

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ВХОДА СПУСКАЕМОГО АППАРАТА EXOMARS В АТМОСФЕРУ МАРСА НА ИНДУКЦИОННОМ ПЛАЗМОТРОНЕ ВГУ-4

А.Н. Гордеев, А.Ф. Колесников, С.А. Васильевский

*Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН,  
Москва, 119526, проспект Вернадского 101-1*

### Аннотация

На высокочастотном индукционном плазматроне ВГУ-4 получены дозвуковые потоки плазмы марсианской атмосферы (97% CO<sub>2</sub> + 3% N<sub>2</sub>) с близкими к заданным значениям энтальпии 13.8 и 9 МДж/кг при давлениях торможения 80 и 40 гПа. В четырех реализованных режимах измерены тепловые потоки к серебру, меди, нержавеющей стали и кварцу. Во всех исследованных режимах максимальный тепловой поток наблюдается к серебряной поверхности, а минимальный – к кварцевой, при этом во всех режимах тепловой поток к меди выше, чем к нержавеющей стали. Обнаружено, что для получения максимального теплового потока к серебряной поверхности в потоке диссоциированного углекислого газа требуется окисление датчика в потоке в течение 15–20 минут, причём после вывода калориметра из струи хотя бы на несколько минут и его повторного ввода в струю тепловой поток существенно снижается и необходимо проводить повторную тренировку поверхности в потоке плазмы углекислого газа в течение не менее 5 минут.

### SIMULATION OF ENTRY HEATING CONDITIONS FOR THE EXOMARS VEHICLE USING THE IPG-4 PLASMATRON

A.N. Gordeev, A.F. Kolesnikov, S.A. Vasil'evskii

*Institute for problems in mechanics RAS, Russia, Moscow, 119526*

The IPG-4 plasmotron has been used to obtain subsonic flows of dissociated Martian atmosphere composition (97% CO<sub>2</sub> + 3% N<sub>2</sub>) with specified enthalpies 13.8 MJ/kg and 9 MJ/kg at stagnation pressures 80 gPa and 40 gPa. The four regimes were realized close to specified conditions to measure stagnation point heat fluxes to water-cooled surfaces of Ag, Cu, stainless steel and SiO<sub>2</sub>. Obtained results for all regimes have showed that maximum heat flux to silver is about two times higher than heat flux to quartz. Copper and stainless steel showed intermediate heat flux values and heat flux to copper was always higher than heat flux to stainless steel. It is necessary to oxidize silver surface in dissociated CO<sub>2</sub> flow during 15-20 minutes to reach the maximum heat flux. After few minutes break of plasma/surface interaction it is necessary to repeat training silver surface in CO<sub>2</sub> plasma again. This work has been carried out in the framework of the SACOMAR Project and supported by REA (EC) Grant No. 263210.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разрабатываются несколько программ исследования Марса, в том числе европейская программа EXOMARS. Одной из важнейших составляющих этой программы является разработка спускаемого аппарата. Выбор системы и материалов тепловой защиты аппарата зависит от тепловых нагрузок, которым подвергается поверхность тепловой защиты при движении в достаточно разреженной атмосфере Марса, состоящей в основном из углекислого газа (97% CO<sub>2</sub> + 3% N<sub>2</sub>).

Аэродинамический нагрев зависит от геометрии аппарата, свойств атмосферы, траектории входа и в свою очередь определяется конвективными и лучистыми тепловыми потоками. Траектория входа аппарата EXOMARS характеризуется скоростью менее 6 км/с. В этих условиях определяющую роль в нагреве поверхности аппарата играют конвективные тепловые потоки, которые существенно зависят от каталитических гетерогенных процессов рекомбинации атомов O и молекул CO с образованием молекул O<sub>2</sub> и CO<sub>2</sub>. Именно неизвестные скорости этих реакции на поверхности тепловой защиты вносят наибольшую неопределенность в расчеты обтекания аппарата гиперзву-

ковыми потоками смеси CO<sub>2</sub> и N<sub>2</sub> и теплообмена в рамках численных решений соответствующих задач аэротермодинамики входа в атмосферу [1-4].

Коэффициенты каталитической рекомбинации атомов O и молекул CO в реакциях O + O → O<sub>2</sub> и CO + O → CO<sub>2</sub> должны включаться в число определяющих термодинамических параметров.

Определение этих параметров для теплозащитных материалов при натуральных высоких температурах поверхности возможно на основе экспериментов по теплообмену, проводимых на мощных ВЧ-плазматронах.

Составная часть методики определения каталитической активности материалов в дозвуковых потоках диссоциированного углекислого газа [5] заключается в измерениях тепловых потоков к различным водоохлаждаемым поверхностям металлов и кварца с целью демонстрации теплового эффекта поверхностного катализа, определения каталитической шкалы материалов и нахождения наиболее каталитического материала, который можно использовать в качестве стандартного при восстановлении энтальпии потока. Этим последним вопросам и посвящена настоящая работа.

В дозвуковых струях смеси 97% CO<sub>2</sub> + 3% N<sub>2</sub> измерены тепловые потоки к поверхностям серебра, меди, нержавеющей стали и кварца в четырех режимах

при заданных значениях энтальпии и давления торможения.

Установлено, что шкала каталитичности этих материалов располагается в этом же порядке:  $Ag > Cu > \text{сталь} > SiO_2$ . Зарегистрировано окисление поверхности серебра в результате длительного воздействия на нее потока диссоциированного углекислого газа. При этом тепловой поток выходит на максимальное значение, которое принято соответствующим идеально каталитической поверхности, за 15 минут.

Тепловые потоки в критической точке цилиндрической модели диаметром 50 мм измерялись проточными калориметрами, изготовленных из монолитных кусков материалов.

Энтальпия дозвукового потока восстанавливалась расчетным путем по измеренному тепловому потоку к поверхности сильно окисленного серебра измеренному скоростному напору по методике [5].

Заданные режимы, соответствующие траектории аппарата EXOMARS, для измерения тепловых потоков приведены в табл. 1.

Таблица 1

Заданные режимы для измерения тепловых потоков

Режим	$h_e$ , МДж/кг	$P_{st}$ , гПа	$D_m$ , мм
1	13.8	80	50
2	9	80	50
3	13.8	40	50
4	9.0	40	50

## 2. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

### 2.1. Экспериментальная установка

Эксперименты проводились на высокочастотном индукционном плазмотроне ВГУ-4 ИПМех РАН. Основные параметры установки приведены в табл. 2.

Таблица 2

Основные параметры плазмотрона ВГУ-4

Мощность анодного питания, кВт	12÷76
Частота, МГц	1.76
Диаметр разрядного канала, мм	80
Давление в барокамере, гПа	6÷1000
Расход газа (воздух, $N_2$ ), г/с	2÷6
Рабочие газы	воздух, $N_2$ , $O_2$ , $CO_2$ , Ag и их смеси
Режимы работы	дозвуковой и сверхзвуковой
Энтальпия (воздух), МДж/кг	5÷50

Система регистрации данных плазмотрона ВГУ-4 реализована с использованием персонального компьютера Pentium-IV/2.8ГГц и внешнего модуля АЦП E-270 L-Card (15-bit, 16 каналов, частота опроса 100 Гц/канал). Используемый АЦП обеспечивает возможность конфигурировать его под нужды конкретного эксперимента путём использования plug-in модулей для измерения стандартных сигналов  $\pm 5$  В,  $\pm 10$  В, 0÷20 мА, а также модулей для работы с термопарами и термосо-

противлениями. Программа “АС-Test” использовалась для создания сценариев экспериментов, регистрации параметров эксперимента на жёсткий диск компьютера и для графического и цифрового представления основных параметров эксперимента и измеряемых величин в реальном времени.

Предварительные эксперименты проводились в свободных дозвуковых струях углекислого газа, а зачётные эксперименты — в смеси 97% $CO_2$ +3% $N_2$ . Для получения потоков плазмы с низкой энтальпией использован удлинённый разрядный канал с выходным водоохлаждаемым цилиндрическим участком длиной 80 мм и диаметром 40 мм. Конфигурация разрядного канала представлена на рис. 1, а на рис. 2 — фотография обтекания водоохлаждаемой Евромодели струей плазмы 97% $CO_2$ +3% $N_2$ .

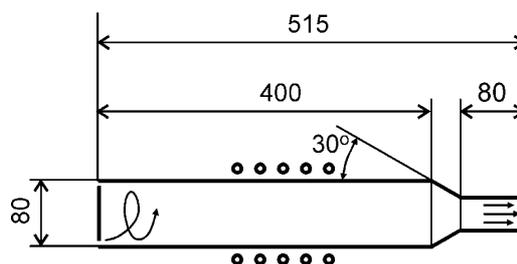


Рис. 1. Схематический чертёж удлинённого разрядного канала с выходным водоохлаждаемым цилиндрическим участком длиной 80 мм и диаметром 40 мм

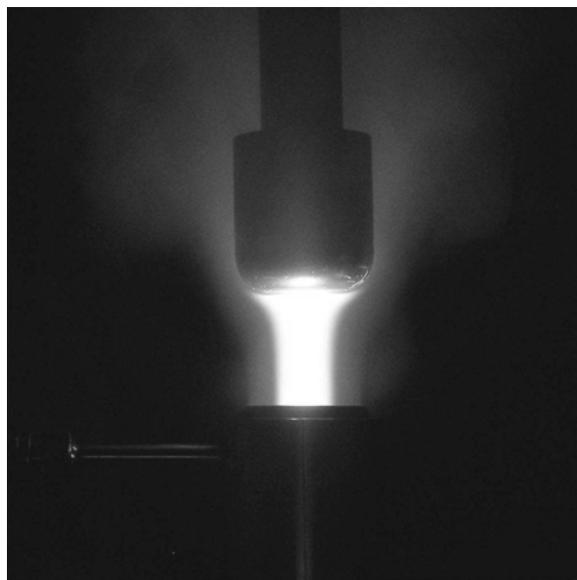


Рис. 2. Обтекание водоохлаждаемой Евромодели дозвуковой струей плазмы 97% $CO_2$ +3% $N_2$  при  $P_{st} = 80$  гПа,  $N_{ap} = 42$  кВт и  $G = 2.3$  г/с

### 2.2. Измерение тепловых потоков

Для измерения тепловых потоков в критической точке водоохлаждаемой модели использовались стационарные водоохлаждаемые калориметры [5, 6], изготовленные из четырёх материалов: серебра, бескислородной меди, нержавеющей стали X18H10T и кварца. Носок модели имел форму Евромодели (ESA standard model — цилиндр с плоским торцом диаметром 50 мм и с радиусом скругления кромки 11.5 мм).

Диаметр центрального канала, в котором размещался калориметр, а также термопара и трубки подвода и отвода охлаждающей воды, составлял 14 мм.

Измерение расхода охлаждающей воды осуществлялось ротаметром с индивидуальной тарировкой, а разность температур охлаждающей воды на входе и выходе из калориметра измерялась экранированной дифференциальной термопарой хромель-алюмель, изготовленной в ИПМех РАН.

Все калориметры имели диаметр тепловоспринимающей поверхности 13.8 мм, причём тепловоспринимающая поверхность и боковая поверхности медного, стального и кварцевого калориметров были изготовлены из монолитных кусков этих материалов, а калориметр с серебряной тепловоспринимающей поверхностью был изготовлен путём напайки на медный калориметр серебряной пластины толщиной 0.5 мм с последующей механической обработкой боковой поверхности, что позволило получить полностью идентичную форму всех калориметров.

### 2.3. Измерение давлений

Для проведения измерений давления торможения в критической точке модели и скоростного напора использовалась та же медная водоохлаждаемая модель, что и для измерения тепловых потоков, то есть форма носка модели соответствовала форме Евромодели, а диаметр приёмного отверстия составлял 14 мм

Статическое давление на стенке барокамеры измерялось датчиком «Элемер АИР-20/М2-ДА модель 15» в режиме с полной шкалой 100 гПа. В этом режиме точность измерений составляла  $\pm 0.3$  гПа.

Скоростной напор определялся с помощью трубки Пито как разность между давлением в критической точке модели и давлением на стенке барокамеры. Дифференциальный датчик давления «Элемер АИР-20/М2-ДД модель 400» использовался в режиме с полной шкалой 10 гПа. В этом режиме точность измерений составляла  $\pm 0.02$  гПа. Давление торможения в критической точке модели определялось как сумма статического и динамического давлений и выводилась на дисплей персонального компьютера в окне программы АС-Test в виде зависимости от времени и в цифровой форме, а также записывалось на жёсткий диск компьютера.

## 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

### 3.1. Предварительные эксперименты

Перед началом экспериментальной программы были выполнены некоторые предварительные эксперименты. В первую очередь продемонстрировано влияние каталитичности поверхности исследуемых материалов на тепловой поток к водоохлаждаемой модели, обтекаемой потоком плазмы углекислого газа. Для каждого из четырёх материалов была получена зависимость теплового потока от мощности анодного питания. Результаты этих измерений приведены на рис. 3, из которого видно, что самый высокий тепловой поток зарегистрирован к серебряной поверхности, предварительно окисленной в потоке диссоциированного углекислого газа, а самый низкий — к поверхности кварца. Тепловые потоки к меди и к нержавеющей стали находятся почти посередине между тепловыми потоками к се-

ребру и кварцу, но во всём исследованном диапазоне мощностей тепловые потоки к меди немного выше тепловых потоков к нержавеющей стали.

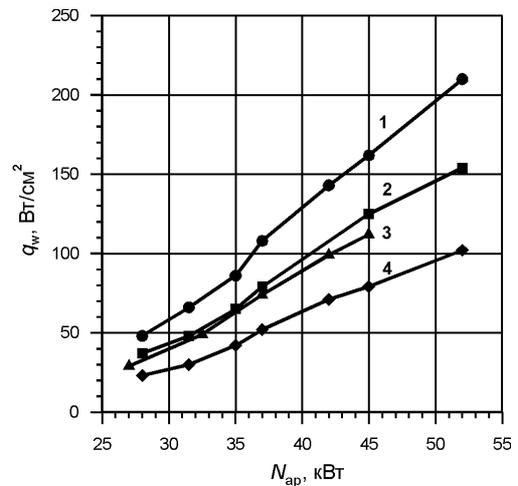


Рис. 3. Тепловой поток к водоохлаждаемым поверхностям в критической точке модели, обтекаемой потоком плазмы углекислого газа в зависимости от мощности ВЧ-генератора по анодному питанию ( $G = 2.3$  г/с,  $P_{ic} = 80$  гПа). 1 – Ag, 2 – Cu, 3 – нержавеющая сталь X18H10T, 4 – SiO<sub>2</sub>

Зависимость теплового потока к водоохлаждаемой медной поверхности от объёмной концентрации азота в углекислом газе приведена на рис. 4.

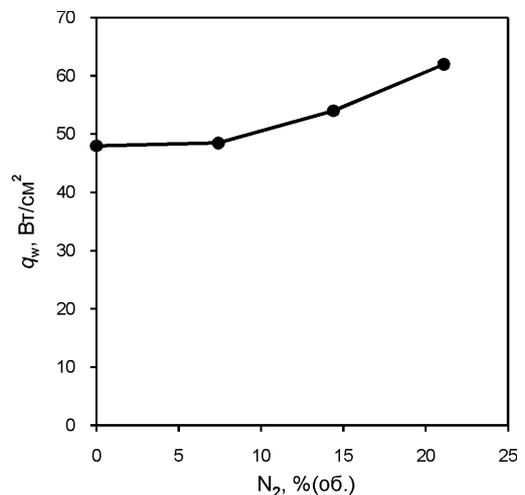


Рис. 4. Зависимость теплового потока к медному калориметру от объёмной концентрации азота в смеси CO<sub>2</sub>+N<sub>2</sub>

Как видно из рис. 4, концентрации азота в углекислом газе ниже 5% на тепловой поток не влияют.

Расчёты термодинамических свойств и электропроводности в широком диапазоне температур при давлениях 40 и 80 гПа также показали, что 3% азота в углекислом газе не приводят к сколько-нибудь значимым изменениям этих параметров по сравнению с чистым углекислым газом.

На основании этих экспериментальных и расчётных данных было принято решение о возможности проведения калибровочных экспериментов в струях плазмы чистого углекислого газа.

Для стабилизации теплового потока к серебряной поверхности в потоке диссоциированного углекислого газа требуется окисление датчика в потоке в течение 15÷20 минут. Уже после нескольких минут в струе диссоциированного углекислого газа на полированной серебряной поверхности образуется оксидный слой, при этом поверхность становится матово-чёрной, похожей на поверхность, покрытую сажей. Этот оксидный слой имеет слабую адгезию к поверхности и может быть почти полностью удалён, например, тампоном, смоченным спиртом.

На рис. 5 показана динамика изменения теплового потока к полированной серебряной поверхности при обтекании её потоком диссоциированного углекислого газа.

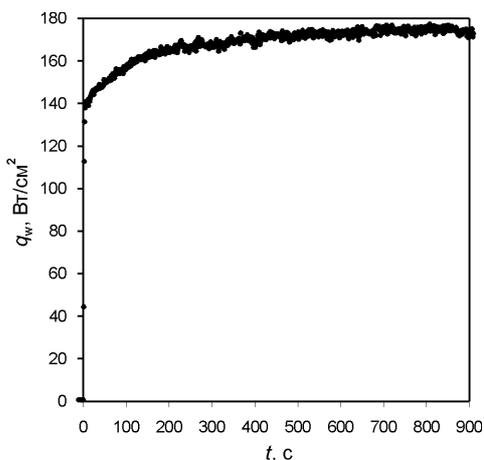


Рис. 5. Зависимость от времени теплового потока к серебряной поверхности в потоке диссоциированного углекислого газа. ( $P_{tc} = 76$  гПа,  $G = 2.8$  г/с,  $N_{ap} = 45$  кВт,  $Z = 40$  мм)

При определении энтальпии по тепловому потоку в струях диссоциированного воздуха эталонным высококаталитическим материалом является медь, причём тепловой поток к медной поверхности после её выдержки в струе диссоциированного немного возрастает.

Окисленный медный калориметр может храниться неограниченно долго и тепловой поток к нему останется неизменным, даже если между измерениями прошло больше года. Серебряная поверхность демонстрирует другие свойства.

Первоначально было обнаружено, что на следующий день после тренировки калориметра последнее значение теплового потока не воспроизвелось, при том что воспроизводимость режимов высокочастотного индукционного плазмотрона по тепловому потоку составляет 1÷2% и потребовалась дополнительная тренировка датчика в струе для того, чтобы тепловой поток вернулся к величине, полученной днём ранее.

Более того, оказалось, что после вывода калориметра из струи хотя бы на несколько минут и повторного ввода в струю тепловой поток заметно снижается и необходимо проводить повторную экспозицию поверхности в потоке плазмы углекислого газа в течение не менее 5 минут.

На рис. 6 показана динамика изменения теплового потока к окисленной серебряной поверхности после её вывода из струи на 5 минут.

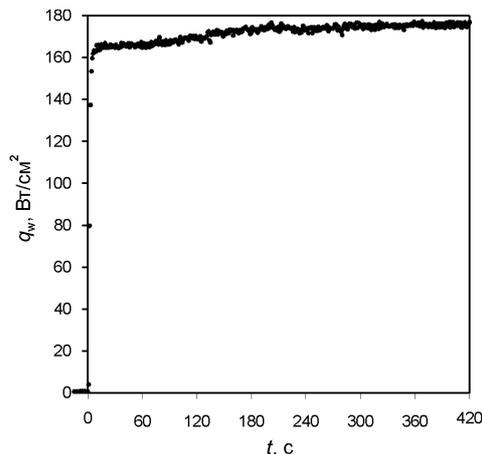


Рис. 6. Зависимость от времени теплового потока к серебряной поверхности в потоке диссоциированного углекислого газа после 5-минутного перерыва между экспериментами ( $P_{tc} = 76$  гПа,  $G = 2.8$  г/с,  $N_{ap} = 45$  кВт,  $Z = 40$  мм)

Из полученных результатов следует, что если тепловой поток к серебряной поверхности измеряется с целью определения энтальпии потока диссоциированного углекислого газа, то перед каждым измерением необходимо осуществлять 15÷20-минутную выдержку калориметра в потоке и проводить необходимые измерения в одном или в нескольких режимах, не выводя датчик из струи.

Кроме того, полученный результат ставит под сомнение возможность использования для определения энтальпии потоков диссоциированного углекислого газа нестационарных датчиков с серебряной поверхностью, вводимых в струю на короткое время.

### 3.2. Калибровочные зависимости тепловых потоков и скоростных напоров

Зависимость скоростного напора и теплового потока от мощности анодного питания ВЧ-генератора при  $P_{tc} = 76$  гПа,  $G = 2.8$  г/с,  $Z = 40$  мм показаны на рис. 7 и рис. 8 соответственно.

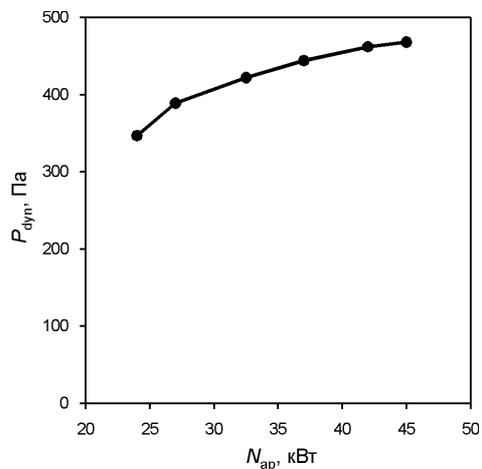


Рис. 7. Зависимость скоростного напора от мощности ВЧ-генератора по анодному питанию.  $CO_2$ ,  $P_{tc} = 76$  гПа,  $G = 2.8$  г/с,  $Z = 40$  мм

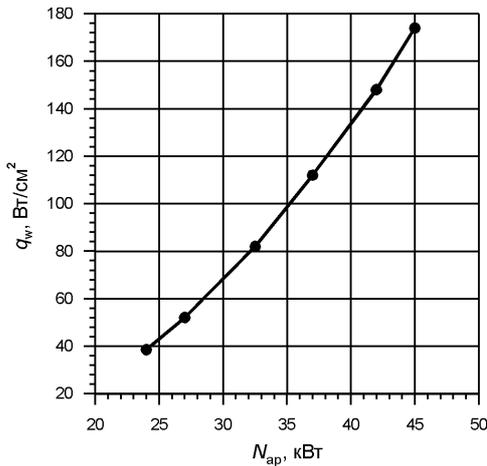


Рис. 8. Зависимость теплового потока к поверхности серебра в потоке CO<sub>2</sub> от мощности ВЧ-генератора по анодному питанию.  $P_{ic} = 76$  гПа,  $G = 2.8$  г/с,  $Z = 40$  мм

Зависимости скоростного напора и теплового потока от расстояния между моделью и выходным сечением разрядного канала при  $P_{ic} = 36$  гПа,  $N_{ap} = 35$  кВт,  $G = 2.0$  г/с показаны соответственно на рис. 9 и рис. 10.

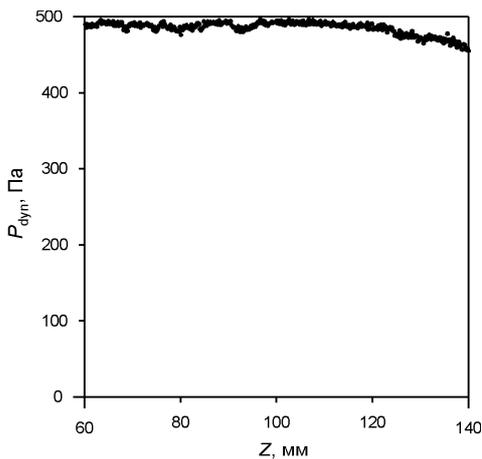


Рис. 9. Зависимость скоростного напора от расстояния между моделью и выходным сечением разрядного канала. CO<sub>2</sub>,  $P_{ic} = 36$  гПа,  $N_{ap} = 35$  кВт,  $G = 2.0$  г/с.

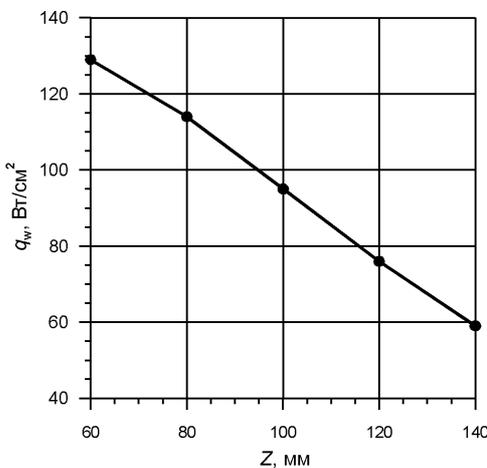


Рис. 10. Зависимость теплового потока к поверхности серебра от расстояния между моделью и выходным сечением разрядного канала. CO<sub>2</sub>,  $P_{ic} = 36$  гПа,  $N_{ap} = 35$  кВт,  $G = 2.0$  г/с

Отметим, что из-за крайне слабой зависимости скоростного напора от положения модели на оси струи, (см. рис. 9), эксперимент проводился не путем перемещения трубки Пито от точки к точке, а посредством непрерывного перемещения трубки Пито вдоль оси струи со скоростью 0.2 мм/с.

Учитывая слабую зависимость скоростного напора от мощности при давлении 76 гПа и слабую зависимость скоростного напора от расстояния до модели при давлении 36 гПа, а также характерную для индукционных плазмотронов слабую зависимость теплового потока к высококаталитической поверхности от давления, калибровочные зависимости для тепловых потоков и скоростных напоров, представленные на рис. 7–10, можно использовать для получения калибровочных зависимостей для энтальпии при давлениях торможения 80 и 40 гПа.

### 3.3. Определение энтальпии по тепловому потоку к поверхности серебряного датчика в углекислом газе и выбор режимов

Энтальпия на внешней границе пограничного слоя  $h_e$  является одним из ключевых параметров и для определения каталитической активности поверхности, и для определения условий, в которых проведено испытание материала, и сопоставления их с натурными условиями. В рамках методики ИПМех РАН, энтальпия  $h_e$  может определяться либо прямым измерением с помощью энтальпиемера, либо расчётным путем по измеренному тепловому потоку  $q_w$  к стандартному высококаталитическому материалу [5]. Прямое измерение энтальпии является лучшим способом при условии его хорошей точности. Но в случае испытаний в потоке диссоциированного CO<sub>2</sub> прямое измерение энтальпии сопряжено с рядом трудностей и может оказаться неточным. Поэтому в данной работе энтальпия  $h_e$  определялась расчётным путем по измеренному тепловому потоку  $q_w$  к водоохлаждаемому калориметру с серебряной поверхностью, которая предполагается полностью каталитической,  $\gamma_w = 1$ .

Алгоритм определения энтальпии следующий.

- ♦ Статическое давление  $P$  определяется в барокамере ВГУ-4 для условий экспериментов.
- ♦ Тепловой поток  $q_w$  измеряется для условий, совпадающих с условиями термохимических испытаний материалов или определения каталитических свойств их поверхности, на расстоянии  $Z$  от среза разрядного канала, где будет располагаться испытываемый образец материала.
- ♦ Скоростной напор  $P_{dyn}$  измеряется с помощью трубки Пито для того же режима работы плазмотрона на том же расстоянии  $Z$  от среза разрядного канала. По значению  $P_{dyn}$  определяется характерная скорость  $V$ :

$$P_{dyn} = k_p \cdot 0.5 \rho_e V_s^2$$

Здесь  $\rho_e$  – плотность на внешней границе пограничного слоя;  $k_p = k_p(\text{Re})$  – эмпирический коэффициент, зависящий от числа Рейнольдса, который в расчетах принимался равным 1.05.

- ◆ Энтальпия  $h_e$  определяется с помощью программы Gamma в ходе численного решения обратной задачи, из условия равенства расчетного теплового потока  $q_{wcalc}$  к идеально каталитической поверхности и измеренного значения  $q_w$ :

$$q_{wcalc}(h_e, \gamma_w, T_w) = q_w$$

Здесь  $T_w = 300$  К – температура наружной поверхности калориметра;  $\gamma_w = 1$  – эффективная вероятность поверхностной рекомбинации. В этих расчетах по программе Gamma значения  $P$  и  $V_s$  используются в качестве входных данных.

По энтальпии  $h_e$  с помощью уравнений химического равновесия определяется соответствующая температура  $T_e$ .

Описанный метод определения энтальпии основан на следующих предположениях:

- ◆ Серебряная поверхность калориметра является высококаталитической в потоке  $CO_2$ , что подтверждается настоящими экспериментами и литературными данными [7, 8].
- ◆ Истекающая из канала плазмотрона дозвуковая струя диссоциированного  $CO_2$  является равновесной вблизи внешней границы пограничного слоя перед моделью, хотя сам пограничный слой химически неравновесный.
- ◆ Каталитические реакции рекомбинации на поверхности модели имеют 1-й порядок и могут быть описаны простой моделью [5] с использованием единственного параметра  $\gamma_w$  – эффективной вероятности рекомбинации,  $\gamma_O = \gamma_{CO} = \gamma_C = \gamma_w$ .

Для условий экспериментов на ВГУ-4 пограничный слой перед моделью не может считаться бесконечно тонким, его толщина  $\delta$ , отнесенная к радиусу модели  $R_m = 25$  мм, составляет  $\delta/R_m \sim 0.2 \div 0.3$ . Поэтому в расчетах по программе Gamma используется модель пограничного слоя конечной толщины [9], учитывающая также завихренность струи на внешней границе пограничного слоя. Для задания граничных условий в рамках этой модели необходимо использовать безразмерные параметры: толщину пограничного слоя, скорость, градиент скорости и завихренность потока на внешней границе пограничного слоя. Эти параметры определяются предварительно с помощью расчетов течения в разрядном канале плазмотрона и обтекания модели струей, истекающей из канала, на основе численного решения уравнений Навье–Стокса с помощью программ Alpha и Beta [10].

Результаты определения энтальпии по описанной выше методике на основании экспериментальных данных, приведённых на рис. 7–11, представлены для давления в барокамере 76 гПа на рис. 11, а для давления в барокамере 36 гПа — на рис. 12.

При подборе режимов после каждого измерения теплового потока и скоростного напора производилось определение энтальпии, показывавшее возможность или невозможность реализации её заданных значений. Отметим, что для давления 80 гПа требуемый диапазон энтальпий был реализован с первой попытки посредством изменения мощности, вкладываемой в плазму. Напротив, при давлении 40 гПа реализация

энтальпии 9 МДж/кг потребовала большого количества попыток с использованием различных комбинаций трёх величин: мощности, расхода и расстояния от выходного сечения разрядного канала до модели. Все попытки получить требуемую низкую энтальпию за счёт изменения мощности при различных расходах газа оказались неудачными. В итоге необходимые режимы были реализованы посредством перемещения модели вдоль оси струи при постоянном расходе газа и постоянной мощности.

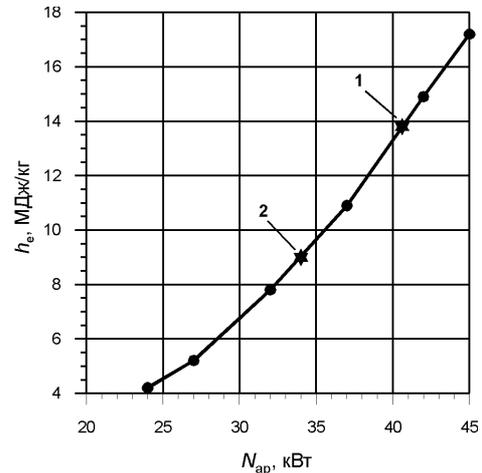


Рис. 11. Зависимость энтальпии от мощности анодного питания ВЧ-генератора.  $CO_2$ ,  $P_{tc} = 76$  гПа,  $G = 2.8$  г/с,  $Z = 40$  мм. 1 – режим 1, 2 – режим 2

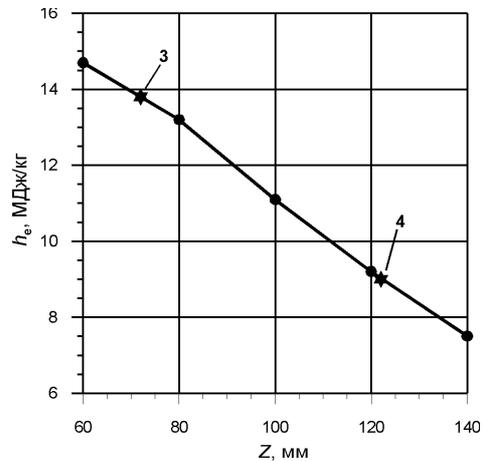


Рис. 12. Зависимость энтальпии от расстояния между моделью и выходным сечением разрядного канала.  $CO_2$ ,  $P_{tc} = 36$  гПа,  $G = 2.0$  г/с,  $N_{ap} = 35$  кВт. 3 – режим 3, 4 – режим 4

Параметры, обеспечивающие реализацию четырёх выбранных режимов, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Выбранные режимы плазмотрона ВГУ-4

Режим	$P_{st}$ , гПа	$h_e$ , МДж/кг	$N_{ap}$ , кВт	$Z$ , мм	$G$ , г/с
Режим 1	80	13.8	40.4	40	2.8
Режим 2	80	9.0	34	40	2.8
Режим 3	40	13.8	35	122	2.0
Режим 4	40	9.0	35	72	2.0

### 3.4. Результаты измерения тепловых потоков в выбранных режимах

Измерения тепловых потоков в выбранных режимах проводились в струях диссоциированной смеси газов 97% CO<sub>2</sub> + 3% N<sub>2</sub>.

Измерения тепловых потоков к серебряной поверхности во всех четырёх режимах выполнены в одном эксперименте общей продолжительностью 28 минут после 20-минутного окисления поверхности датчика в струе чистого углекислого газа при  $N_{ap} = 45$  кВт,  $P_{tc} = 76$  гПа. После завершения тренировки датчика, не выдвигая модель из струи, в углекислый газ добавлялось 3% N<sub>2</sub> и проводились измерения теплового потока при последовательности реализации режимов 1 – 2 – 3 – 4.

Измерения тепловых потоков для каждой из других поверхностей также проводились в одном эксперименте без вывода модели из струи при указанной выше последовательности реализации режимов. Перед экспериментом медный датчик был предварительно окислен в струе диссоциированного воздуха.

Результаты измерений тепловых потоков в режимах 1 и 2 при давлении торможения 80 гПа представлены на рис. 13, а результаты измерений тепловых потоков в режимах 3 и 4 при давлении торможения 40 гПа представлены на рис. 14.

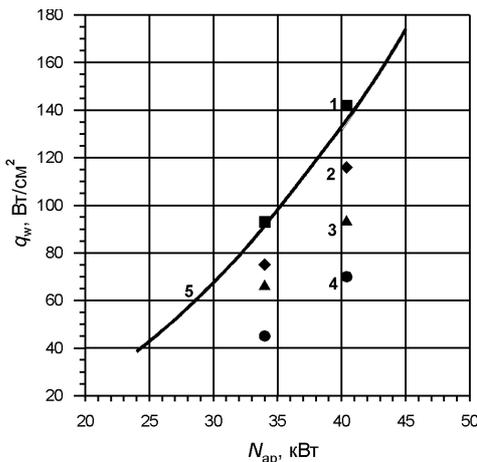


Рис. 13. Тепловые потоки к исследуемым поверхностям в режиме 1 ( $N_{ap} = 40.4$  кВт) и в режиме 2 ( $N_{ap} = 34$  кВт). 1 – Ag, 2 – Cu, 3 – нержавеющая сталь X18H10T, 4 – SiO<sub>2</sub>, 5 – Ag, калибровочная зависимость с рис. 8

### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В целом полученные результаты соответствовали тому, что ожидалось получить на основании данных предварительных экспериментов. Шкала каталитичности исследованных материалов располагалась в следующем порядке: Ag > Cu > сталь > SiO<sub>2</sub>. В струях плазмы смеси газов 97%CO<sub>2</sub>+3%N<sub>2</sub> разница между тепловыми потоками к меди и к нержавеющей стали стала больше той, которая наблюдалась в предварительных экспериментах в плазме чистого углекислого газа.

Следует также обратить внимание на тот факт, что тепловые потоки, к серебряной поверхности, полученные в смеси 97%CO<sub>2</sub>+3%N<sub>2</sub>, во всех четырёх исследо-

ванных режимах, как видно из рис. 13 и рис. 14, оказались чуть выше калибровочных кривых. Это заставило провести дополнительные измерения давления торможения во всех четырёх заданных режимах и заново определить для них энтальпию. Полученные результаты приведены в табл. 4.

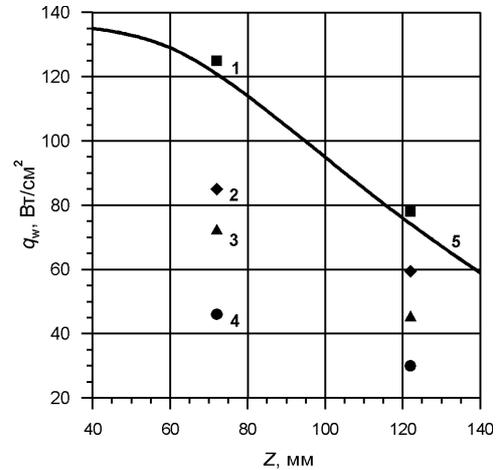


Рис. 14. Тепловые потоки к исследуемым поверхностям в режиме 3 ( $Z = 72$ мм) и режиме 4 ( $Z = 122$ мм). 1 – Ag, 2 – Cu, 3 – нержавеющая сталь X18H10T, 4 – SiO<sub>2</sub>, 5 – Ag, калибровочная зависимость с рис. 10

Таблица 4

Заданные и полученные в эксперименте энтальпии и давления торможения

Режим	$h_e$ , MJ/kg		$P_{st}$ , hPa	
	задано	получено	задано	получено
Режим 1	13.8	14.0	80	80.1
Режим 2	9	8.8	80	79.9
Режим 3	13.8	14.4	40	39.8
Режим 4	9	9.5	40	39.8

Во всех случаях реализованная энтальпия оказалась чуть выше заданной, причём отклонения находились в диапазоне 1.4 ÷ 5.6 %. Несомненно, такая точность реализации заданной энтальпии вполне удовлетворительна, однако легко видеть, что величина погрешности монотонно увеличивается от режима 1 к режиму 4, но именно в этом порядке и реализовывались режимы в эксперименте по измерению тепловых потоков к серебряной поверхности. Учитывая, что продолжительность указанного эксперимента составляла 28 минут, можно предположить, что окисленная серебряная поверхность даже после 20-минутного воздействия диссоциированного углекислого газа стабилизировалась не окончательно и слабый рост её каталитической активности продолжался и во время проведения измерений теплового потока.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дозвуковых потоках плазмы 97%CO<sub>2</sub> + 3%N<sub>2</sub> реализованы близкие к заданным режимы по энтальпии и давлению торможения и выполнена диагностика этих режимов.

Проведённые измерения тепловых потоков к поверхностям серебра, меди, нержавеющей стали X18H10T и кварца показали, что во всех исследованных режимах максимальный тепловой поток наблюдается к серебряной поверхности, а минимальный – к кварцевой. Тепловые потоки к меди и нержавеющей имеют промежуточные значения, но во всех режимах тепловой поток к меди выше, чем к нержавеющей стали.

Обнаружено, что для стабилизации теплового потока к серебряной поверхности в потоке диссоциированного углекислого газа требуется окисление датчика в потоке в течение 15÷20 минут, причём после вывода калориметра из струи хотя бы на несколько минут и повторного ввода в струю тепловой поток существенно снижается и необходимо проводить повторную экспозицию поверхности в потоке плазмы углекислого газа в течение не менее 5 минут.

Работа выполнена в рамках проекта SACOMAR при финансовой поддержке REA (EC) (грант № 263210).

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЧ — высокочастотный;  
 $D$  — диаметр, мм;  
 $G$  — расход, г/с;  
 $h$  — энтальпия, МДж/кг;  
 $N$  — мощность, кВт  
 $P$  — давление, гПа;  
 $R$  — радиус, мм;  
 $t$  — время, с;  
 $T$  — температура, К;  
 $q$  — тепловой поток, Вт/см<sup>2</sup>;  
 $Z$  — расстояние между моделью и выходным сечением канала;  
 $V$  — скорость, м/с;  
 $\gamma$  — вероятность гетерогенной рекомбинации;  
 $\delta$  — толщина пограничного слоя;  
 $\rho$  — плотность.

## Индексы:

$ap$  — анодное питание ВЧ-генератора  
 $calc$  — расчётное значение  
 $dyn$  — динамический;  
 $e$  — значение на внешней границе пограничного слоя;  
 $m$  — модель;  
 $st$  — значение в критической точке;  
 $tc$  — значение на стенке барокамеры;  
 $w$  — значение на стенке модели.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chen Y.-K., Henline W.D., and Tauber M.E. Mars Pathfinder Trajectory-Based Heating and Ablation Calculations // Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 32, No. 2, 1995, Pp. 225-230.
2. Mitcheltree R.A., and Gnoffo P.A. Wake Flow About the Mars Pathfinder Entry Vehicle // Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 32, No. 5, 1995, Pp. 771-776.
3. Chen Y.-K., Henline W.D., Stewart D.A., and Candler G.V. Navier-Stokes Solutions with Surface Catalysis for Martian Atmosphere Entry // Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 30, No. 1, 1993, Pp. 45-52.
4. Bose, D., Wright M.J., and Palmer G.E. Uncertainty Analysis of Laminar Aeroheating Predictions for Mars Entries // Journal of Thermophysics and Heat Transfer, Vol. 20, No. 4, 2006, Pp. 652-662.

5. Kolesnikov A.F., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A., Yakushin M.I. Study of Quartz Surface Catalycity in Dissociated Carbon Dioxide Subsonic Flows // Journal of Spacecraft and Rockets, Vol. 37, No. 5, Pp. 573-579.
6. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф., Якушин М.И. Исследование теплообмена в дозвуковых струях безэлектродного плазмотрона // Изв. АН СССР. МЖГ, 1983, №6, С. 129-135.
7. Greaves J.C., Linnett J.W. Recombination of Oxygen Atoms at Surfaces // Transactions of the Faraday Society. 1958, V.54, Pp. 1323–1330.
8. Melin G.A., Madix R.J. Energy Accommodation during Oxygen Atom Recombination on Metal Surfaces. Transactions of the Faraday Society. 1971, V.67, pp.198-211.
9. Колесников А.Ф., Якушин М.И. Об определении эффективных вероятностей гетерогенной рекомбинации атомов по тепловым потокам к поверхности, обтекаемой диссоциированным воздухом. Математическое моделирование, 1989, Т. 1, № 3, С. 44–60.
10. Васильевский С.А., Колесников А.Ф. Численное исследование течения и теплообмена в индукционном плазмотроне и определение каталитической активности материалов. В сб.: Актуальные проблемы механики. Механика жидкости, газа и плазмы. М., Наука, 2008. С.95-123.