потоков, скоростных напоров и энтальпии, включая их механические, водяные и измерительные интерфейсы. Вследствие сравнительно небольшой мощности и удобства управления параметрами рабочих режимов ВГУ-4 в течение почти 20 лет используется в качестве «рабочей лошади». Действительно, в последние годы на нём проводится около 200 экспериментов в год. Основные технические параметры плазматрона ВГУ-4 приведены в Табл.1.

Таблица 1

Основные параметры высокочастотного индукционного плазматрона ВГУ-4

Максимальная мощность по анодному питанию, кВт	72
Частота, МГц	1.76
Расход воздуха, г/с	2÷6
Длина разрядного канала, мм	400
Внутренний диаметр разрядного канала, мм	80
Давление в барокамер, гПа	6÷1000
Расход воздуха, г/с	2÷6
Рабочие газы	Воздух, N ₂ , O ₂ , CO ₂ , Ar
Режимы работы	Дозвуковой и сверхзвуковой

2.2. Рабочие области плазмотрона ВГУ-4 в дозвуковом и сверхзвуковом режимах

Рабочие области индукционного плазмотрона ВГУ-4 в координатах «давление в критической точке – тепловой поток к охлаждаемой медной поверхности» показаны на рис. 1 для дозвукового и сверхзвукового режимов.

В дозвуковом режиме тепловой поток измерялся медным проточным стационарным калориметром, установленным в критической точке высококаталитической медной охлаждаемой модели, имеющей форму Евромодели (ESA standard model: диаметр 50 мм, радиус скругления кромки – 11.5 мм), а в сверхзвуковом режиме – медным проточным стационарным калориметром, установленным в критической точке цилиндрической медной охлаждаемой модели с плоским торцом диаметром 20 мм. Рабочая область для сверхзвукового режима была получена как огибающая для рабочих областей охлаждаемых звуковых сопел с диаметрами критического сечения 16, 24, 30, 40, 50 мм при расходах воздуха $2.4 \div 6.0$ г/с.

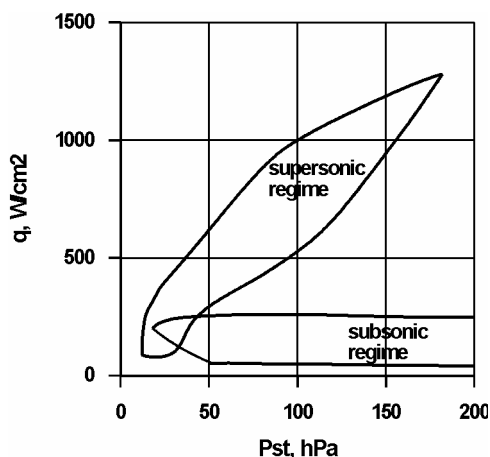


Рис. 1. Рабочие области индукционного плазмотрона ВГУ-4 в дозвуковом и сверхзвуковом режимах

При мощности анодного питания 72 кВт и расходе воздуха 6 г/с использование звукового сопла с диаметром выходного сечения 16 мм позволило реализовать максимальный тепловой поток к медной охлаждаемой поверхности 1300 Вт/см^2 .

3. ПРИМЕНЕНИЕ УДЛИНЁННОГО ОХЛАЖДАЕМОГО РАЗРЯДНОГО КАНАЛА ДЛЯ ПОЛУЧЕНИЯ НИЗКОЭНТАЛЬПИЙНЫХ ПОТОКОВ ВОЗДУШНОЙ ПЛАЗМЫ

3.1. Назначение удлиненного разрядного канала и возможные варианты его реализации на плазмотроне ВГУ-4

Удлиненный разрядный канал первоначально был предложен для постепенного охлаждения в нём потока спектрально чистой индукционной плазмы, что позволило бы регистрировать спектры излучения плазмы воздуха и чистых газов, таких как азот, кислород, углекислый газ и др., а также их смесей. Первоначально был испытан неохлаждаемый удлиненный кварцевый разрядный канал длиной 800 мм, то есть вдвое длиннее стандартной длины. Такой канал оказался вполне работоспособен, но область существования разряда была существенно меньше, чем при работе со стан-

дартным каналом. Минимальная мощность анодного питания, при которой разряд существовал в канале удвоенной длины, составила 29 кВт, против 12 – 13 кВт в случае стандартного канала. К тому же оказалось, что работать с таким каналом неудобно, поскольку большая часть его длины не просматривается через оптические окна барокамеры.

В результате было принято решение разработать и изготовить новый секционированный удлиненный канал, состоящий из двух участков различного диаметра. В качестве первого участка использовался стандартный кварцевый разрядный канал длиной 400 мм и диаметром 80 мм, переходящий далее в водоохлаждаемый канал с внутренним диаметром 40 мм. В качестве переходника от одного участка к другому использовалось имеющееся водоохлаждаемое звуковое сопло с диаметром выходного сечения 40 мм и полууглом 30° на коническом участке.

Сравнительные размеры двух каналов показаны на рис. 2, из которого видно, что вариант канала с переменным диаметром имеет существенно меньшие габариты, что позволяет вести спектральные исследования струй и использовать имеющиеся зонды для измерения тепловых потоков, скоростных напоров и энтальпий без каких бы то ни было изменений.

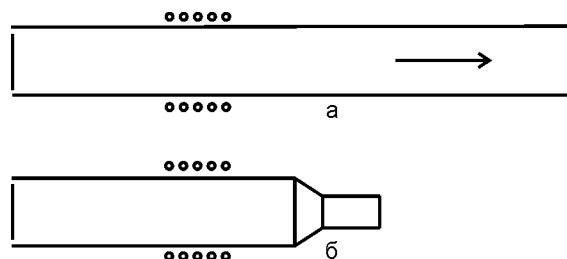


Рис. 2. Две возможные принципиальные схемы удлиненного разрядного канала. а – неохлаждаемый кварцевый разрядный канал длиной 800 мм, б – удлиненный разрядный канал переменного диаметра

Для обеспечения возможности калориметрирования различных участков суженного канала он был выполнен в виде двух секций длиной 40 и 80 мм. Это позволило при необходимости получать длину суженного участка 40, 80 и 120 мм при неизменном внутреннем диаметре 40 мм. Фотография охлаждаемой суженной части удлиненного разрядного канала переменного диаметра приведена на рис 3, а фотография дозвуковой струи воздушной плазмы, истекающей из удлиненного охлаждаемого разрядного канала переменного диаметра, — на рис. 4.

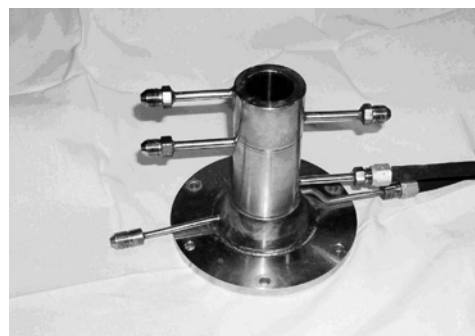


Рис. 3. Охлаждаемая часть удлиненного секционированного разрядного канала переменного диаметра

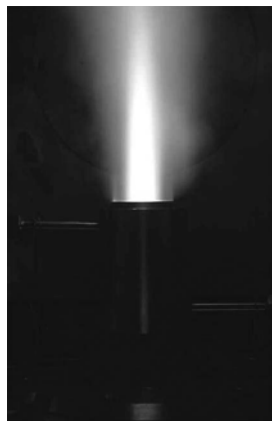


Рис. 4. Дозвуковая струя воздушной плазмы, истекающая из удлиненного охлаждаемого разрядного канала переменного диаметра. Давление в барокамере — 170 гПа, мощность анодного питания ВЧ-генератора — 45 кВт

3.2. Измерения энтальпии дозвуковых струй воздушной плазмы

Для получения количественных данных об энергетических параметрах струи воздуха, истекающей из секционированного канала плазмотрона, был использован энтальпиемер ИПМех РАН с отбором струйки газа из набегающего потока, предназначенный для использования в дозвуковых потоках индукционной плазмы. Базовый вариант конструкции энтальпиемера описан в [5], а его современная модификация — в [6].

Поскольку при уменьшении диаметра выходного сечения разрядного канала вдвое скорость потока плазмы возрастает вчетверо, то для обеспечения правильных результатов измерений энтальпии надо отбирать через калориметр энтальпиемера расход газа вчетверо больший, чем в случае стандартного разрядного канала диаметром 80 мм. Это приводит к пропорциональному повышению количества тепла, снимаемого калориметром энтальпиемера с отбираемой струйки газа.

В экспериментах было обнаружено, что энтальпиемер и его калориметр выдержали отбор тепловой мощности струйки тока 1300 Вт в стационарном режиме. Также установлено, что минимальное давление в барокамере, при котором ещё можно вести измерения энтальпии при новой конфигурации удлиненного разрядного канала, составляет 120 гПа. При этом давлении ещё удаётся при существующей трассе отбора газа через энтальпиемер отобрать количество газа, необходимое для выхода тарировочной характеристики энтальпиемера на плато.

Результаты измерений энтальпии на расстоянии 40 мм (один калибр) от выходного сечения канала представлены на рис. 5 для трёх длин суженного участка — $Z = 0, 40$ и 80 мм.

Как видно из рис. 5, с помощью новой конфигурации удлиненного разрядного канала удалось получить энтальпию на оси струи ниже 5 МДж/кг, что является очень низким значением для индукционного плазмотрона. Такую энтальпию можно получить на дуговых плазмотронах, но в нашем случае получены ламинарные струи чистой плазмы, пригодной для проведения спектроскопических исследований. Очевидно, что с помощью созданной новой модификации удлиненного разрядного канала можно исследовать потоки плазмы не только воздуха, но и азота, кислорода, углекислого газа и других газов. Получение низких энтальпий на

выходе из разрядного канала стало возможным благодаря тому, что в широком диапазоне давлений ($100 \div 500$ гПа) при работе с цилиндрическими насадками длиной 40 и 80 мм нижняя граница области существования разряда по мощности расположена при $16 \div 17$ кВт, то есть существенно ниже, чем при использовании разрядного канала длиной 800 мм с постоянным диаметром 80 мм (29 кВт).

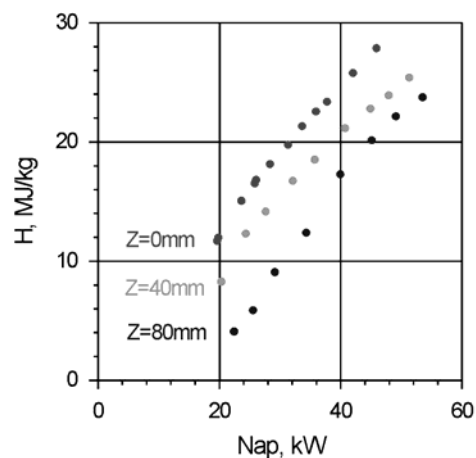


Рис. 5. Зависимость энтальпии дозвуковой струи воздушной плазмы, истекающей из удлиненного разрядного канала с выходным сечением диаметром 40 мм, от мощности анодного питания ВЧ-генератора. Измерения проводились, на расстоянии 40 мм от среза разрядного канала при различных длинах суженного участка канала $Z = 0, 40$ и 80 мм

3.3. Спектры излучения низкоэнтальпийных струй воздушной плазмы

Спектры излучения дозвуковых струй воздуха на выходе из секционированного разрядного канала были зарегистрированы в спектральном интервале 220 - 780 нм при мощностях анодного питания $N_{ap} = 20, 29$ и 45 кВт.

Регистрация оптического излучения воздушной плазмы осуществлялась спектральным комплексом в составе спектрометра фирмы ACTON RESEARCH, оптического приемника фирмы Princeton Instruments и пакета программного обеспечения. Спектрометр с фокусным расстоянием 30 см и сменными решетками 1200 лин/мм и 150 лин/мм имеет линейную дисперсию до 2.7 нм/мм и разрешение до 0.1 нм.

Приёмник включает CCD-матрицу scientific grade 1340×1300 размером пикселей 20×20 мкм и позволяет регистрировать излучение в широком спектральном диапазоне 200 - 1050 нм. Термоэлектрическое охлаждение до -40°C существенно уменьшает тепловой шум приёмника, что обеспечивает высокую чувствительность при измерении слабых световых потоков. В сочетании с прецизионным усилителем и 16-битным аналого-цифровым преобразователем (АЦП) приёмник позволяет линейно регистрировать оптическое излучение в широком диапазоне яркостей. В эксперименте на входную щель спектрометра с помощью кварцевой линзы проецировалось изображение плазменной струи в масштабе 1:4. Ширина входной щели составляла 5 мкм.

Полученные спектры излучения приведены на рис. 6 без коррекции на спектральную чувствительность приёмника.

При мощностях 30 и 45 кВт наблюдается типичный спектр термической воздушной плазмы, в котором

наиболее сильными излучателями являются N_2^+ и CN. Однако при малой мощности 20 кВт (и низкой энтальпии струи ~ 5 МДж/кг) спектр существенно изменяется: практически исчезли типичные для излучения термической воздушной плазмы и прекрасно видимые полосы N_2^+ , почти не заметно излучение полос циана (радикала CN), что свидетельствует о значительном снижении температуры и степени ионизации плазмы. Существенно снизилась интенсивность чувствительных линий кислорода – триплета OI 777 нм. В то же время в спектре по-прежнему хорошо видны полосы молекул NO и N_2 .

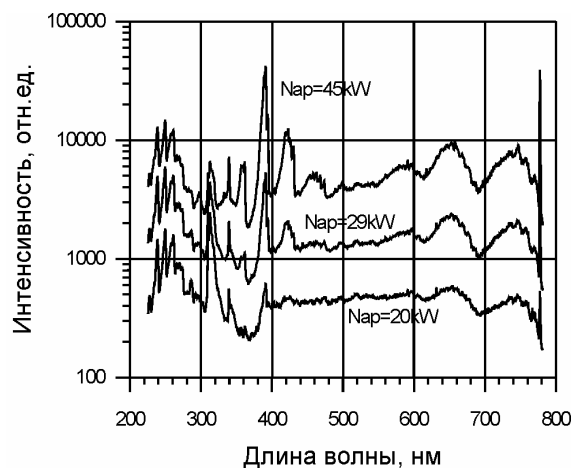


Рис. 6. Спектры дозвуковой струи воздушной плазмы воздуха вблизи выходного сечения удлиненного разрядного канала. Давление в барокамере 170 гПа, расход воздуха 2.4 г/с

Оценки, выполненные с использованием таблиц термодинамических свойств равновесного воздуха, показали, что при давлении 170 гПа и энтальпии 5 МДж/кг степень диссоциации кислорода составляет $\sim 36\%$, а атомарный азот практически отсутствует, в то время как при энтальпии 10 МДж/кг степень диссоциации кислорода близка к 100%, а концентрация N_2^+ на четыре с лишним порядка выше, чем при энтальпии 5 МДж/кг.

4. ПРОВЕДЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ВНУТРИ РАЗРЯДНОГО КАНАЛА ИНДУКЦИОННОГО ПЛАЗМОТРОНА ВГУ-4

4.1. Возможные пути повышения энтальпии и теплового потока, на индукционном плазматроне ВГУ-4

Необходимость повышения энтальпии и теплового потока, реализуемых на индукционном плазматроне ВГУ-4, возникла при решении задачи экспериментального моделирования нагрева в атмосфере Земли поверхности капсулы с марсианским грунтом [7]. В процессе предварительного анализа возможных путей повышения максимального теплового потока были рассмотрены следующие возможности:

- разработка нового двухвиткового индуктора;
- использование ВЧ-генератора плазматрона в режиме перегрузки;
- использование дозвукового сопла;
- проведение экспериментов внутри разрядного канала плазматрона.

Разработка нового двухвиткового индуктора вместо пятивиткового, используемого со времени созда-

ния установки, позволила бы повысить плотность электромагнитной энергии, вкладываемой в разряд, и обеспечить увеличение энтальпии и скорости плазменной струи, однако разработка и изготовление нового индуктора является делом крайне трудоёмким. При наличии двух различных индукторов оказалась бы необходимо систематически заменять один на другой перед экспериментом, что существенно осложнило бы обслуживание установки.

Использование ВЧ-генератора плазматрона в режиме перегрузки позволило бы увеличить тепловой поток не более чем на $10 \div 15\%$ при существенном снижении ресурса генераторной лампы.

Применение дозвукового сопла, позволяет существенно увеличить реализуемый тепловой поток, но при этом энтальпия на оси струи уменьшится за счёт тепловых потерь в сопле.

Проведение же экспериментов внутри разрядного канала, предложенное в [8], позволяет одновременно увеличить и тепловой поток к поверхности, и энтальпию на внешней границе пограничного слоя без какой бы то ни было модернизации установки. Именно этот вариант и был выбран для практической реализации.

4.2. Измерения тепловых потоков внутри разрядного канала

Измерения тепловых потоков в свободной дозвуковой струе и внутри разрядного канала были выполнены с помощью водоохлаждаемых стационарных калориметров, изготовленных из меди. Методика измерений описана, например, в [9].

Распределения вдоль оси струи тепловых потоков к свежоотполированной охлаждаемой медной поверхности в критической точке цилиндрической модели с радиусом полусферического носка 15 мм приведены на рис.7 для четырех значений мощности по анодному питанию.

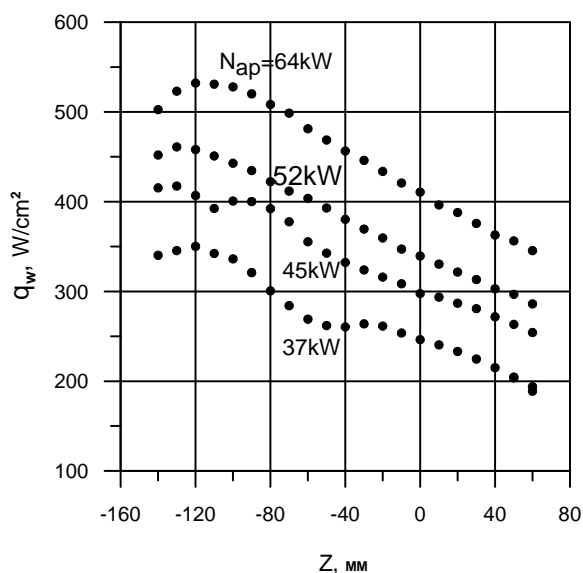


Рис. 7. Распределения вдоль оси струи тепловых потоков к свежоотполированной охлаждаемой медной поверхности в критической точке цилиндрической модели с радиусом полусферического носка 15 мм. Давление в барокамере – 100 гПа

Расстояние вдоль оси симметрии $Z=0$ соответствует выходному сечению стандартного разрядного канала, положительные значения Z относятся к сво-

бодной струе, а отрицательные – к потоку внутри разрядного канала. Выходное сечение индуктора находится при $Z = -120$ мм, а максимальные тепловые потоки реализуются при $Z = -100 \dots -120$, т.е. непосредственно после выхода потока плазмы из индуктора.

Отметим, что тепловой поток демонстрирует линейный рост по мере продвижения модели внутри канала только при высоких мощностях $N_{ap} \geq 52$ кВт. При умеренных же мощностях наблюдается весьма неожиданный вид распределения теплового потока в зависимости от осевого расположения модели, что представляет интересный объект для сравнения с численным расчётом обтекания и теплообмена модели внутри разрядного канала.

Зависимости от мощности теплового потока к сильно окисленной охлаждаемой медной поверхности в критической точке цилиндрической модели с радиусом полусферического носка 15 мм показаны на рис. 8 для случаев расположения модели в зоне максимального теплового потока ($Z = -100$ мм) и при стандартном расположении модели в свободной дозвуковой струе ($Z = 60$ мм). Сильно окисленная медная поверхность вместо свежестрополированной использовалась для того, чтобы датчик теплового потока воспринял хотя бы часть радиационного теплового потока от разряда.

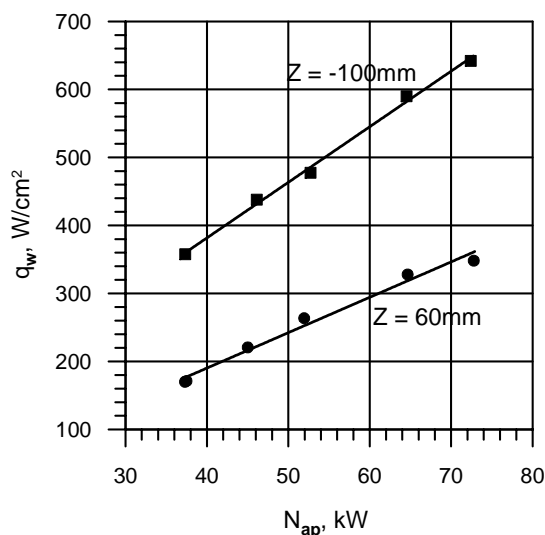


Рис. 8. Зависимость от мощности теплового потока к сильно окисленной охлаждаемой медной поверхности в критической точке цилиндрической модели с радиусом полусферического носка 15 мм в зоне максимального теплового потока ($Z = -100$ мм) и при стандартном расположении модели в свободной дозвуковой струе ($Z = 60$ мм). Давление в барокамере – 100 гПа

Как видно из рис. 8, форсирование мощности ВЧ-генератора по анодному питанию до 80 кВт позволяет получить тепловой поток выше 700 Вт/см², причём использованный датчик не был по-настоящему чёрным и не мог воспринять весь лучистый поток от разряда.

4.3. Измерения энтальпии в свободной дозвуковой струе и внутри разрядного канала

Измерения энтальпии на оси симметрии дозвукового потока были выполнены по усовершенствованной методике ИПМех РАН, описанной в [6]. Результаты измерений приведены на рис. 9.

Продвижение энтальпиемера внутрь разрядного канала было ограничено недостаточной длиной зонда. Поскольку форма энтальпиемера, – цилиндр с полусферическим носком радиуса 15 мм, – идентична форме исследуемых образцов ТЗМ, измеренные значения энтальпии относятся к потоку плазмы внутри разрядного канала с введённой в него моделью указанного выше типа.

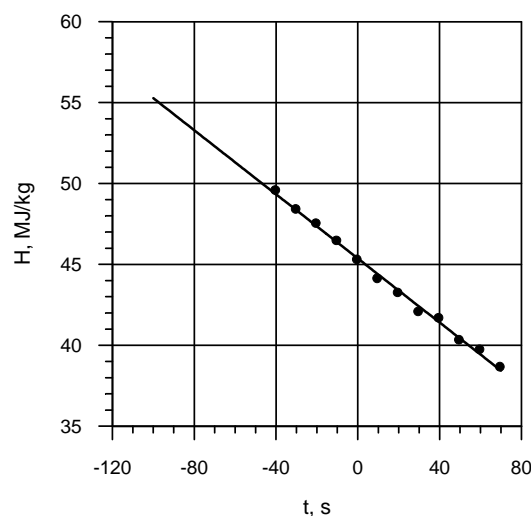


Рис. 9. Измеренное энтальпиемером распределение энтальпии вдоль оси симметрии дозвукового потока воздушной плазмы в разрядном канале и свободной струе при $N_{ap} = 72$ кВт, $P = 100$ гПа

Возможность использования результатов измерений энтальпии с помощью энтальпиемера для сравнения с результатами численного расчёта течения плазмы в незагромождённом разрядном канале требует дополнительных обоснований. Однако, учитывая, что при использовании существующего энтальпиемера коэффициент загромождения потока в разрядном канале плазмотрона ВГУ-4 энтальпиемером составляет около 1/7 и, что наблюдаемое в свободной струе линейное падение энтальпии с расстоянием вниз по потоку не демонстрирует никакого сколько-нибудь заметного изменения поведения при переходе из струи в разрядный канал, можно ожидать, что осевое распределение энтальпии внутри разрядного канала при введении в него энтальпиемера изменяется незначительно.

Экстраполяция экспериментальных данных по энтальпии в зону максимальных тепловых потоков при $Z = -100$ мм даёт значение энтальпии 55 МДж/кг. С учётом того, что расчётные данные, приведённые в [6], дают для рассматриваемого распределения энтальпии прогиб вниз, можно ожидать, что реальная энтальпия при $Z = -100$ мм будет даже выше, чем 55 МДж/кг. Во всяком случае, энтальпия в зоне максимального теплового потока не ниже 50 МДж/кг, а это значение соответствует скорости входа в атмосферу 10 км/с.

Реализованные режимы экспериментов внутри разрядного канала были использованы для испытаний реальных теплозащитных материалов – углепластиков – в рамках проекта МНТЦ №1536.

5. О РАБОТЕ ИНДУКЦИОННОГО ПЛАЗМОТРОНА ВГУ-4 СО ЩЕЛЕВЫМ СОПЛОМ

5.1. Область существования высокочастотного индукционного разряда при работе плазмотрона со щелевым соплом

Подавляющее большинство экспериментов на индукционных плазмотронах проводятся при осесимметричном обтекании моделей, однако также важным является моделирование теплообмена на боковых поверхностях спускаемых аппаратов, которое может быть реализовано при испытании моделей в виде плоских пластин, обтекаемых под углом атаки струями, истекающими из щелевого сопла.

В ИПМех РАН разработано и изготовлено из нержавеющей стали щелевое сопло с размерами прямоугольного выходного сечения 120×8 мм при длине сопла 120 мм. Можно было ожидать, что при попытке пропустить закрученный осесимметричный дозвуковой поток через столь узкую щель область существования разряда будет существенно меньше, чем при работе с открытым разрядным каналом, а возможно — вообще не удастся получить стабильный разряд. Эксперимент опроверг эти опасения — было обнаружено, что область существования разряда при работе плазмотрона со щелевым соплом в дозвуковом режиме имела нижнюю границу по мощности $\sim 16 \div 17$ кВт, в то время как при работе с открытым разрядным каналом достигалась минимальная мощность $12 \div 13$ кВт. Учитывая сложный пространственный характер течения в щелевом сопле, это различие следует признать минимальным.

5.2. Дозвуковой режим работы щелевого сопла

Дозвуковая струя воздушной плазмы, истекающая из щелевого сопла, показана в двух ракурсах на рис. 10

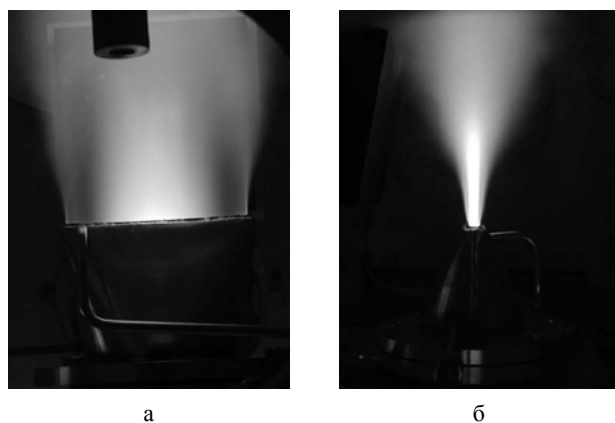


Рис. 10. Свободная дозвуковая струя, истекающая из щелевого сопла индукционного плазмотрона ВГУ-4. а - вид спереди, б - вид сбоку

Обтекание дозвуковой струей воздушной плазмы, истекающей из щелевого сопла, теплозащитной плитки с размером лицевой поверхности 150×150 мм, используемой в качестве модели, — плоской пластины под углом атаки, — показано в двух ракурсах на рис. 11.

5.3. Сверхзвуковой режим работы щелевого сопла

Площадь выходного сечения использованного щелевого сопла равна площади критического сечения звукового сопла с круглым выходным сечением диаметром 35 мм. Сверхкритический перепад давлений на сопле и, следовательно, сверхзвуковые плазменные струи на плазмотроне ВГУ-4 удаётся получать при использовании звуковых сопел с диаметром до 50 мм, а при больших мощностях — даже с диаметром критического сечения 60 мм. Поэтому сверхзвуковые струи были получены и с использованием щелевого сопла. Область нагрева при обтекании поверхности теплозащитной плитки под углом атаки получается при этом уже и длиннее, чем в дозвуковом режиме.

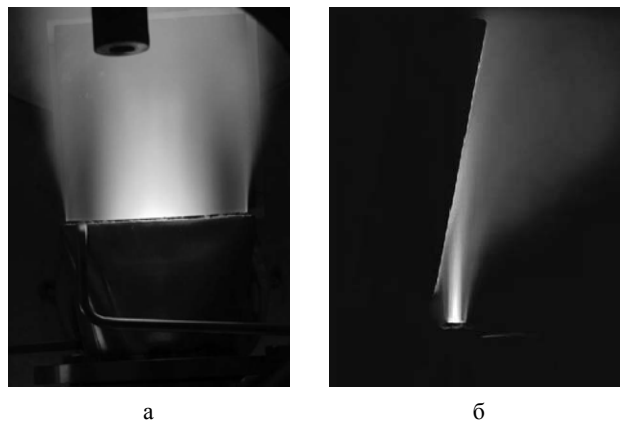


Рис. 11. Обтекание теплозащитной плитки под углом атаки дозвуковой струей воздушной плазмы, истекающей из щелевого сопла индукционного плазмотрона ВГУ-4. а - вид спереди, б - вид сбоку

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Применение удлиненного секционированного разрядного канала переменного сечения позволило получить «спектрально чистые» струи воздушной плазмы с энтальпиями менее 5 МДж/кг при сохранении высокого качества потока. Это означает, что на индукционном плазмотроне удалось реализовать уровень температур ~ 3000 К вполне достижимый при горении, например в ЖРД. Однако, плазмотрон даёт возможность проведения исследований с чистыми газами, такими как азот, кислород, углекислый газ при сохранении всех преимуществ метода индукционного нагрева газовых потоков.

2. Проведение экспериментов внутри разрядного канала индукционного плазмотрона позволяет существенно повысить максимальный тепловой поток по сравнению с испытаниями в дозвуковых плазменных струях. Максимальный тепловой поток в критической точке охлаждаемой медной модели с радиусом полусферического носка 15 мм достиг ~ 700 Вт/см². Экстраполяция имеющихся экспериментальных данных по энтальпии внутри разрядного канала с учётом имеющихся расчётных данных позволяет сделать оценку, что в зоне максимальных тепловых потоков энтальпия на оси струи не ниже 50 МДж/кг, что соответствует скорости входа в атмосферу 10 км/с.

3. Экспериментально подтверждена возможность работы индукционного плазмотрона ВГУ-4 со щелевым соплом в дозвуковом и сверхзвуковом режимах и определены основные направления его совершенствования.

СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ТЗМ — теплозащитный материал

 N — мощность, кВт P — давление, hPa T — температура q — тепловой поток, Вт/см² Z — расстояние вдоль оси симметрии разрядного канала, мм

Индексы:

 e — параметры на внешней границе пограничного слоя w — параметры на поверхности модели ap — мощность анодного питания ВЧ-генератора плазматрона (anode power)**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Kolesnikov A.F. The Concept of Local Simulation for Stagnation Point Heat Transfer in Hypersonic Flows: Applications and Validation. AIAA Paper 2000-2515, June 2000.
2. Yakushin M., Gordeev A., Vennemann D., Novelli A. Mass Loss of SiC Sample Surfaces Under Different Flow Conditions // AIAA Paper 98-2605, 1998.
3. Kolesnikov A.F., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A., Yakushin M.I. Study of Quartz Surface Catalycity in Dissociated Carbon Dioxide Subsonic Flows // J. of Spacecraft and Rockets, Vol. 37. N. 5. 2000. Pp. 573–579.
4. Афонина Н.Е., Васильевский С.А., Громов В.Г., Колесников А.Ф., Першин И.С., Сахаров В.И., Якушин М.И. Течение и теплообмен в недорасширенных струях воздуха, истекающих из звукового сопла плазматрона // МЖГ. № 5. 2002. С. 156–168.

5. Дорошенко В.М., Мысова В.М., Рулёв Ю.К., Якушин М.И. Измерение энтальпии в дозвуковых высокотемпературных струях азота и воздуха на индукционном плазматроне. // ИФЖ. Т. 53. №3. 1987. С. 492 – 493.
6. Kolesnikov A.F., Gordeev A.N., Vasil'evskii S.A., Sakharov V.I. Codes-to-experiment comparison for subsonic inductive air plasma flows in the IPG-4 plasmatron // Proc. 7th Int. Workshop on Magnetoplasma Aerodynamics. Moscow, 2007 (в печати).
7. Murzinov I.N., Rumynsky A.N., Vlasov V.I., Zalogin G.N., Knotko V.B. Earth Entry of the Vehicle with the Mars Ground Samples // Proc. 4th European Symposium on Aerothermodynamics of Space Vehicles. Capua, Italy. ESA SP-487. 2002. Pp. 289–296.
8. Gordeev A.N., Pershin I.S. Widening of Plasmatron Potentialities for Re-entry Simulation Using Tests inside Discharge Channel // Proc. 3rd Symposium on Atmospheric Reentry Vehicles and Systems. March 2003, Arcachon, France.
9. Gordeev A.N., Kolesnikov A.F., Kononov S.V. Comparative Characterization of the IPG-4 Inductive Plasmatron in Subsonic and Supersonic Regimes of Air Plasma Flows // Proc. Int. Conf. on Methods of Aerophysical Research. Novosibirsk, Russia. Publishing House "Nonparel". 2004. Part I. Pp. 106–111.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 05-01-00844), программы Президиума РАН (проект П09) и Проекта МНТЦ 3151.