

УДК 629.7.036.74

## ПЛОТНОСТЬ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ РАБОЧЕГО ТЕЛА В ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЗОНАХ СТРУИ МАГНИТОПЛАЗМОДИНАМИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ С ВНЕШНИМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

© 2019 г. А. А. Чиров<sup>1</sup>, \*, В. М. Арбатский<sup>1</sup>, Н. Г. Белякова<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), г. Москва, Россия  
\*chiroff@mail.ru

Поступила в редакцию 11.04.2017 г.

После доработки 12.12.2017 г.

Принята к публикации 11.01.2018 г.

В статье представлены результаты оценочных расчетов потоков частиц рабочего тела в периферийных областях от осевого направления струи магнитоплазмодинамического двигателя с внешним магнитным полем мощностью 100 кВт, а также результаты измерений в лабораторных условиях величин обратных потоков частиц Li от двигателя. Измерения обратных потоков осуществлялось методом кварцевых микровесов. Расчеты и измерения потоков частиц Li свидетельствуют, что их величины не превышают  $\sim 10^{-8} - 10^{-7}$  г см<sup>-2</sup> с<sup>-1</sup>.

DOI: 10.1134/S0023420619020031

### ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития космической техники характеризуется тенденцией увеличения сроков активного существования космических аппаратов на орбите до 15 лет, повышением надежности его систем и эффективности проводимых исследований [1]. В связи с этим, как на стадии проектирования, так и при эксплуатации КА все большее внимание уделяется процессам воздействия космической среды и собственной внешней атмосферы (СВА) на внешние поверхности КА.

СВА порождается процессами выделения частиц различных веществ внешними поверхностями КА, выбросами частиц рабочего тела двигательных установок (ДУ) различного типа. Формирование СВА зависит от конструктивных особенностей КА, условий подготовки КА к пуску и выведения КА на орбиту, воздействия факторов космического пространства.

Интенсивное внедрение электроракетных двигателей (ЭРД) различных типов последние 30–35 лет объясняется их высокими удельными характеристиками. Тенденция перехода на ЭРД будет сохраняться и в будущем, имея в виду необходимость обеспечения возрастающих значений суммарного импульса двигательных установок. Так уже сейчас рассматриваются проекты использования ЭРД в качестве двигателей довыве-

дения или маршевых двигателей для межпланетных перелетов.

Оптимальным образом перечисленные требования удовлетворяются сильноточными плазменными двигателями, наиболее перспективным среди которых является магнитоплазмодинамический двигатель (МПД) с внешним магнитным полем (в некоторых источниках его называют – торцевым холловским двигателем (ТХД)). В качестве рабочего тела в МПД используются щелочные металлы, в частности Li. Основные схемы, физические процессы, их математические модели и рабочие параметры МПД описаны в [2].

При работе МПД и некоторых других типов ЭРД, проявляется ряд негативных факторов (большие углы раскрытия струи плазмы, значительные напряженности выносных магнитных полей, неполная ионизация рабочего вещества и т.д.), которые приводят к возникновению потоков частиц рабочего тела в периферийных областях струи и задней полусфере двигателя. Последние явления в реальных условиях могут повлечь за собой конденсацию рабочего тела ЭРД на функционально важные поверхности КА [3] и, как следствие, изменению рабочих характеристик этих поверхностей [4]. В связи с этим, при практическом использовании МПД на борту КА, большой интерес представляют расчетные и экспериментальные

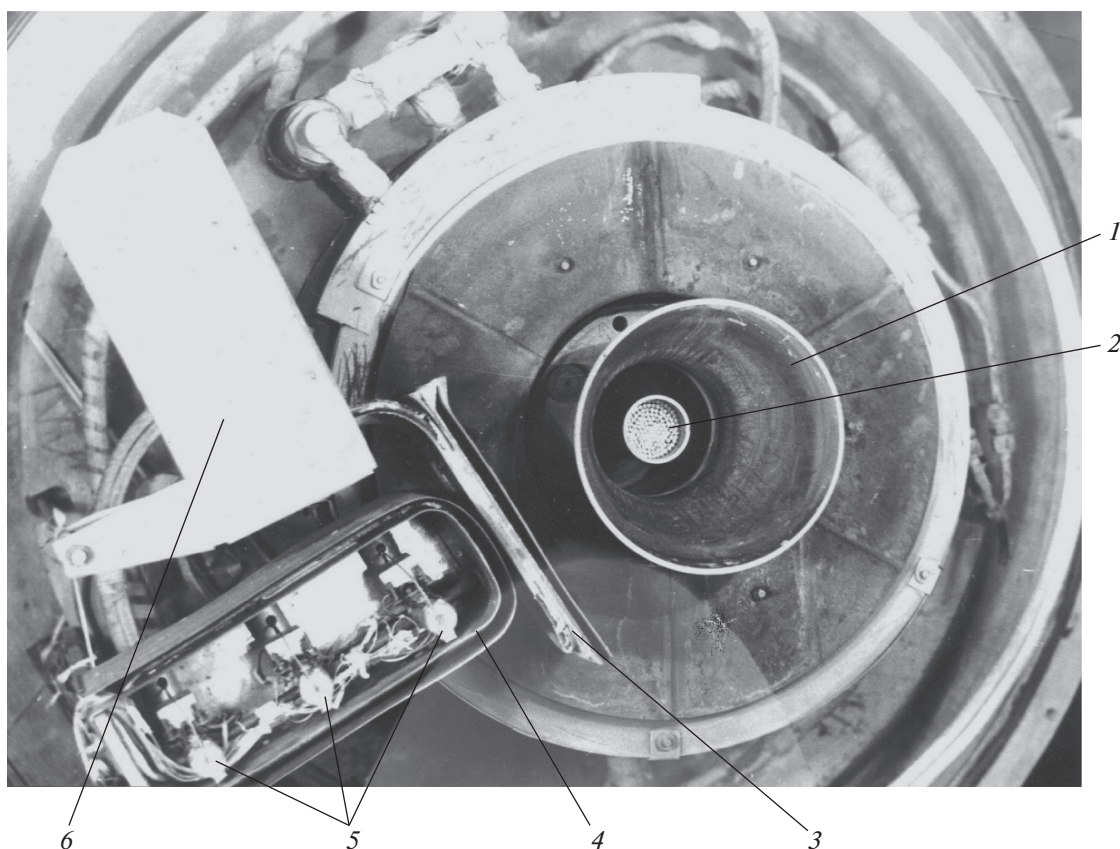


Рис. 1. Фото МПД с измерительным блоком.

методы определения обратных потоков частиц рабочего тела МПД при его работе.

Ниже в данной статье приведены расчетные оценки потоков нейтральной компоненты рабочего тела в периферийных областях струи МПД и результаты измерения обратных потоков частиц Li от МПД в лабораторных условиях.

## 1. ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МПД

Исследуемый МПД представляет собой экспериментальную модель, разработанную и созданную сотрудниками МАИ под руководством профессора В.Б. Тихонова [5, 6]. Испытания и экспериментальные исследования разлета струи двигателя были проведены на вакуумном стенде лаборатории кафедры 208 МАИ (рис. 1, фото МПД с измерительным блоком).

Основные параметры МПД:

Геометрические параметры: диаметр анода (1) на срезе – 160 мм; диаметр катода (2) – 40 мм. Рабочее тело – Li. Температура катода в рабочем режиме  $T_k = 3000$  К. Температура анода в рабочем режиме  $T_a = 1800$  К. Расход рабочего тела  $\mu \leq 80$  мг/с. По-

требляемая мощность 100 кВт. Ионная температура рабочего тела  $Li^+$  при разряде  $T_i = 0.5$  эВ. Электронная температура  $T_e = 2-3$  эВ.

## 2. ОЦЕНОЧНЫЕ РАСЧЕТЫ ПОТОКОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА МПД В ПЕРИФЕРИЙНЫХ ЗОНАХ ОТ ОСЕВОГО НАПРАВЛЕНИЯ СТРУИ

Степень ионизации рабочего тела в работающем МПД  $\beta < 1$ . Это явление имеет место для любого типа ЭРД, но в разной степени. В случае исследуемого МПД при давлении в вакуумной камере  $P_k = 10^{-4}$  торр и температуре рабочего тела 3000 К, что соответствует температуре катода, степень термической ионизации паров Li составляет  $\beta \sim 90\%$  [7], т.е. порядка 10% паров Li при выходе из катода останется в нейтральном состоянии.

Наличие электрических разрядных процессов в пространстве внутри анода двигателя может существенно увеличить  $\beta$ , хотя оценить это увеличение весьма сложно. В дальнейших расчетах будем принимать  $\beta \sim 90\%$ , что позволит определить величину верхней границы ожидаемых потоков.

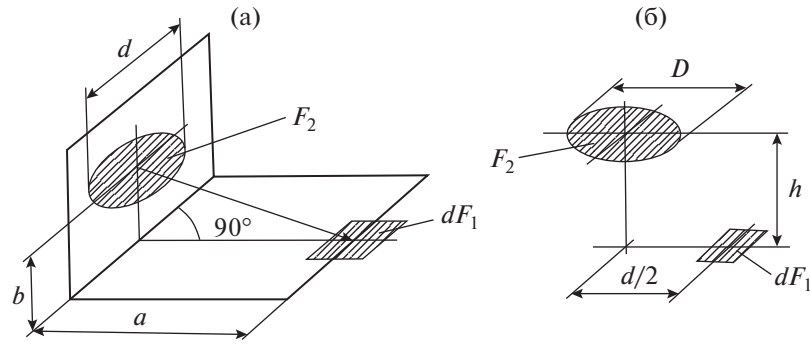


Рис. 2

Режим истечения нейтральной компоненты из сопла двигателя определяется длиной свободного пробега  $\lambda$  атомов Li. Как известно,  $\lambda = 1/n\sigma$ , где  $n$  – концентрация частиц,  $\sigma$  – сечение упругих столкновений нейтрального атома Li с атомом Li или ионом  $Li^+$ . По данным измерений [6] концентрация рабочего тела на срезе анода  $n = 10^{19} \text{ м}^{-3}$ , а из [8] известно, что  $\sigma = 2 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2$ . Таким образом,  $\lambda = 0.5 \text{ м}$ . Учитывая геометрические размеры анода (на срезе  $\varnothing 0.16 \text{ м}$ ), габариты вакуумной камеры ( $\varnothing 0.84 \text{ м}$ ) и размеры диагностируемой области задней полусферы (0.2–0.3 м от оси двигателя), можно заключить, что такое значение длины свободного пробега частиц Li соответствует молекулярному режиму течения.

Молекулярный режим течения нейтральных частиц Li на срезе анода, и за ним, также большой угол раскрытия сопла дают основание принять распространение потоков нейтральных частиц за срезом анода двигателя по закону косинуса.

Для расчета потоков нейтральных частиц Li, идущих от поверхности среза сопла двигателя и падающих на площадки, параллельные оси анода, применялся метод угловых коэффициентов. Этот метод широко используется при расчетах радиационного теплообмена между поверхностями нагретых тел и основан на законе косинуса. Так как закономерности распространения частиц в пространстве при молекулярном режиме течения, имитируемые какой-либо поверхностью, тоже подчиняются закону косинуса, то математические аппараты обоих физических явлений совпадают.

Угловой коэффициент  $\varphi(dF_1 F_2)$  определяет долю полной лучистой энергии, излучаемую поверхностью  $dF_1$  одного тела, падающую на поверхность  $F_2$  другого тела, при конкретной геометрии обоих тел и их взаимном расположении. Так в случае взаимного расположения элементарной излучающей поверхности  $dF_1$  и принимаю-

щей излучение поверхности  $F_2$  (рис. 2а) угловой коэффициент вычисляется [9]:

$$\varphi(dF_1 F_2) = \frac{y}{2} \left\{ \frac{1 + x^2 + y^2}{\left[ (1 + x^2 + y^2)^2 - 4x^2 \right]^{1/2}} - 1 \right\}, \quad (1)$$

$$x = \frac{d}{2b}, \quad y = \frac{a}{b}.$$

В нашем случае излучающей поверхностью является  $F_2$  – площадь среза анода двигателя, а поглощающей поверхностью является элементарная площадка  $dF_1$ , расположенная параллельно оси двигателя. Тогда из соотношения между угловыми коэффициентами прямого и обратного процесса излучения  $\varphi(dF_1 F_2) dF_1 = \varphi(F_2 dF_1) F_2$  получаем:

$$\varphi(F_2 dF_1) = \varphi(dF_1 F_2) dF_1 / F_2. \quad (2)$$

В итоге, используя понятие угловых коэффициентов и последнее соотношение, получаем формулу для вычисления плотности потока частиц  $G_1$ , падающих на площадку  $dF_1$  от источника с площадкой  $F_2$ :

$$G_1 = G_2 \varphi(dF_1 F_2), \quad (3)$$

где  $G_2 = \mu(1-\beta)/F_2 = 3.98 \cdot 10^{-5} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}$  – плотность потока нейтральных частиц Li на срезе анода двигателя при  $\beta = 0.9$ .

На графике рис. 3 приведены результаты расчетов величины  $G_1$  в зависимости от расстояния  $a$  (рис. 2а), при заданных  $b = 40 \text{ см}$ ;  $d = 16 \text{ см}$ . Как видно из графика, плотность потока нейтральных частиц Li, падающих на площадку параллельную оси двигателя в периферийной зоне, достигают  $5 \cdot 10^{-8} \text{ г см}^{-2} \text{ с}^{-1}$ .

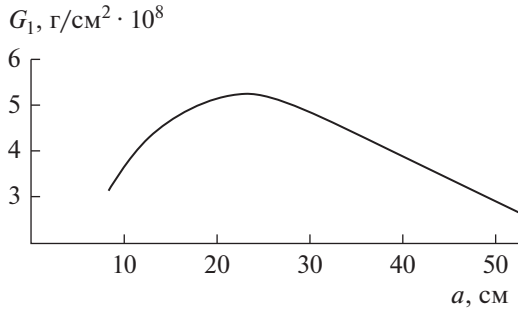


Рис. 3

### 3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ ОБРАТНЫХ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ Li ОТ МПД

Методика угловых коэффициентов расчета потоков частиц рабочего тела МПД в периферийных зонах не дает возможности оценить их величины в задней полусфере, т.е. интенсивность обратных потоков.

Несмотря на наличие существенного количества теоретических и экспериментальных исследований рабочих процессов в МПД, для этого типа двигателя не существует расчетной модели определения интенсивности обратных потоков рабочего тела (т.е. в задней полусфере за срезом анода). Основные трудности, в создании достоверной модели, заключаются в том, что в МПД проявляются три механизма ускорения плазмы: газодинамический, электромагнитный и ускорение в самосогласованном электрическом поле (электростатический). Помимо сказанного, отсутствует в необходимом объеме экспериментальные данные по параметрам струи конкретного МПД-двигателя. По мнению авторов в настоящее время только экспериментальными методами можно определить с необходимой достоверностью верхний уровень обратных потоков рабочего тела от

МПД, что будет способствовать созданию расчетной модели в будущем.

Измерения плотности обратных потоков  $G$  частиц Li (рабочего тела МПД) проводились в вакуумной камере с масляными средствами откачки. При работе двигателя давление в вакуумной камере не превышало  $10^{-4}$  торр. Вакуумная камера имела цилиндрическую форму с внутренним диаметром 0.84 м и длиной 2 м. МПД монтировался на торцевом фланце по оси камеры. В плоскости среза анода МПД с боку размещался измерительный узел (4) (рис. 1). С противоположной стороны от МПД на удалении 1.2 м от среза анода двигателя располагался медный охлаждаемый экран ловушка диаметром 0.8 м конусообразной формы.

Измерения величины плотности обратных потоков Li проводились термостатированными кварцевыми микровесами (5) рис. 1, конструктивное исполнение которых приведено на рис. 4.

Кварцевые микровесы были выполнены на основе кварцевых резонаторов типа  $C_1$  срез  $AT$  с собственной начальной частотой 8.0–8.25 МГц, включенных в схему генератора. Чувствительность измерений величин осаждающейся массы частиц Li кварцевыми микровесами составляла  $5.36–5.5 \cdot 10^{-9}$  г см $^{-2}$  Гц.

Для стабилизации температуры кварцевая пластина (2) была закреплена прижимом (3) на массивном корпусе (4), который, в свою очередь, был установлен на медной трубке (1). На корпусе также находилась нагревательная спираль (5). Через трубку прокачивалась охлаждающая жидкость. Для контроля температуры пластины кварцевого резонатора в непосредственной близости от него была закреплена хромель-копелевые термомпары (6). С целью увеличения ресурса работы кварцевых микровесов перед входным отверстием (7) каждого датчика были установлены поворотные заслонки, которые закрывались на период

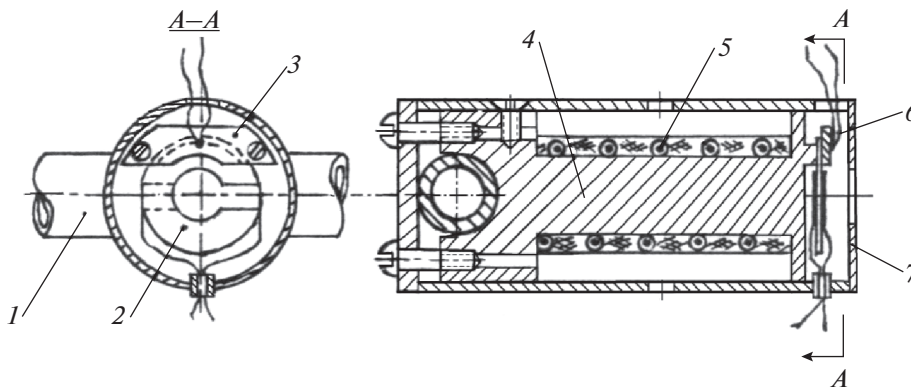


Рис. 4

Таблица 1

Режим работы МПД	Параметры МПД				$G$ , г/см <sup>2</sup> с		
	$\mu$ , г с <sup>-1</sup>	$B_k$ , Тл	$I_p$ , А	$U_p$ , В	$r = 220$ мм	$r = 300$ мм	$r = 380$ мм
1	0.047	0.045	1000	40	$1.95 \cdot 10^{-8}$	$1.54 \cdot 10^{-8}$	$2.65 \cdot 10^{-8}$
2	0.065	0.045	1300	42	$7.13 \cdot 10^{-8}$	$1.12 \cdot 10^{-8}$	—
3	0.046	0.045	1300	43.5	$3.19 \cdot 10^{-8}$	$2.96 \cdot 10^{-8}$	$3.39 \cdot 10^{-8}$
4	0.046	0.09	1300	62	$9.23 \cdot 10^{-9}$	$6.14 \cdot 10^{-9}$	$7.38 \cdot 10^{-8}$
5	0.047	0.045	1300	44	$3.29 \cdot 10^{-8}$	$2.92 \cdot 10^{-8}$	$3.43 \cdot 10^{-8}$
6	0.065	0.045	1400	42	$3.56 \cdot 10^{-8}$	$2.67 \cdot 10^{-8}$	$3.78 \cdot 10^{-8}$
Экран	0.065	—	—	—	$1.23 \cdot 10^{-8}$	$1.17 \cdot 10^{-8}$	$1.10 \cdot 10^{-8}$

выхода двигателя на штатный режим работы. Измерительный узел (4) с поворотной крышкой (6) (рис. 1) был защищен от теплового излучения анода двигателя охлаждаемым медным экраном (3).

Кварцевые микровесы располагались в вакуумной камере так, что чувствительные поверхности (кварцевые пластины) находились в плоскости среза анода МПД-двигателя на расстояниях  $r = 220$ , 300 и 380 мм от его оси.

Выходные параметры измерений  $f_i(t)$ -текущая частота  $i$ -ого кварцевого резонатора и  $T_i(t)$ -текущая температура измерялись цифровым частотомером ЧЗ-35А и вольтамперометром Ф-30 с точностью  $\pm 1$  Гц и  $\pm 0.001$  мВ, соответственно. Данные измерений выводились на цифропечатающее устройство.

Методика измерений  $G$  заключалась в следующем. После выхода двигателя на стационарный режим работы открывались поворотная крышка (6) (рис. 1) и заслонки на кварцевых микровесах. Далее осуществлялся последовательный опрос кварцевых микровесов со скважностью 3 с в течение  $\sim 100$  с.

В период проведения экспериментов было обнаружено, что изменение температуры кварцевых резонаторов происходило со скоростью не более  $1^\circ$  в мин. Так как температурно-частотная характеристика (ТЧХ) кварцевых резонаторов АТ-среза в реализуемом в экспериментах температурном диапазоне  $20\text{--}30^\circ\text{C}$  практически постоянна и не вносит заметной погрешности, то при обработке данных изменения частоты кварцевых резонаторов ТЧХ не использовалась.

Темп осаждения массы на чувствительные поверхности кварцевых резонаторов для каждого из запусков двигателя, при конкретном режиме работы, определялся путем простого усреднения

осажденной массы за период  $\sim 100$  с (фиксированного времени открытого положения заслонки). Результаты обработки измерений всеми тремя кварцевыми микровесами для шести режимов работы МПД-двигателя приведены в табл. 1.

Отсутствие результата измерения для кварцевых микровесов, расположенных на расстоянии  $r = 380$  мм для 2-ого режима, объясняется выходом из строя кварцевого резонатора.

Результаты измерений для всех шести режимов работы двигателя имеют характерную особенность — некоторый провал по величине плотности потока на расстоянии  $r = 300$  мм.

Измеренные величины  $G$  для режимов работы двигателя 3 и 5 близки. Это, по-видимому, объяснимо практически равными всеми рабочими параметрами двигателя. Следует отметить, что величины  $G$  при режиме 6 также близки к величинам  $G$  режимов 3 и 5, хотя и несколько выше. В режиме 6 имели место более высокие значения расхода  $\mu = 0.065$  г с<sup>-1</sup> и тока разряда  $I_p = 1400$  А.

Измеренные величины  $G$  для режима 1 заметно ниже, чем в режимах 3, 5, 6. По-видимому, это можно объяснить меньшими значениями  $I_p = 1000$  А и  $U_p = 40$  В.

Общим в распределение  $G$  на срезе МПД по длине радиуса для режимов 1, 3, 5, 6 является небольшой провал величин  $G$  на  $r = 300$  мм. В то же время, при режиме 4, где имеются высокие значения  $B_k = 0.09$  Тл и  $U_p = 62$  В, наблюдается заметный провал  $G$  при  $r = 300$  мм, что отличает режим 4 от остальных результатов, где  $B_k = 0.045$  Тл,  $U_p = 42\text{--}44$  В.

Отличительной особенностью работы МПД в режиме 2 является только высокий расход рабочего тела  $\mu = 0.065$  г с<sup>-1</sup>, остальные параметры аналогичны режимам 3 и 5 работы МПД. Отсут-



стве результатов измерений в режиме 2 при  $r = 380$  мм не дает возможность как-либо интерпретировать их, хотя значения  $G$  для  $r = 220, 300$  мм режима 2 находятся внутри интервала значений  $G$  других режимов работы МПД.

Причинами появления обратных потоков рабочего тела МПД, как представляется авторам данной работы, являются в основном 2 физических процесса. 1. Рассеяние частиц Li в струе в результате упругих столкновений типа атом-атом, ион-атом. При этом величина  $G$  имеет интегральный характер и определяется сечением упругого столкновения частиц Li ( $\sigma = 2 \cdot 10^{-19}$  м<sup>2</sup>) и имеет равномерное понижение величины  $G$  с возрастанием  $r$ . 2. Возникновение медленных (тепловых) ионов Li<sup>+</sup>, в результате процесса резонансной перезарядки быстрых (ускоренных) ионов Li<sup>+</sup> на медленных (тепловых) атомах Li (менее 10% расхода), которые не претерпели ионизацию на выходе из катода (менее 10% расхода). Сечение резонансной перезарядки примерно на порядок больше сечения упругих столкновений. Так для Li при энергиях столкновения частиц  $E = 10$  и  $100$  эВ,  $\sigma_p = 1.8$  и  $1.4 \cdot 10^{-18}$  м<sup>2</sup>, соответственно [12]. На движение появляющихся в результате резонансной перезарядки тепловых ионов Li<sup>+</sup> оказывают существенное влияние выносные электрические и магнитные поля. В результате чего тепловые ионы могут двигаться в обратном направлении.

По сделанным оценкам ларморовский радиус для тепловых ионов Li<sup>+</sup> при их температуре  $T = 1800$  К и  $B_k = 0.045$  Тл составляет  $R_L \sim 4$  мм. Таким образом, представленные оценки указывают на то, что потоки тепловых ионов, возникающих в результате резонансной перезарядки в ближней области среза сопла МПД, могут внести существенную неравномерность в распределении обратных потоков рабочего тела по радиусу на срезе сопла МПД.

#### 4. ОЦЕНКИ ИНТЕНСИВНОСТИ ПОТОКОВ РАБОЧЕГО ТЕЛА ОТ СТОРОННИХ ИСТОЧНИКОВ В ВАКУУМНОЙ КАМЕРЕ

При проведении измерений в вакуумной камере имелись еще несколько источников потоков частиц Li, которые могли оказывать существенное влияние на результаты измерений истинных обратных потоков от МПД. Одним из таких источников являлся охлаждаемый экран-ловушка, расположенный в противоположном от двигателя конце вакуумной камеры на расстоянии 1.2 м от среза анода двигателя. Ускоренные ионы основной струи двигателя бомбардировали поверхность экрана, на котором происходила конденса-

ция Li. Конденсат распылялся ускоренными ионами, в результате чего возникали потоки нейтральных частиц, движущихся в обратном направлении. Для определения величины и распределения этих потоков в вакуумной камере для мест установки кварцевых микровесов были проведены оценочные расчеты.

При расчете потоков частиц Li, идущих в заднюю полусферу МПД от экрана-ловушки, были сделаны следующие допущения: 1) весь расход рабочего тела, т.е. вся ионная составляющая струи МПД-двигателя, а это более 90%, падает на экран; 2) все ионы нейтрализуются на экране-ловушке и образуют сплошную тонкую пленку; 3) образующаяся на экране-ловушке пленка лития распыляется частицами Li<sup>+</sup> основной струи; 4) экран-ловушка имеет форму плоского диска, и распределение потока распыленных частиц подчиняется закону косинуса.

Важным параметром процесса распыления ионами Li<sup>+</sup> пленки конденсата нейтрального Li, осевшего на экране, является коэффициент нормального распыления  $S_{Li+Li}$ , данные о котором в литературе отсутствуют. Поэтому, его величина была оценена по значениям коэффициента распыления Be (как наиболее близкого по массе элемента) при бомбардировке его легкими ионами Ne<sup>+</sup>, He<sup>+</sup>, D<sup>+</sup>, H<sup>+</sup> с энергиями (50–100 эВ). По данным, приведенным в [10], значение  $S$  для этих сочетаний не превышает  $10^{-2}$ . Эта величина была принята в расчетах, которые осуществлялись также с помощью метода угловых коэффициентов. Для нашего случая использовалась расчетная схема, приведенная на рис. 2б, для которой угловые коэффициенты определялись по формуле:

$$\varphi(dF_1 F_2) = \frac{1}{2} \left\{ 1 - \frac{4 - x^2 + y^2}{[(4 + x^2 + y^2)^2 - 4x^2 y^2]^{1/2}} \right\}, \quad (4)$$

$$x = \frac{D}{h}, \quad y = \frac{d}{h}.$$

Расчеты потоков частиц лития, идущие от экрана-ловушки, были проведены для следующих геометрических параметров в вакуумной камере:  $h = 1.2$  м;  $D = 0.8$  м;  $d/2 = r = 0.22; 0.3; 0.38$  м.

Результаты расчетов потоков в местах расположения соответствующих датчиков кварцевых микровесов приведены в нижней строке таблицы. Сравнение величин плотности обратных потоков частиц рабочего тела МПД, полученных при измерениях, с расчетными значениями плотности потоков, идущих от экрана, указывает на равен-

ство их по порядку величины ( $\sim 10^{-8}$  г см $^{-2}$  с $^{-1}$ ), но закономерности распределения потоков в зависимости от  $r$  существенно разнятся. Последнее свидетельствует о наличии преобладающей составляющей обратных потоков непосредственно от МПД.

Следует также отметить, что в расчетах потоков частиц рабочего тела МПД, идущих от экрана в сторону измерительного блока не учитывалось рассеяние этих частиц на ионной компоненте основной струи МПД. По оценкам, представленным выше, длина свободного пробега частиц Li и частиц Li $^{+}$  вакуумной камере составляет величину порядка 0.5 м, что более чем вдвое меньше линейного размера вакуумной камеры. То есть частицы Li, двигающиеся от экрана-ловушки в сторону измерительных датчиков, в среднем претерпевают более двух столкновений. Учет этого процесса снижает расчетные величины потоков частиц Li, идущих от экрана, примерно на порядок.

Еще одним источником потоков частиц Li, падающих на чувствительные элементы измерительных датчиков, являлись внутренние боковые стенки вакуумной камеры. Конденсат частиц Li на стенках подвергался бомбардировке частицами Li $^{+}$ , что приводило к распылению пленки конденсата и возникновению потоков частиц Li в направлении измерительных датчиков.

Для оценки величин указанных потоков использовался, как и ранее, метод угловых коэффициентов. В виду отсутствия информации о распределении потоков струи двигателя по углу от осевого направления, при проведении расчетов было допущено, что по внутренним стенкам вакуумной камеры поток ионной компоненты рабочего тела двигателя распределялся равномерно и при расходе рабочего тела  $\mu = 0.065$  г с $^{-1}$  составлял  $G_1 \sim 1.0 \cdot 10^{-6}$  г см $^{-2}$  с $^{-1}$ .

Величина углового коэффициента  $\varphi(F_1, F_2)$  определялась из графиков рисунка, приведенного в [11, С. 416]. Графики  $\varphi(F_1, F_2)$  были получены авторами расчетным путем для внутренней поверхности замкнутого цилиндра длиной  $h$  с круглым отверстием в днище радиуса  $r$  и были построены в зависимости от величины  $h/r$ . По оси абсцисс графиков откладывалось отношение  $F_2/F_1$ , где  $F_2$  – площадь отверстия в днище цилиндра, а  $F_1$  – площадь внутренней полости цилиндра. Исходя из геометрии вакуумной камеры и расположения в ней измерительных датчиков, для определения  $\varphi(F_1, F_2)$  было принято:  $h = 120$  см,  $r = 20$  см,  $F_2/F_1 = 0.02$ . При этих исходных данных из графика было получено  $\varphi(F_1, F_2) \leq 0.002$ .

Величина плотности потока частиц Li, идущих со стенок вакуумной камеры и падающих на поверхности измерительных датчиков, определялись из выражения  $G_2 = S \varphi(F_1, F_2) G_1 = 2.0 \cdot 10^{-11}$  г см $^{-2}$  с $^{-1}$ , где  $S = 0.02$  – коэффициент нормального распыления.

Полученная оценка величины  $G_2$  на три порядка меньше результатов измерений и оценки потоков, идущих от экрана-ловушки и падающих на чувствительные элементы измерительных датчиков. Следовательно, наличие этих сторонних потоков не могло существенно исказить результаты измерений.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основании полученных результатов измерений обратных потоков частиц рабочего тела МПД, расчетов потоков этих частиц в периферийных областях от осевого направления струи и оценок потоков частиц рабочего тела от сторонних источников, с уверенностью можно говорить, что экспериментально полученные значения  $\sim 7 \cdot 10^{-8} - 10^{-7}$  г см $^{-2}$  с $^{-1}$  являются верхней границей величины обратных потоков частиц Li в заднюю полусферу МПД двигателя.

МПД является маршевым двигателем, который характеризуется значительной величиной тяги, а, следовательно, и большим расходом рабочего тела, в сравнении с двигателями ЭРД ориентации и стабилизации. Следствием высоких расходов рабочего тела и конструктивных особенностей МПД двигателя являются высокие плотности потоков частиц рабочего тела в заднюю полусферу двигателя. Если не принимать никаких мер, то эти потоки могут за короткое время (десятки минут) привести к образованию тонких пленок рабочего тела на функционально важных внешних поверхностях КА. Одним из способов борьбы с этим негативным явлением является установка защитных экранов за срезом МПД двигателя.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коротеев А.С., Акимов В.Н. Перспективы развития космонавтики // Полет. 2003. № 12. С. 3–12.
2. Квасников Л.А., Латышев Л.А., Пономарев-Степной Н.Н. и др. Теория и расчет энергосиловых установок космических летательных аппаратов. М.: Изд-во МАИ, 2001.
3. Чиров А.А. Критические условия конденсации металлических рабочих тел ЭРД на поверхностях КА // Космич. исслед. 2006. Т. 44. № 2. С. 182–188 (Cosmic Research. P. 172).
4. Чиров А.А. Влияние тонких пленок конденсата металлического рабочего тела ЭРД на интегральные

- оптические коэффициенты терморегулирующих покрытий космических аппаратов. // Космич. ис-след. 2014. Т. 52. № 3. С. 248–256 (Cosmic Research. P. 235).
5. *Тихонов В.Б., Семенихин С.А., Чиров А.А. и др.* Разработка и испытания стационарного литиевого МПД-двигателя мощностью 100 кВт. НТО по контракту № NASW-4851 от 14 июля 1994 г., НИИ-ПМЭ МАИ и NASA (USA).
  6. *Tikhonov V.B., Semenikhin S.A., Brophy John, Polk Jay.* The experimental performance of the 100 kW Li thruster with external magnetic field // 24th International Electric Propulsion Conference, September 19–23, 1995. “Leningradsky 55” Congress Center Moscow, Russia, IEPC-95-105. P. 718–724.
  7. *Рыбаков В.В., Бургасов М.П.* Термический расчет высокотемпературного газа. М.: Машиностроение, 1968.
  8. *Шпильрайн Э.Э., Якимович К.А., Троицкий Е.Е. и др.* Теплофизические свойства щелочных металлов. М.: Стандарт, 1970.
  9. *Фаворский О.Н., Канданер Я.С.* Вопросы теплообмена в космосе. М.: Высшая школа, 1967.
  10. Распыление твердых тел ионной бомбардировкой / Под ред. Бериша Р. Вып. 2. М.: Мир, 1986.
  11. *Блох А.Г., Журавлев Ю.А., Рыжков Л.Н.* Теплообмен излучением. Справочник. М.: Энергоиздат, 1991.
  12. *Бабичев А.П., Бабушкина Н.А., Братковский А.М. и др.* Физические величины: Справочник. / Под ред. Григорьева И.С., Меймхова Е.З. М.: Энергоатомиздат, 1991.