

УДК 621.455:533.9.08

Зондовые измерения в канале холловского двигателя номинальной мощностью 1,5 кВт

М. Б. Беликов, О. А. Горшков, А. С. Ловцов, А. А. Шагайда

Исследовательский центр имени М. В. Келдыша (ФГУП "Центр Келдыша"), Москва, Россия

Исследованы зондовые измерения локальных параметров плазмы в канале холловского двигателя номинальной мощностью 1,5 кВт при напряжениях разряда 300—1000 В и при анодных расходах рабочего тела 1,5—3,5 мг/с. Проведены измерения для двух специально подобранных режимов с существенно различными значениями напряжения разряда 300 и 790 В, но при одинаковой мощности разряда (расход ксенона составлял 3,5 и 1,5 мг/с, соответственно).

В настоящее время в связи с увеличением сроков активного существования космических аппаратов все большее значение принимают создание и отработка холловских ракетных двигателей с повышенным разрядным напряжением (до 1000 В). Повышение разрядного напряжения позволяет увеличить удельный импульс двигателя и, следовательно, ведет к уменьшению массы топлива на орбите. Одной из составляющих частей разработки холловских двигателей являются изучение локальных параметров плазмы в канале двигателя и определение закономерностей изменения этих параметров в зависимости от параметров разряда (разрядное напряжение, расход рабочего тела, конфигурация магнитного поля).

Для проведения исследований использовали лабораторную модель холловского двигателя номинальной мощностью 1,5 кВт. Разрядная камера двигателя имеет средний диаметр 88 мм. В качестве материала стенок разрядного канала использовался материал БГП-10, широко применяющийся в конструкции современных холловских двигателей. Материал представляет собой горячепрессованную керамику, состоящую из нитрида бора и оксида кремния. Конструкция двигателя была несколько изменена для размещения зондов в канале двигателя, однако геометрия разрядной камеры и магнитного контура осталась без изменений.

Всего было задействовано 12 зондов — 9 в разрядном канале и 3 — вне канала, вблизи среза двигателя. Внутри канала зонды были расположены заподлицо со стенкой с шагом 1 мм по оси и смещены по азимуту на $7,5^\circ$ каждый по отношению к соседнему зонду, т. е. все 9 зондов размещены в пределах 60° . Внешние зонды расположены на одной линии вдоль оси канала и отстояли от среза двигателя на 3, 9 и 15 мм, соответственно. Внутренние зонды выполнены из вольфрамореп-

ниевой проволоки диаметром 0,5 мм, материал внешних зондов вольфрам, диаметр проволоки 1,0 мм.

Основные параметры двигателя (тяга, удельный импульс) в ходе испытаний соответствовали параметрам, полученным ранее на двигателе, не оснащенном зондами.

Экспериментальные исследования проводили на установке КВУ-90 Центра Келдыша [1]. Вместимость вакуумной камеры 90 м^3 при диаметре 3,8 м. Суммарная производительность криогенной откачки составляет $58 \text{ м}^3/\text{с}$. Рабочее давление в камере в ходе испытаний не превышало $4 \cdot 10^{-3} \text{ Па}$.

Установка оснащена полностью автоматизированной системой регистрации данных на основе промышленного компьютера. Все параметры, необходимые для получения интегральных параметров двигателя, такие как тяга, разрядный ток I_d , разрядное напряжение U_d , преобразуются с помощью системы датчиков-нормализаторов и через модульную систему сбора данных L-card вводятся в компьютер.

Для изучения плазмы внутри ускорительного канала и в непосредственной близости от среза двигателя использовались плоские электростатические зонды. Способ их внедрения внутрь двигателя был аналогичен приведенному в [2]. Для снижения уровня шумов сканирующее напряжение на зонды подавалось относительно земли. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) зондов и их плавающие потенциалы регистрировались двухканальным цифровым осциллографом Tektronix TDS3012B, работающим в XY-режиме с усреднением итогового сигнала по нескольким кривым (до 32). Потенциал катода относительно земли измерялся отдельно, также с помощью осциллографа. Осциллограф имеет связь с компьютером через Ethernet-линию, что значительно ускоряет опрос всей системы зондов. На зонды

подавалось синусоидальное сканирующее напряжение частотой 50 Гц, амплитуда которого достигала 1500 В.

Данные с ленгмюровских зондов обрабатывались с помощью специального программного обеспечения. Зондовые измерения локальных параметров проводились при напряжениях разряда 300—1000 В и при анодных расходах рабочего тела \dot{m}_a 1,5—3,5 мг/с. Время начального прогрева двигателя из холодного состояния составляло не менее 3 ч при функционировании на номинальной мощности. Это время необходимо для выхода двигателя на стационарный тепловой режим и стабилизации всех характеристик (тяга, I_d). Время функционирования двигателя в каждом режиме до начала измерений составляло не менее 20 мин, в течение которых происходила оптимизация магнитного поля двигателя. Во всех случаях параметры плазмы определялись для оптимальных режимов функционирования двигателя.

Потенциал плазмы определялся по местоположению перегиба в ВАХ — по первой производной ВАХ. При этом потенциалом плазмы полагалась точка достижения максимума первой производной ВАХ. В ряде случаев производная не падает после достижения максимума, а выходит на постоянное значение. В этом случае потенциалом плазмы полагается значение потенциала, при котором производная ВАХ выходит на полку [3].

Обычно этой же областью ВАХ пользуются для определения электронной температуры, однако это может приводить к серьезным погрешностям. Дело в том, что при больших электронных токах на зонд может происходить его разогрев, что приводит к искажению получаемых результатов. В этом случае для определения электронной температуры удобнее пользоваться участком ВАХ в области плавающего потенциала. В работе для определения электронной температуры использовалась следующая формула [4]:

$$\ln(\partial I / \partial U) = \text{const} + (eU)/(kT_e).$$

Таким образом, наклон характеристики производной тока в полупологарифмическом масштабе позволяет определить температуру электронов. Следует отметить, что полученная величина может лишь качественно отображать энергетическую характеристику электронной компоненты. При обработке результатов не учитываются особенности, связанные с влиянием таких факторов, как отличие функции распределения электронов по энергиям от максвелловской, влияние замагниченности электронов на ВАХ зондов. Влияние данных факторов может существенно исказить получен-

ные результаты, поэтому все данные, полученные в серии экспериментов, следует рассматривать скорее как качественные результаты, чем как точные цифровые значения.

Из полученных данных можно сделать выводы о том, что при повышении разрядного напряжения и постоянном расходе происходит рост безразмерного потенциала (отношения потенциала плазмы к U_d) в зоне анодной плазмы, а для значений $U_d \sim 790$ —1000 В начинает формироваться зона с наличием максимума в распределении потенциала. При этом максимальное значение потенциала плазмы может превышать разрядное напряжение. Максимальное значение E растет, а зона с заметным значением напряженности электрического поля (слой ускорения) расширяется в сторону как катодной, так и анодной плазмы (рис. 1, а). Осевое положение максимального значения электрического поля практически не смещается.

С увеличением анодного расхода от 1,5 до 3,5 мг/с при постоянном разрядном напряжении максимальное значение E заметно не изменяется (см. рис. 1, б). В некоторых режимах происходит смещение E_{max} по оси на 5—7 мм в сторону среза двигателя. Размер зоны с заметным значением E существенно не изменяется.

Электронная температура при повышении разрядного напряжения (рис. 2) растет практически линейно для всех исследовавшихся расходов рабочего тела (рис. 3) в соответствии с выражением

$$T_e[\text{eV}] \sim 0,1U_d[\text{V}] + 12,$$

отклонение от этого закона возникает из-за снижения темпа роста T_e с возрастанием U_d в диапазоне $U_d = 400$ —500 В (для $\dot{m}_a = 1,5$ и 2,5 мг/с) на уровне 55—60 эВ, а также в диапазоне $U_d \geq 700$ В на уровне 100—110 эВ. При этом зона с заметным значением T_e расширяется с некоторым смещением осевого положения $T_{e \text{ max}}$ на малых расходах (1,5 мг/с) в сторону среза двигателя, а на больших (3,5 мг/с) — в сторону анода. В то же время при $\dot{m}_a = 2,5$ мг/с данная область расширяется в обе стороны, а положение $T_{e \text{ max}}$ на оси практически не изменяется. Максимальное значение T_e слабо зависит от анодного расхода газа (рис. 4).

Для понимания процессов, происходящих в плазме с увеличением U_p при сохранении постоянной мощности разряда, были исследованы два режима с одинаковой мощностью 885 Вт, но различными напряжениями разряда (режим 1 — $U_d = 300$ В, $\dot{m}_a = 3,5$ мг/с; режим 2 — $U_d = 790$ В, $\dot{m}_a = 1,5$ мг/с).

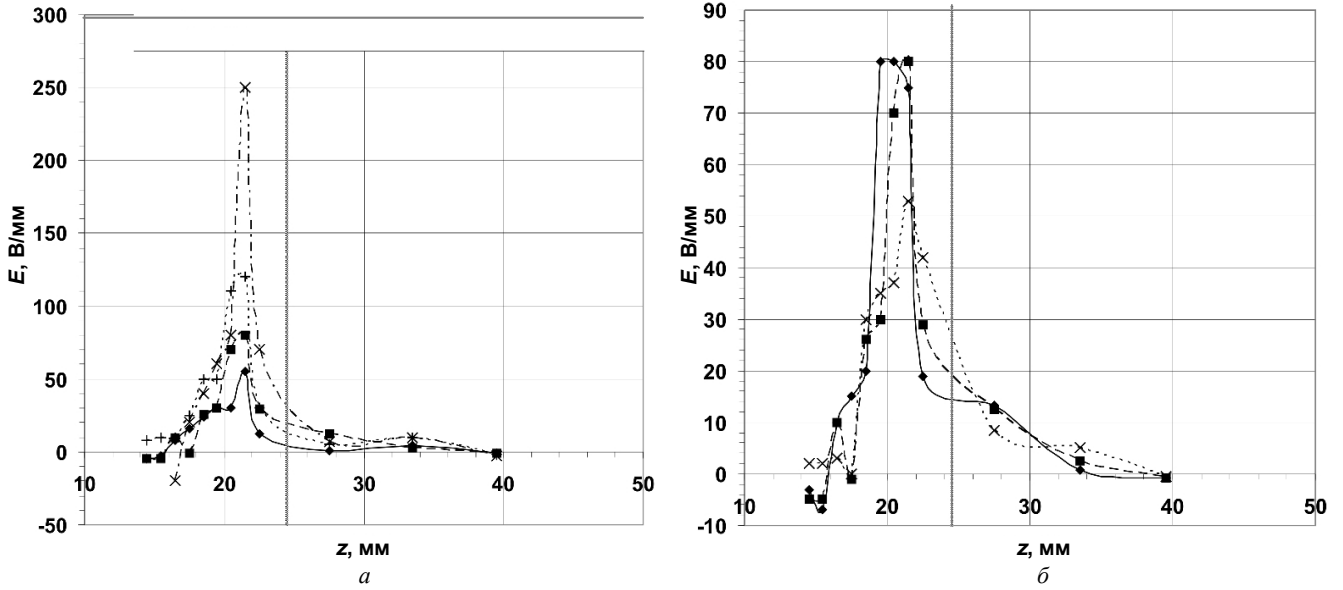


Рис. 1. Изменение напряженности электрического поля вдоль канала двигателя в зависимости от:

- a — напряжения разряда при анодном расходе 2,5 мг/с:
 —◆— 300 В; —+— 790 В; —■— 500 В; —x— 1000 В; - - - - - срез двигателя;
- б — анодного расхода при разрядном напряжении 500 В:
 —◆— 1,5 мг/с; —x— 3,5 мг/с; —■— 2,5 мг/с; ~~~~~ срез двигателя

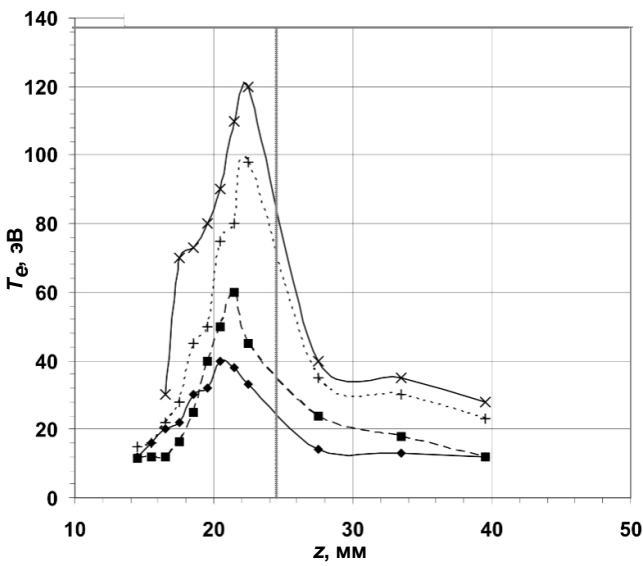


Рис. 2. Изменение электронной температуры вдоль канала двигателя в зависимости от напряжения разряда при анодном расходе 2,5 мг/с:

- ◆— 300 В; —+— 700 В; —■— 500 В;
 —x— 1000 В; ~~~~~ срез двигателя

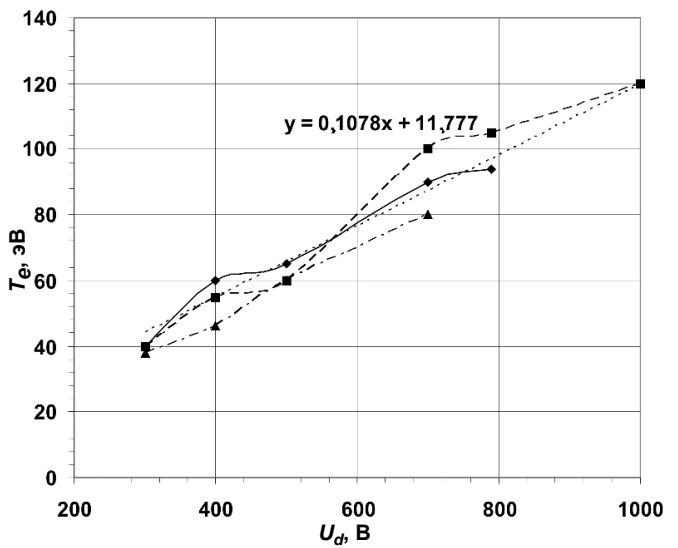


Рис. 3. Зависимость максимального значения электронной температуры от напряжения разряда для различных анодных расходов:
 —◆— 1,5 мг/с; —▲— 3,5 мг/с; —■— 2,5 мг/с;
 - - - - - линейная аппроксимация

Из сравнения полученных данных можно сделать вывод, что при переходе на более высокое напряжение разряда относительный потенциал на анодной границе зоны ускорения заметно повышается и формируется максимум в распределении потенциала со значением, превышающем U_d . Существенно возрастает максимальное значение напряженности электрического поля (более чем в

3 раза) (положение E_{max} на оси практически не меняется), а зона с заметным значением электрического поля расширяется в основном в сторону анода. Максимальное значение электронной температуры растет примерно пропорционально U_d , а зона с заметным значением T_e расширяется в сторону как анодной, так и катодной плазмы.

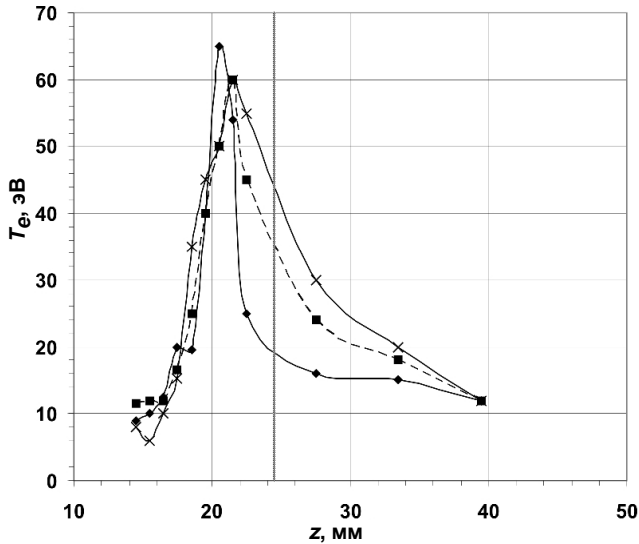


Рис. 4. Изменение электронной температуры вдоль канала двигателя в зависимости от анодного расхода при разрядном напряжении 500 В:
 —◆— 1,5 мг/с; ---×--- 3,5 мг/с; ---■--- 2,5 мг/с;
 ~~~~~ — срез двигателя

Помимо зондовых измерений, проводилась диагностика плазменной струи двигателя с помощью

трехсеточного зонда. Результаты измерений обрабатывались с помощью полуэмпирической модели плазмы в канале холловского двигателя с применением экспериментально полученной зависимости электронной температуры от потенциала плазмы. В качестве результата была получена скорость ионообразования в канале холловского двигателя [5].

Качественные закономерности, полученные в ходе данной серии экспериментов, представлены в таблице.

### Заключение

С помощью зондовых измерений получены основные качественные закономерности изменения локальных параметров плазмы (потенциал, электрическое поле, электронная температура, скорость ионообразования) в канале холловского двигателя с номинальной мощностью 1,5 кВт. Полученные данные могут быть использованы при разработке холловских двигателей с повышенным удельным импульсом.

### Основные результаты, полученные в ходе зондовых измерений

| Параметры                | $U_d$ — растет<br>$\dot{m}_a$ = const | $U_d = \text{const}$<br>$\dot{m}_a$ — растет | $U_d$ — растет<br>$\dot{m}_a$ — падает<br>Мощность = const |
|--------------------------|---------------------------------------|----------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| $T_e$                    | $\sim 0,1 \cdot U_d$                  | const                                        | $\sim 0,1 \cdot U_d$                                       |
| Длина зоны ускорения     | Растет                                | "                                            | Растет                                                     |
| Длина зоны ионизации     | const                                 | Уменьшается                                  | "                                                          |
| Положение зоны ионизации | "                                     | Сдвигается к катоду                          | Сдвигается к аноду                                         |
| Скорость ионообразования | "                                     | $\sim \dot{m}_a^2$                           | $\sim \dot{m}_a^2$                                         |

### Литература

- Gorshkov O. A., Ilyin A. A., Rizakhanov R. N. // Proceedings of the 6<sup>th</sup> Propulsion for Space Transportation of the XXI<sup>st</sup> Century Symposium. — Versailles, France. 2002. P. S20\_2.
- Warner N. Z., Szabo J. J., Martinez-Sanchez M. // 28<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, 2003. IEPC-2003-082.

- Бугрова А. И., Версоцкий В. С., Десятков А. В. // ПТЭ. 1992. № 3. С. 162.
- Козлов О. В. Электрический зонд в плазме. — М.: Атомиздат, 1969.
- Belikov M. B., Gorshkov O. A., Lovtsov A. S., Shagayda A. A. // 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference, 2007. IEPC-2007-131.

Статья поступила в редакцию 7 ноября 2007 г.

## Probe measurements in the channel of 1.5 kW Hall thruster

M. B. Belikov, O. A. Gorshkov, A. S. Lovtsov, A. A. Shagayda  
 Keldysh Research Center, Moscow, Russia

*Probe measurements of local plasma parameters in the channel of a 1.5 kW Hall thruster were carried out at voltage of 300—1000 V and at anode gas flow rate 1.5—3.5 mg /s. Moreover, measurements were carried out for two specially selected modes with significantly different voltage 300 and 790 V but at constant discharge power (anode flow rate was 3.5 and 1.5 mg/s accordingly).*

\* \* \*