

04;12

## Энергетический баланс стационарного плазменного двигателя

© А.И. Бугрова, А.В. Десятков, А.И. Морозов, В.К. Харчевников

Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет)

E-mail: bugrova@mitgea.ru

ФНЦ «Курчатовский институт», Институт ядерного синтеза

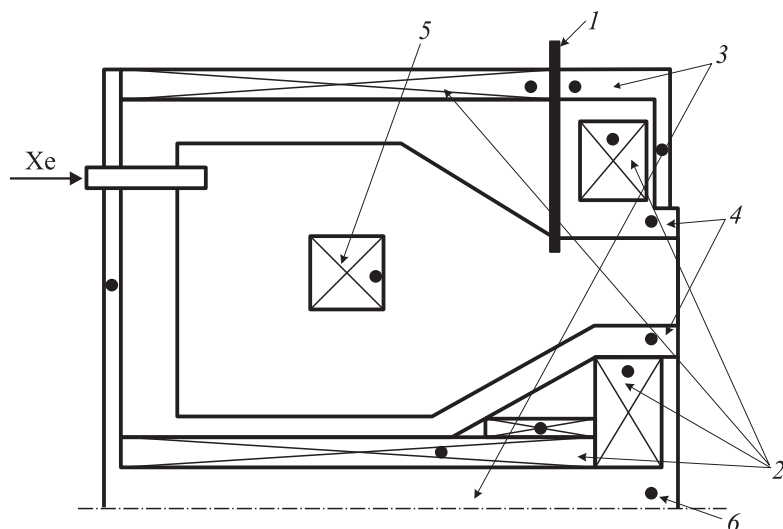
Поступило в Редакцию 28 апреля 2009 г.

Достаточно широкое распространение космических стационарных плазменных двигателей (СПД), естественно, ставит задачу всемерного повышения их кпд. Этот параметр не единственный, подлежащий оптимизации, тем не менее его важность очевидна. Для максимальной целесообразности соответствующих исследований важно установить распределение энергии, подводимой к двигателю. В данной публикации приводятся результаты измерения температуры отдельных элементов конструкции двигателя и изучаются тепловые потоки, определяющие энергетический баланс системы.

PACS: 89.20.Bb

Хорошо известно, что обычно измеряются такие интегральные параметры двигателя, как разрядный ток  $I_d$ , напряжение  $U_d$ , аналогичные величины, связанные с магнитной системой  $I_{mi}$ ,  $U_{mi}$ , а также электрические параметры катода-компенсатора  $I_k$ ,  $U_k$ . Основным выходным параметром является тяга двигателя. Зная тягу, полный расход рабочего вещества  $\dot{m} = \dot{m}_a + \dot{m}_k$  и полную мощность, вкладываемую в разряд  $W = I_d U_d + I_m U_{mi} + I_k U_k$ , вычисляют тяговый кпд  $\eta = F^2/2\dot{m}W$ , где  $F$  — тяга, а  $W$  — мощность, подводимая к двигателю. Столь общий подход позволяет определить наиболее энергоемкие узлы, но не дает представления о путях усовершенствования системы, поскольку последние предполагают знание физических процессов, ответственных за перенос энергии в каждом из перечисленных блоков и узлов двигателя.

Изучение энергетического баланса на основе измерения энергетических потоков, уносимых плазменной струей и выпадающих на элементы конструкции двигателя, проводились на модели СПД МАГ-А2 [1], схема которого приведена на рис. 1.



**Рис. 1.** Конструкция стационарного плазменного двигателя МАГ-А2: 1 — анод, 2 — магнитные катушки, 3 — магнитопровод, 4 — диэлектрический канал, 5 — миксина, 6 — точками (•) отмечены места расположения термопар.

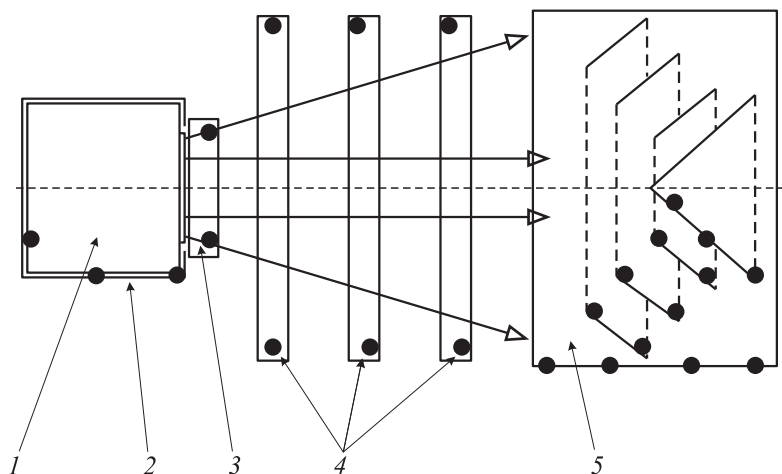
Измерения энергетических потоков за срезом двигателя проводились для трех характерных областей плазменной струи:

вблизи среза двигателя измерялись излучение и выброс частиц из „опушки“ (области, примыкающей к срезу);

в зоне между опушкой и цилиндром Фарадея (рис. 2) измерения проводились с помощью системы колец с установленными термопарами;

и наконец, в дальней области струи, которая характеризуется малым уровнем излучения (температура электронов мала), энергетический поток измерялся с помощью цилиндра Фарадея.

В стационарном режиме работы двигателя величина энергии, передаваемая на различные элементы конструкции Фарадея и на каждое кольцо системы вдоль плазменной струи, определялась по установленной температуре датчика (система колец и цилиндр Фарадея) и рассчитывалась из условия теплового баланса [2]. Температура каждого датчика определялась с помощью термопар хромель-капель, установленных в различных точках его конструкции (рис. 2).



**Рис. 2.** Схема измерения энергетических потоков двигателя МАГ-А2: 1 — стационарный плазменный двигатель МАГ-А2, 2 — калориметр двигателя, 3 — кольцо на срезе двигателя, 4 — три кольца вдоль плазменной струи, 5 — цилиндр Фарадея, • — точки установки термопар.

Измерения проводились в два этапа. На первом этапе определялась температура  $T_0$  элементов конструкции цилиндра Фарадея и каждого кольца системы вдоль плазменной струи при включении только магнитной системы двигателя и катода. Затем производился запуск двигателя, который работал в течение времени  $T = (2-3)$  h для выхода системы на тепловой стационарный режим, после чего определялась температура  $T$ . Мощность  $Q$  теплового потока определялась по формуле

$$Q = \varepsilon S \sigma (T^4 - T_0^4), \quad (1)$$

где  $\varepsilon$  — степень черноты материала,  $S$  — площадь излучающей поверхности,  $\sigma$  — постоянная Стефана–Больцмана,  $T_0$  и  $T$  — начальная и конечная температуры датчика.

В табл. 1 приведена мощность энергетических потоков на элементы измерительной системы при работе двигателя МАГ-А2 в рабочем режиме: разрядное напряжение  $U_d = 350$  V, разрядный ток  $I_d = 1.98$  A,

**Таблица 1.** Мощность энергетических потоков, уносимых плазменной струей на элементы измерительной системы при работе двигателя МАГ-А2 в рабочем режиме:  $U_d = 350$  В,  $I_d = 1.98$  А,  $\dot{m}_a = 2.0$  мг/с (Xe),  $\dot{m}_k = 0.4$  мг/с

Элементы измерительной системы	Мощность энергетических потоков, W
Кольцо № 1 на срезе двигателя	15
Система промежуточных колец № 2, 3, 4	27
Цилиндр Фарадея	447
Суммарный энергетический поток, выносимый плазменной струей	489

расход рабочего вещества  $\dot{m}_a = 2.0$  мг/с (ксенон), катодный расход  $\dot{m}_k = 0.4$  мг/с. Суммарная мощность энергетических потоков, уносимых плазменной струей, равна  $Q_c = 489$  W.

Измерение тепловых потоков на элементы конструкции двигателя проводилось по той же методике, что и измерения энергетических потоков, уносимых плазменной струей.

На рис. 1 указаны точки на конструктивных элементах двигателя, где были установлены термопары для определения температуры этих элементов.

Эксперимент проводился опять в два этапа. На первом этапе включались все магнитные катушки, устанавливались рабочие значения токов в каждой из них и разогревался до рабочего режима катод двигателя. После выхода на тепловой стационарный режим (без основного разряда) измерялась температура  $T_0$  отдельных элементов конструкции двигателя. Затем включался двигатель, который работал стационарно в течение  $T = 2-3$  h, и система выходила на тепловой стационарный режим (температура  $T$ ). Температуры  $T_0$  и  $T$  отдельных элементов конструкции двигателя в стационарном рабочем режиме двигателя ( $U_d = 350$  В,  $I_d = 1.98$  А, расход  $\dot{m} = 2.0$  мг/с (Xe),  $\dot{m}_k = 0.4$  мг/с) приведены в табл. 2.

Так как сбросы тепла внутри двигателя носят многоступенчатый характер, то простое суммирование тепловых потоков по всем элементам двигателя, считая, что каждый элемент излучает в „бесконечность“,

**Таблица 2.** Температуры  $T_0$  и  $T$  элементов конструкции двигателя в стационарном рабочем режиме двигателя МАГ-А2:  $U_d = 350$  В,  $I_p = 1.98$  А,  $\dot{m}_a = 2.0$  мг/с (Xe),  $\dot{m}_k = 0.4$  мг/с

Элемент конструкции МАГ-А2	$T_0$ , К	$T$ , К	Элемент конструкции МАГ-А2	$T_0$ , К	$T$ , К
Передний фланец	381	472	Анод	417	597
Внутренний магнитопровод	420	532	1-я магнитная катушка	453	581
Шпильки магнитопровода	382	429	2-я магнитная катушка	444	555
Задний фланец	365	448	3-я магнитная катушка	377	468
Наружная керамика — 8 mm от среза	431	725	Магнитные катушки на шпильках	388	440
Внутренняя керамика — 12 mm от среза	471	745	Миксина	593	681

дает завышенную примерно в 1.5 раза общую величину теплового излучения. Поэтому были проведены интегральные измерения теплового излучения двигателя в целом.

Эксперимент проводился с помощью метода калориметрии. Измерения проводились также в два этапа. На первом этапе определялась температура калориметра  $T_0$  при работе только магнитной системы двигателя и катода. Затем включался двигатель и определялась стационарная температура калориметра  $T$ .

Мощность  $Q_{th}$  теплового излучения основного разряда двигателя определялась по формуле (1).

Эти измерения позволили определить интегральную величину теплового излучения двигателя в целом, которая оказалась равна  $Q_{th} = 196$  W.

Измерения мощности энергетических потоков зоны струи вне двигателя вместе с мощностью теплового излучения конструкции двигателя дают суммарную мощность  $W = 685$  W. Величина мощности, вкладываемая в основной разряд, 693 W.

Таким образом, результаты измерения суммарной мощности энергетических потоков двигателя с точностью до 3% совпадают с величиной мощности, вкладываемой в основной разряд.

## Список литературы

- [1] Бугрова А.И., Морозов А.И., Сизов А.С., Харчевников В.К. // Космонавтика и ракетостроение. 2008. № 3 (52). Тематический выпуск, посвященный ЭРД и динамике низкотемпературной плазмы. С. 65–68.
- [2] Бугрова А.И., Красненков М.А., Ткачев В.И. // Теплофизика высоких температур. 1982. Т. 20. № 5. С. 979–981.