

# ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ УНОСА МАССЫ УГЛЕРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПОТОКЕ ЧИСТОГО ДИССОЦИИРОВАННОГО АЗОТА

А.Н. Гордеев<sup>1</sup>, Г.Н. Залогин<sup>2</sup>, А.Ф. Колесников<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского Российской академии наук,  
119526 Москва, проспект Вернадского 101-1*

<sup>2</sup> *ЦНИИМАШ, 141070, Московская обл., г. Королев, ул. Пионерская, 4*

## Аннотация

На плазматроне ВГУ-4 проведено экспериментальное исследование скорости уноса массы углеродных материалов в дозвуковом потоке чистого диссоциированного азота. Были изучены три материала: два вида искусственного графита (В-2 и ГМЗ) и углерод-углеродный композиционный материал. Получены зависимости скорости уноса массы от температуры поверхности в диапазоне температур  $T_w = 1600\div 2300$  К при давлении  $p = 100$  гПа. Эксперименты показали, что скорость уноса массы графита В-2, уменьшается с ростом давления и слабо возрастает с ростом температуры, в то время как скорость уноса массы более чистых материалов, — графита ГМЗ и углерод-углеродного композиционного материала, — слабо убывает с ростом температуры. Для сравнения проведены измерения уноса массы графита при окислении его в струях высокоэнтальпийного воздуха при давлении  $p = 100$  гПа. Температура поверхности графита при экспериментах на воздухе почти не отличается от температуры поверхности графита, нагреваемого в азотной струе с идентичными определяющими параметрами режима испытаний, при этом скорость уноса массы графита на воздухе очень слабо зависит от температуры поверхности, то есть имеет место диффузионный режим окисления графита. Скорость уноса массы углеродных материалов в азотной струе при различных режимах на 1-2 порядка ниже скорости уноса массы в воздушной струе при аналогичных режимах испытаний.

## EXPERIMENTAL STUDY OF CARBON MATERIALS MASS LOSS IN DISSOCIATED FLOW OF PURE NITROGEN

A study of mass loss of carbon materials in subsonic flows of dissociated nitrogen was carried out using the IPG-4 plasmatron of IPMech RAS. Three carbon materials such as carbon-carbon material and two types of artificial graphite (V-2 and GMZ) have been tested. Experiments were made at surface temperature range 1600-2300 K and in the pressure range 25-400 hPa. Surface temperature of tested samples were regulated by means of changing of power injected to nitrogen plasma. Extra pure nitrogen was used in experiments at constant flow rate 2.4 g/s. Special measures were undertaken to avoid interaction of samples with residual oxygen and contact of heated samples with another high-temperature materials. Temperature dependencies of mass loss rate for tested materials have been obtained in the temperature range 1600÷2300 K at constant pressure 100 hPa and it turned out mass loss rate of the V-2 graphite increases with surface temperature but carbon-carbon material and the GMZ graphite shows decrease of mass loss rates at surface temperature increase. Also it was found that mass loss rate of the V-2 graphite decreases with pressure increase in the pressure range 25÷400 hPa and at constant surface temperature 2130 K. It should be specially emphasized that mass loss rates of tested carbon materials in dissociated nitrogen flows is only 1-2 orders of magnitude lower those in dissociated air flows with close governing parameters.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

При повышенных уровнях тепловых потоков, соответствующих входу аппаратов в атмосферу Земли после экспедиции к Марсу и другим планетам, в качестве теплозащиты предполагается использовать аблирующие материалы на основе углерода (углерод-углеродные материалы, углепластики, карбид кремния и т.п.). В зависимости от размера и массы аппарата, а также от траектории его входа в атмосферу Земли внешние условия (энтальпия, давление, температура поверхности, коэффициент теплообмена) меняются в широких пределах. Поэтому разрушение теплозащиты может происходить в различных режимах: кинетическом, диффузионном и сублимационном [1].

Для высоких скоростей входа ЛА характерны высокие степени диссоциации молекул кислорода и азота в ударном и пограничном слоях. При этом с поверхностью ТЗМ взаимодействуют атомы О и N, химически более активные, чем соответствующие молекулы. Принципиальным вопросом, до конца неясным в настоящее время, остается механизм взаимодействия твердого углерода (графита) с атомами азота. Воз-

можное влияние такого взаимодействия на унос массы углепластика рассмотрено в [2]. Непосредственное влияние атомов азота на унос массы углерода исследовалось экспериментально в [3].

Применение индукционного плазматрона дает возможность изучать термохимическое взаимодействие атомарного азота с углеродными материалами, такими как графит, пирографит и углерод-углеродные материалы, в широком диапазоне давления и температуры поверхности. Ещё одной важной особенностью экспериментов на плазматроне является возможность получения давлений и энтальпий, соответствующих реализуемому при спуске в атмосфере, что обеспечивает получение натуральных или весьма близких к ним концентраций атомарного азота в набегающем потоке.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТ

### 2.1. Экспериментальная установка

Все эксперименты были проведены в свободной дозвуковой струе диссоциированного азота высокочастотного индукционного плазматрона ВГУ-4, описанного в [4–6]. Мощность анодного питания ВЧ-гене-

ратора может изменяться в пределах 12÷72 кВт, давление в испытательной камере плазмотрона, которую в дальнейшем для краткости будем именовать барокамерой, — 6÷1000 гПа, расход воздуха или азота 2÷6 г/с. Установка может работать как в дозвуковом режиме, так и в сверхзвуковом.

Опишем более подробно компьютерную систему регистрации экспериментальных данных плазмотрона ВГУ-4, представляющую собой программно-аппаратный комплекс на основе программы АС-Test и 16-канального АЦП Е-270, подключаемого к персональному компьютеру через интерфейс USB.

Модуль регистрации медленно меняющихся параметров Е-270 содержит интегрирующие АЦП, позволяющие измерять медленно меняющиеся сигналы с высокой степенью защиты от импульсных и высокочастотных помех. Каждая цепь имеет индивидуальную гальваническую развязку для применения неизолированных датчиков. На носитель устанавливается до 8 submodule серии Н-27Х. Установка разнотипных submodule в количестве необходимом для конкретного эксперимента позволяет конфигурировать АЦП для измерений нужного количества каналов напряжения, тока, термосопротивлений, а также сигналов термопар, что является важнейшим преимуществом. 15-битный АЦП Е-270 позволяет регистрировать по 100 значений в секунду с каждого из 16 измерительных каналов, однако для получения файлов данных разумного размера при продолжительности эксперимента 20÷30 минут каждый параметр регистрируется один раз в секунду.

Программа АС-Test, работающая под Windows 2000/XP, позволяет регистрировать параметры эксперимента на жёсткий диск персонального компьютера, визуализировать графики изменения восьми параметров на мониторе компьютера в реальном времени и показывать на мониторе ещё 30 параметров в реальном времени в цифровом формате. Возможно, построение графиков и регистрация в реальном масштабе времени так называемых расчётных параметров, например мощности анодного питания  $N_{ад} = U_{ад} \times I_{ад}$ , а также расчётных параметров от расчётных параметров. Программа позволяет осуществлять настройку сценариев эксперимента, хранение и поиск нужного сценария в базе данных, проводить измерения в реальном масштабе времени с одновременной архивацией и визуализацией экспериментальных данных, просматривать и анализировать результаты. В реальном масштабе времени производится первичная математическая обработка и допусковый контроль значений измеряемых параметров. Вся информация сохраняется в формате базы данных и доступна для последующей обработки и анализа.

Система регистрации данных плазмотрона ВГУ-4 в стандартном варианте конфигурации показывает в реальном времени на дисплее и записывает на жёсткий диск компьютера необходимые в конкретном эксперименте параметры из следующего набора:

- анодное напряжение ВЧ-генератора;
- анодный ток ВЧ-генератора;
- мощность анодного питания ВЧ-генератора;
- давление в барокамере;
- давление в разрядном канале;
- скоростной напор;
- входная и выходная температура охлаждающей

воды датчиков теплового потока или энтальпии;

- тепловой поток к водоохлаждаемому калориметру;
- температура поверхности испытываемого образца с пирометра «AGEMA Thermopoint 90MSC1» с интервалом измеряемых температур 600÷3000°С.
- температура образца (для металлических, углерод-углеродных и других образцов с достаточно высокой теплопроводностью >10 Вт/м<sup>2</sup>), измеряемая интегрированной в него термопарой.

Исследование уноса массы при различных температурах поверхности образцов из различных углеродных материалов было выполнено при расходе азота 2.4 г/с и давлении в барокамере 100 гПа. Зависимость уноса массы графита В-2 от давления была определена при температуре поверхности 2130 К.

Температура поверхности образцов определялась с помощью эталонного визуального оптического пирометра ПОВ-80 с рабочей длиной волны 0.65 мкм. Для определения истинной температуры по измеренной яркостной в последнюю вводились поправки на пропускание окна барокамеры, выполненного из кварца КУ, и на спектральную степень черноты образца, которая для всех исследованных материалов принималась равной 0.8.

## 2.2. Исследуемые материалы, образцы и модель

Исследовались образцы из графита В-2, графита ГМЗ и УУКМ. Графит В-2 характеризуется мелкозернистостью и низкой пористостью, но как и большинство графитов, он не является чисто углеродным материалом и содержит заметное количество примесей, которые могут повлиять на результат. Графит ГМЗ (графит малозольный) — один из наиболее чистых графитов, суммарная массовая концентрация примесей в котором не превышает 0.05%. УУКМ — чисто углеродный материал, имеющий значительную пористость, а получаемые результаты, вообще говоря, должны зависеть от типа использованного углеродного волокна и от технологии изготовления образцов. Все исследованные образцы были изготовлены из материалов, произведённых в советский период.

Конструкция водоохлаждаемой модели, использовавшейся для экспериментов с УУКМ, показана на рис. 1. Модель имела максимальный диаметр 45 мм, а устанавливаемые в неё образцы были выполнены в форме дисков с диаметром 30 мм и толщиной 6 мм. Чтобы уменьшить тепловые потери от образца в модель и избежать контакта боковой и тыльной поверхностей образцов с моделью, образцы устанавливались в модель на трении с помощью трёх тонких жгутиков из ваты из углеродных волокон, причём масса каждого не превышала 20 мг.

## 2.4. Методические проблемы при проведении эксперимента

Основная техническая проблема при проведении экспериментов по исследованию взаимодействия диссоциированного азота с углеродными материалами состоит в полном устранении возможного влияния остаточного кислорода, водорода, водяного пара и органических газов на измеряемый унос массы.



Рис. 1. Схема эксперимента по определению скорости уноса массы углеродных материалов.

Можно выделить следующие возможные источники примесных газов:

- примеси кислорода, водорода, водяного пара и органических газов в используемом азоте;
- кислород, адсорбированный на внутренних поверхностях пор и оставшийся в объёме пор графита или УУКМ после откачки до давления поджига разряда;
- подмешивание в струю диссоциированного азота остаточного воздуха из барокамеры;
- воздействие на образец остаточного кислорода, имеющегося в барокамере, после отключения энерговклада в разряд.

Рассмотрим кратко эти вопросы.

Состав использовавшегося азота особой чистоты представлен в таблице 1. На основании приведённых в ней данных, влияние на унос массы примесей кислорода, водорода, водяного пара и органических газов в используемом азоте можно считать пренебрежимо малым.

Таблица 1. Состав использованного в экспериментах азота особой чистоты

Газ	Концентрация, %
Азот	> 99.9963
Кислород	< 0.001%
Водород	< 0.001%
$C_nH_m$	< 0.001%
Водяной пар	< 0.0007%

Тонкое регулирование давления в барокамере производится натеканием воздуха через регулируемый вентиль в нижней части барокамеры, поэтому в процессе эксперимента в окружающем струю пространстве содержится азот с примесью воздуха. Имеет место и подтекание небольшого количества воздуха в барокамеру через многочисленные уплотнения. Подмешивание в струю диссоциированного азота остаточного воздуха из затопленного пространства контролировалось путём сравнительной съёмки спектров струй диссоциированного воздуха и азота в области чувствительных линий кислорода — триплета  $O777$  нм. Как

видно из рис. 2, на котором представлены участки спектра диссоциированного воздуха и диссоциированного азота, полученные при одинаковом давлении 100 гПа, одинаковой мощности анодного питания 64 кВт и одинаковом расходе газа 2.4 г/с, никаких следов кислорода в ядре азотной струи не наблюдается.

Кислород, адсорбированный на внутренних поверхностях пор и оставшийся в объёме пор графита или УУКМ после откачки до давления поджига разряда, при самых пессимистических оценках может окислить заметно меньше 1 мг углерода, так что при уносах массы  $\sim 100$  мг за эксперимент его влияние пренебрежимо мало.

Воздействие на образец остаточного кислорода, имеющегося в барокамере, после выключения ВЧ-генератора исключается за счёт того, что натекание воздуха при выключении ВЧ-генератора немедленно прекращается, а подача азота продолжается и до полного остывания образец обдувается струёй азота, имеющего температуру близкую к комнатной, с тем же расходом 2.4 г/с.

Ещё одна методическая трудность состоит в том, что необходимо избежать контактов исследуемого материала с другими высокотемпературными материалами, которые могут с ним реагировать. Это достигалось путём использования водоохлаждаемой модели и вывешивания образца в ней на трении с использованием жгутиков из углеродной ваты

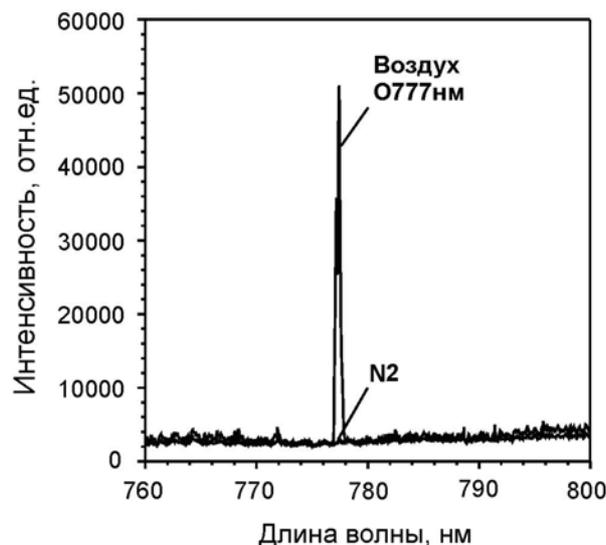


Рис. 2. Спектры струй диссоциированного воздуха и азота в окрестности чувствительных линий кислорода — триплета  $O777$  нм. Мощность анодного питания ВЧ-генератора — 64 кВт, давление — 100 гПа, расход воздуха и азота — 2.4 г/с

Следует отметить, что использование образцов, изготовленных из материалов в состоянии поставки приводило к недостаточно хорошей воспроизводимости измеряемых уносов массы. Обеспечить хорошую воспроизводимость удалось путём предварительного прокаливания образцов перед первым зачётным экспериментом в струе диссоциированного азота при температуре  $\sim 1700$  К в течение 10 минут, после чего воспроизводимость существенно улучшилась и необходимости в прокаливании образца перед последующими экспериментами не возникала.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

#### 3.1. Скорость уноса массы

Зависимость от давления уноса массы графита В-2 в струе чистого диссоциированного воздуха при температуре поверхности 2130 К и времени цикла испытаний 560 с показана на рис. 3. Отметим, что попытки построить график в полулогарифмическом, двойном логарифмическом масштабе и в иных координатах оказались неудачными, что указывает на отсутствие простых объяснений наблюдаемой зависимости. Качественно же уменьшение уноса массы с ростом давления объясняется увеличением скорости газофазной рекомбинации атомов азота в пограничном слое, что должно приводить к снижению концентрации атомов азота у поверхности исследуемого материала.

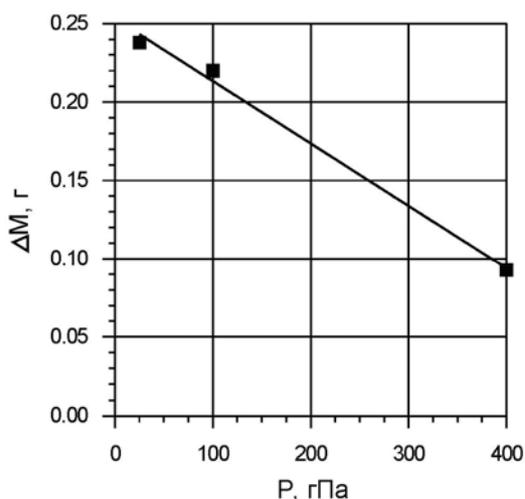


Рис. 3. Зависимость уноса массы графита В-2 от давления при температуре лицевой поверхности образца 2130 К и времени эксперимента – 560 с

Зависимости уноса массы от температуры для трёх исследованных материалов показаны на рис. 4.

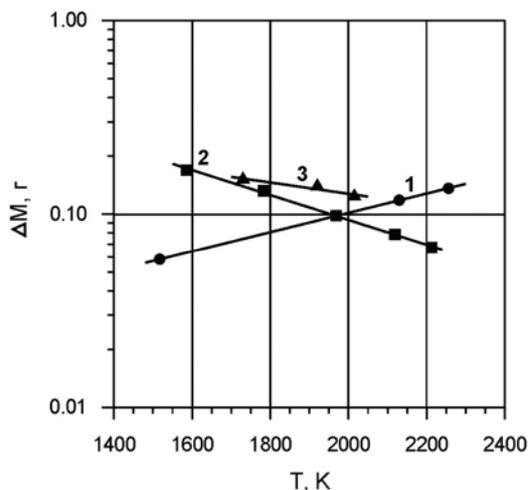


Рис. 4. Зависимость уноса массы образцов углеродных материалов от температуры. 1 – графит В-2, длительность эксперимента – 560 с, 2 – графит ГМЗ, длительность эксперимента – 300 с, 3 – УУКМ, длительность эксперимента – 560 с

В первой серии экспериментов был исследован графит В-2, и было обнаружено, что при увеличении температуры на 700 К унос массы вырос немногим более чем в 2 раза. Такой слабый рост имеет место при

диффузионном режиме окисления графита в струе индукционного плазматрона [7] и обусловлен он исключительно уменьшением толщины пограничного слоя вследствие увеличения числа Рейнольдса при повышении энерговыклада в разряд. Поэтому было выдвинуто предположение о том, что в струе имеется примесь кислорода и место предприняты значительные усилия по её обнаружению, включая спектральные измерения (см. рис. 2).

Только после проведения второй серии экспериментов, показавшей уменьшение уноса массы с ростом температуры поверхности образца УУКМ, стало окончательно ясно, что никакого кислорода в струе нет.

Основное отличие УУКМ от графита В-2 состоит в том, что УУКМ является число углеродным материалом и практически не содержит примесей, поэтому было выдвинуто предположение о том, что наблюдаемое различие в тренде температурной зависимости двух материалов обусловлено именно наличием или отсутствием в материале примесей.

Для проверки этого предположения была проведена третья серия экспериментов с использованием графита ГМЗ, характеризующегося очень низким содержанием примесей. Учитывая большие наблюдаемые уносы массы, время нахождения образца в струе диссоциированного азота было уменьшено до 300 с. Оказалось, что унос массы графита ГМЗ с ростом температуры уменьшается, то есть характер полученной зависимости такой же, как и у УУКМ.

#### 3.2. Спектры излучения пограничного слоя

Дополнительные подтверждения падения скорости уноса массы чистых углеродных материалов с ростом температуры поверхности получены методом оптического спектрального анализа. Спектры регистрировались с помощью спектрометра Acton Research с фокусным расстоянием 0.3 м с дифракционной решёткой 1200 штр/мм. В качестве приемника использовалась 16-битная CCD-матрица 1340×1300 (scientific grade). Изображение набегающего потока диссоциированного азота и образца формировалось в плоскости входной щели спектрометра таким образом, чтобы входная щель располагалась на оси симметрии изображения.

В одном эксперименте в ходе ступенчатого нагрева образца УУКМ за счёт повышения мощности анодного питания ВЧ-генератора были зарегистрированы спектры струи и пограничного слоя над поверхностью при различных установившихся температурах поверхности. Спектры излучения струи чистого диссоциированного азота при  $N_{ap} = 45$  кВт и пограничного слоя на образце из УУКМ при  $N_{ap} = 45$  кВт и  $N_{ap} = 33$  кВт в спектральном интервале 383–393 нм приведены на рис. 5.

Как видно из рис. 5, в пограничном слое наблюдается интенсивное излучение фиолетовой системы полос радикала CN (циана). В излучении струи чистого диссоциированного азота наблюдается только весьма слабая полоса 0-0 фиолетовой системы радикала CN, наличие которой обусловлено присутствием в составе газа микропримесей (<0.001%) органических молекул типа  $C_nH_m$ . В пограничном слое наблюдаются пять полос фиолетовой системы циана, причём интенсивность излучения наиболее ярких из них в показанном на рис. 5 спектральном интервале на порядок и более

выше интенсивности излучения плазменной струи. Очевидно, что единственным источником углерода для образования циана в пограничном слое является его унос с поверхности образца.

Важно, что при всех исследованных температурах поверхности наблюдалось снижение интенсивности излучения циана в пограничном слое с ростом температуры поверхности. Так при температуре поверхности 1800 К интенсивность излучения циана в пограничном слое заметно выше, чем при температуре поверхности 2040 К, что согласуется с данными по уносу массы.

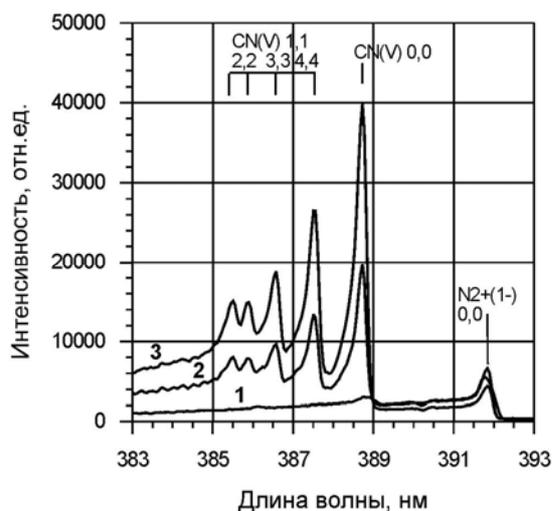


Рис. 5. Спектры излучения струи диссоциированного азота обтекающей исследуемый образец при  $N_{ap} = 45$  кВт (1) и пограничного слоя на образце из УУКМ при  $N_{ap} = 45$  кВт,  $T_w = 2040$  К (2) и  $N_{ap} = 33$  кВт,  $T_w = 1800$  К (3)

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Наиболее важными из полученных результатов следует считать, во-первых, наличие растущей и падающей температурной зависимости уноса массы на различных типах углеродных материалов, а во-вторых, — обнаружение весьма высоких уносов массы углеродных материалов, обтекаемых струей диссоциированного азота. Перед началом экспериментов предполагалось, что придётся иметь дело с величинами уноса массы в доли миллиграмма, а в лучшем случае — единицами миллиграммов за 10 минут эксперимента. Оказалось же, что типичная величина уноса —  $\sim 100$  мг, в то время как типичный унос массы УУКМ с защитой от окисления, использовавшейся на воздушно-космическом летательном аппарате «Буран», составлял  $\sim 5$  мг за 10-минутный цикл испытаний в струе диссоциированного воздуха [7], то есть был меньше более чем на порядок величины.

Непосредственное гетерогенное взаимодействие атомов азота с углеродом с образованием циана  $CN$  в результате реакции  $N + C_T \rightarrow CN_T$  возможно при температурах твердого материала выше 3000 К. Такие температуры в настоящей работе не реализовывались, поэтому в качестве возможного механизма уноса массы исследованных материалов можно предложить «каталитическую сублимацию» — механизм уноса массы, связанный с выделением энергии при гетерогенной каталитической рекомбинации атомов на поверхности материала, помещенного в поток диссоциированного

газа [8, 9]. В случае рекомбинации атомов азота выделяющаяся энергия рекомбинации равна энергии диссоциации и составляет  $E = 9.8$  эВ, что превышает энергию связи атомов в графитах или УУКМ. При этом, так же как и при соударении с поверхностью материала высокоэнергетической частицы, с некоторой вероятностью происходит выбивание атома из кристаллической решетки, приводящее к потере массы.

Для определения вероятностей каталитической рекомбинации необходимо предварительно определить вероятность конкурирующего процесса — обычной гетерогенной рекомбинации атомов, так как от неё зависит концентрация атомов у поверхности образца. Для решения обеих задач необходимо использование методов численного расчёта.

На завершающем этапе работы была определена скорость уноса массы графита ГМЗ при установившейся температуре поверхности. Контрольные эксперименты различной продолжительности показали, что после выхода температуры поверхности образца на стационарный режим унос массы растёт со временем линейно. Поэтому в каждом режиме с каждым образцом проводились эксперименты длительностью 60 с и 300 с и скорость уноса массы определялась с использованием разности уносов массы в этих двух экспериментах, что позволило исключить влияние участка нагрева образца. Использование трёх образцов графита в сочетании со случайной последовательностью чередования образцов и режимов позволило оценить уровень воспроизводимости полученных результатов.

Конструкция водоохлаждаемой модели, использовавшейся для этой серии экспериментов, показана на рис. 6. Модель имела форму идентичную Евромодели (ESA standard model — цилиндр с диаметром 50 мм и кромкой скруглённой с радиусом 11.5 мм), а устанавливаемые в неё образцы имели диаметр 26 мм и толщину 3 мм. Чтобы минимизировать тепловые потери от образца в модель, тыльная сторона образца прикрыта слоем высокотемпературного теплоизолятора, вырезанного из углеродного войлока. Три тонких жгутика из углеродной ваты, расположенные под углом  $120^\circ$ , использовались для установки образца в модель на трении. Чтобы перекрыть центральный канал модели, внутрь него с использованием центрирующей и теплоизолирующей втулки из фторопласта устанавливался водоохлаждаемый калориметр.

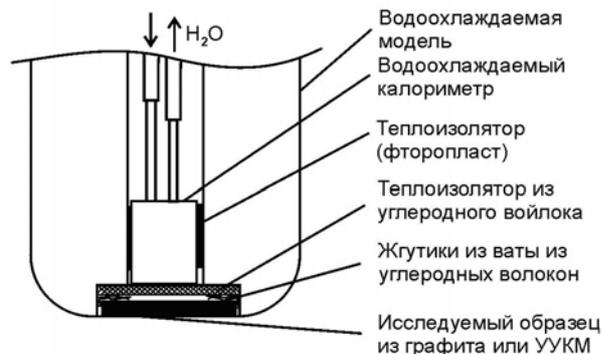


Рис. 6. Схематический чертёж модели, использовавшейся в серии экспериментов по проверке воспроизводимости полученных результатов и определению скорости уноса массы графита ГМЗ

Результаты определения скорости уноса массы на трёх образцах из графита ГМЗ показаны на рис. 7 треугольниками, кругами и квадратами. Прямая 1 представляет собой аппроксимацию всех результатов полученных в этой серии экспериментов.

Для сравнения на рис. 7 ромбами показаны скорости уноса массы для графита ГМЗ в потоке диссоциированного воздуха. Обращает на себя внимание тот факт, что минимальное различие между скоростями уноса массы в диссоциированном воздухе и азоте наблюдается при невысоких температурах  $\sim 1600$  К, где скорость уноса массы графита ГМЗ в воздухе всего на порядок больше, чем в азоте. Однако и при максимальных реализованных температурах поверхности  $\sim 2300$  К скорость уноса массы в диссоциированном воздухе превышает скорость уноса массы в диссоциированном азоте не более чем на два порядка.

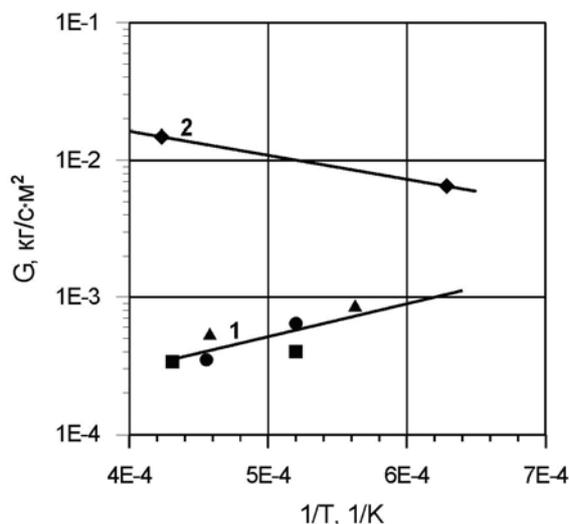


Рис. 7. Зависимость скорости уноса массы образцов из графита ГМЗ от обратной температуры при давлении 100 гПа. 1 – три образца в потоке диссоциированного азота, 2 – образцы из графита ГМЗ в потоке диссоциированного воздуха

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На плазматроне ВГУ-4 проведено экспериментальное исследование скорости уноса массы углеродных материалов в дозвуковом потоке чистого диссоциированного азота. Исследованы три материала: два вида искусственного графита (В-2 и ГМЗ) и углерод-углеродный композиционный материал. Получены зависимости скорости уноса массы от температуры поверхности в диапазоне температур  $T_w = 1600 \div 2300$  К при давлении  $p = 100$  гПа. Эксперименты показали, что скорость уноса массы графита В-2 слабо возрастает с ростом температуры, а скорость уноса массы более чистых материалов, – графита ГМЗ и углерод-углеродного композиционного материала, – убывает с ростом температуры. При этом скорость уноса массы всех исследованных углеродных материалов в азотной струе при различных режимах всего на 1-2 порядка ниже скорости уноса массы в воздушной струе при аналогичных режимах испытаний.

## СПИСОК ОБОЗНАЧЕНИЙ

ВЧ — высокочастотный;  
 ТЗМ — теплозащитный материал;  
 УУКМ — углерод-углеродный композиционный материал,  
 $E$  — энергия диссоциации  
 $G$  — скорость уноса массы,  $\text{кг/с}\cdot\text{м}^2$ ,  
 $I$  — ток, А  
 $N$  — мощность  
 $p$  — давление, гПа;  
 $T_w$  — температура поверхности образца, К,  
 $U$  — напряжение, кВ,  
 $\Delta M$  — унос массы, г.

Индексы:

$ap$  — параметры анодного питания высокочастотного генератора индукционного плазматрона;  
 $w$  — параметры на лицевой поверхности образца.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полежаев Ю.В., Юревич Ф.Б. Тепловая защита. М.: Энергия, 1976.
2. Рознер Д.Е., Аллендорф Г.Д. Азот как реагирующий элемент при абляции в диссоциированном воздухе // РТК, 1970, № 1.
3. Park C., Jaffe R.L., Partridge H. Chemical-Kinetic Parameters of Hyperbolic Earth Entry // Journal of Thermophysics and Heat Transfer Vol. 15, No. 1, 2001.
4. Gordeev A.N., Kolesnikov A.F., Yakushin M.I. An induction plasmatron application to 'Buran's' heat protection tiles ground tests // SAMPE Journal. 1992. Vol. 28, N. 3. P. 29-33.
5. Kolesnikov A.F., Yakushin M.I., Pershin I.S., Vasil'evskii S.A., Bykova N.G., Gordeev A.N., Chazot O., Muylaert J. Comparative Analysis of the Inductive Plasmatrons Capabilities for Thermochemical Simulation at the Earth and Mars Atmospheric Entry Conditions // Int. Conf. on the Methods of Aerophysical Research, July 2002, Novosibirsk, Russia. Proceedings, Part III. Novosibirsk, Publishing House "Non-parallel", 2002, P. 114-119.
6. Гордеев А.Н., Колесников А.Ф. Новые режимы течения и теплообмена плазмы в индукционном плазматроне ВГУ-4 // Всероссийская школа-семинар «Аэрофизика и физическая механика классических и квантовых систем»: Сборник научных трудов. – М.: ИПМех РАН. 2007. С.130-136.
7. Gordeev A.N., Yakushin M.I. The thermochemical stability of carbon-carbon using an atioxidation coating for Buran. Part II. // SAMPE Journal, Vol.29, N 2 March/April, 1993, pp.27-31.
8. Залогин Г.Н., Итин П.Г., Лунев В.В., Перов С.Л. О сублимации платины при каталитической гетерогенной рекомбинации атомов азота на ее поверхности // Письма в ЖТФ, 1988, т. 14, вып. 22.
9. Залогин Г.Н., Итин П.Г., Лунев В.В., Перов С.Л. Аномальный теплообмен на каталитической поверхности в потоке диссоциированного азота // Гагаринские научные чтения по космонавтике и авиации 1988г. М.: Наука, 1989, с. 26-33.

Работа выполнена при финансовой поддержке проекта МНТЦ 1559, проекта РФФИ 08-01-00-347 и программы Президиума РАН (проект П11).