

04

Распределение локальных параметров плазмы в канале холловского двигателя при двух различных формах горения разряда

© А.С. Ловцов, Д.А. Томилин, А.С. Шашков

Государственный научный центр „Исследовательский центр им. М.В. Келдыша“, Москва

Московский физико-технический институт (государственный университет), Долгопрудный, Московская обл.

E-mail: restless.mipt@gmail.com

Поступило в Редакцию 6 марта 2014 г.

Экспериментально обнаружено, что при определенных параметрах работы холловского двигателя имеет место скачкообразное перестроение формы горения разряда. Приведены результаты зондовых измерений, показывающие различие в распределении плавающего и плазменного потенциалов, температуры электронов и напряженности электрического поля в канале холловского двигателя при 2 различных формах горения разряда. Измерения проводились вдоль оси разрядного канала при помощи ленгмюровских зондов.

Холловские двигатели (ХД) относят по типу к плазменным ускорителям с замкнутым дрейфом электронов (УЗД). В основе работы таких двигателей лежит создание тяги при помощи ускорения ионизованного рабочего тела в скрещенных электрическом и магнитном полях. Разрядный канал устройств имеет кольцеобразную форму, в которой организовано радиальное магнитное поле. Разрядное напряжение приложено между анодом, который также является газораспределителем, и катодом вдоль оси разрядного канала. Широкое распространение получили 2 схемы холловских двигателей: двигатель с анодным слоем (ДАС) и стационарный плазменный двигатель (СПД). Подробный принцип работы таких двигателей описан в работах [1–4].

Авторами статьи экспериментально (как путем варьирования напряжения разряда, газового расхода и конфигурации внешнего магнитного поля, так и за счет изменения геометрии изоляционных колец вслед-

ствии бомбардировки высокоэнергетическими ионами) подтверждено существование нескольких различных режимов работы ХД. Область значений параметров, в которой происходят перестроения, по своей структуре довольно сложна, а ее положение зависит от многих факторов (материал и степень загрязнения изоляционных колец, степень раскрытия канала, качество вакуума и т.д.). В эксперименте использовался двигатель КМ-88 со средним диаметром разрядного канала 88 mm и номинальными значениями напряжения и тока разряда 550 V и 2.9 A. На двигателе данной модели перестроения разряда можно наблюдать при заниженном относительно номинального на $\sim 50\%$ значении анодного расхода, напряжении разряда выше 400 V и смещенном относительно средней линии к любому из изоляционных колец максимуму градиента магнитного поля.

На данном этапе режимы классифицируются по внешнему признаку: по форме горения разряда. Оптимальный режим работы двигателя с тонким характерным свечением вдоль оси двигателя получил название „спица“, а альтернативный режим работы с интенсивным свечением всей области пучка — „колокол“. Изменение формы горения разряда — лишь визуальная составляющая изучаемого эффекта. Вместе с изменением формы горения разряда скачком меняются интегральные параметры, такие как удельный импульс, тяга двигателя и КПД. При перестроении в режим „колокол“ тяга падает на $\sim 10\%$, удельный импульс падает на $\sim 5\%$, КПД падает на $\sim 10\%$. Кроме того, ухудшается тепловой режим работы ХД: температура двигателя в стационарном режиме увеличивается в ~ 1.5 раза. Все это может существенным образом сказываться на надежности изделия в целом, что определяет актуальность проведения исследований по данному направлению.

Похожее явление уже изучалось на двигателях типа АТОН. На этих двигателях также наблюдаются 2 режима работы, которые получили в англоязычной литературе названия „swallow tail“ и „spike“ (иногда „spoke“). Исследования, проводимые на этих двигателях, показали:

1. Интегральная интенсивность свечения в режиме „spike“ выше на $\sim 20\%$ [5].
2. Плотность ионного тока в режиме „swallow tail“ выше на любом расстоянии от среза разрядной камеры для любого напряжения [5–7].
3. Угол расхождения струи в режиме „swallow tail“ — 26° , в режиме „spike“ — 44° [7].

4. Согласно измерениям интегральной светимости ксенона зона высокой интенсивности излучения в режиме „spike“ смещается ближе к срезу двигателя [6,7], однако, пользуясь данной методикой, авторы не упоминают в своих работах об оптической прозрачности плазмы в различных режимах.

5. Режим „swallow tail“ устойчив к возбуждению ионизационной моды. В режиме „spike“ устойчивости нет [8].

Однако описанных выше результатов недостаточно для сравнения режимов „swallow tail“ и „spike“ с режимами „спица“ и „колокол“. Для уверенности в идентичности наблюдаемых явлений необходимо знать причину перестроения, которая, к сожалению, авторами не упоминается. Вполне возможно существование более чем 2 типов горения разряда.

На данный момент получено некоторое представление о различии интегральных параметров режимов „спица“ и „колокол“. Цель представленной работы — исследование различий в распределении локальных параметров плазмы внутри канала ХД в режимах „спица“ и „колокол“ в области ионизации плазмы.

Испытания проводились в вакуумной камере КВУ-90 (криогенная вакуумная камера, объем 90 m^3) с вакуумом не выше 10^{-2} Pa . Эксперимент проходил на двигателе КМ-88 с изоляционными кольцами, выполненными из БПП-10 (горячепрессованная керамика из смеси оксида кремния и нитрида бора). Напряжение разряда составляло 530 V , ток разряда — 1.6 A , расход — 1.8 mg/s , максимум магнитного поля составлял 0.03 T , максимум градиента магнитного поля смещен относительно средней линии в сторону внешнего изоляционного кольца. Данная точка области параметров работы двигателя является переходной между 2 режимами работы — незначительной вариацией магнитного поля можно получить оба режима при сохранении остальных параметров неизменными.

Для определения параметров плазмы была снята вольт-амперная характеристика (ВАХ) с 9 ленгмюровских зондов радиусом 0.6 mm , смонтированных заподлицо со стенкой внешнего изоляционного кольца на расстоянии 1 mm друг от друга в аксиальном направлении (рис. 1). Зонды разнесены на $7^\circ 30'$ в азимутальном направлении для минимизации взаимного влияния друг на друга.

Ниже описана схема измерительной установки. ХД помещен в вакуумную камеру. На каждый зонд поочередно подавался сигнал переменного напряжения „пила“ амплитудой 100 V и постоянная со-

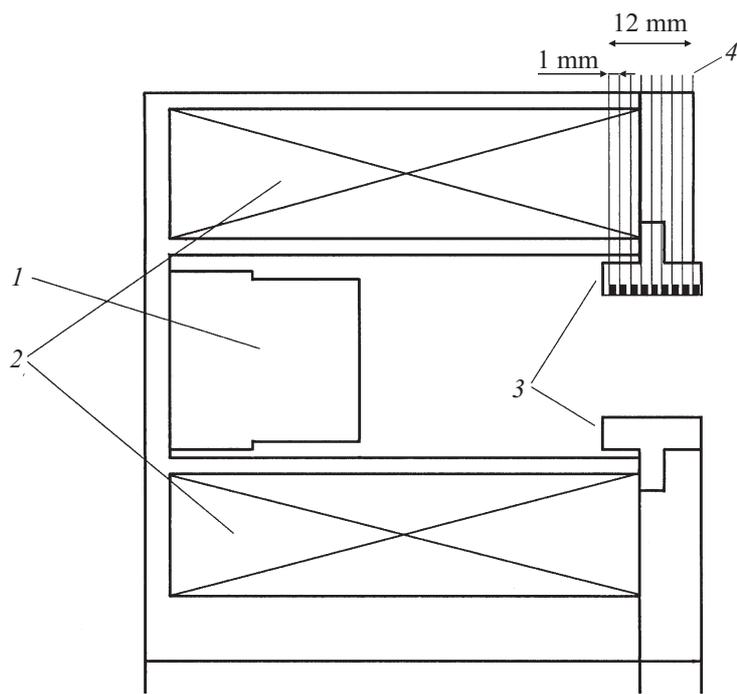


Рис. 1. Схема расположения зондов, проекция на плоскость, параллельную оси двигателя: 1 — анод, 2 — магнитные катушки, 3 — изоляционные кольца, 4 — ленгмюровские зонды.

ставляющая напряжения, близкая к потенциалу плазмы на каждом из зондов. Сигнал с каждого зонда подавался через шунт сопротивления 1000Ω на вход цифрового осциллографа TEKTRONIX TDS 3012B. На второй вход осциллографа подавалось пилообразное напряжение.

Метод обработки ВАХ описан в книге [9]. В случае, когда точка насыщения электронного тока недостижима, температура определяется на участке ВАХ, где наибольший вклад в общий ток вносит ионная составляющая последнего (область плавающего потенциала):

$$T_e = \frac{e}{k_B} \left[\frac{\partial}{\partial V} \left(\ln \frac{\partial I}{\partial V} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где T_e — средняя температура электронов, e — заряд электрона, k_B — постоянная Больцмана, I — ток разряда, V — напряжение разряда.

Также в работе [9] описан метод нахождения потенциала плазмы по максимуму второй производной тока по напряжению. Напряжение, при котором достигается максимум второй производной, и есть потенциал плазмы.

Результаты измерения плавающего потенциала представлены на рис. 2, *a*. Стоит отметить, что в режиме „колокол“ в области катодной плазмы плавающий потенциал достигает значения порядка потенциала катода.

В данной работе при обработке ВАХ пренебрегалось наличием магнитного поля и отличием функции распределения электронов от максвелловской. При определении температуры электронов использовался угол наклона логарифма производной тока при одном и том же (нулевом) значении тока на зонд. Выбор величины тока на зонд определялся исходя из соображения, что потенциал плазмы, определенный графическим методом, должен совпадать с потенциалом плазмы, определенным по полученному значению температуры (формула (2)). Таким образом, представленное (рис. 2, *b*) распределение температур носит исключительно качественный характер. Основным результатом заключается в том, что температура электронов в режиме „колокол“ почти на 70% выше, чем в режиме „спица“. Также показано, что максимум температуры (зона ионизации) в „колоколе“ смещен в сторону анода на 2–4 мм.

Потенциал плазмы определялся двумя способами. Первый способ — по максимуму второй производной тока по напряжению [9]. Этот метод является наиболее точным, но применим только для первых трех зондов, где плазма еще невозмущенная (рис. 2, *c*). Второй способ — определение потенциала плазмы через плавающий потенциал и температуру электронов по формуле

$$\varphi_p = \varphi_f - \frac{k_B T_e}{2e} \ln \left(\frac{\pi m}{2M} \right), \quad (2)$$

где m — масса электрона, M — масса иона, φ_p — потенциал плазмы, φ_f — плавающий потенциал.

Дифференцированием распределения потенциала плазмы получено распределение напряженности электрического поля (рис. 2, *d*). Полученное распределение свидетельствует о смещении зоны ускорения в

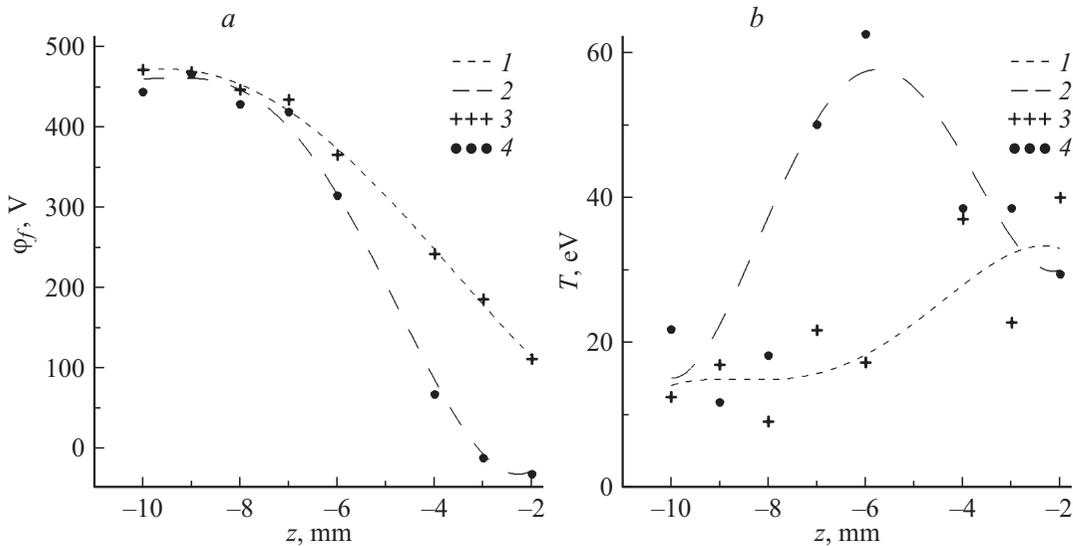


Рис. 2. Результаты эксперимента: *a* — распределение плавающего потенциала, *b* — распределение температуры электронов, *c* — распределение потенциала плазмы, *d* — распределение электрического поля. Обозначения: z — расстояние от среза разрядной камеры вдоль оси канала (за „0“ принята точка среза разрядной камеры), 1 — режим „спица“, аппроксимация; 2 — режим „колокол“, аппроксимация; 3 — режим „спица“, экспериментальные значения, 4 — режим „колокол“, экспериментальные значения.

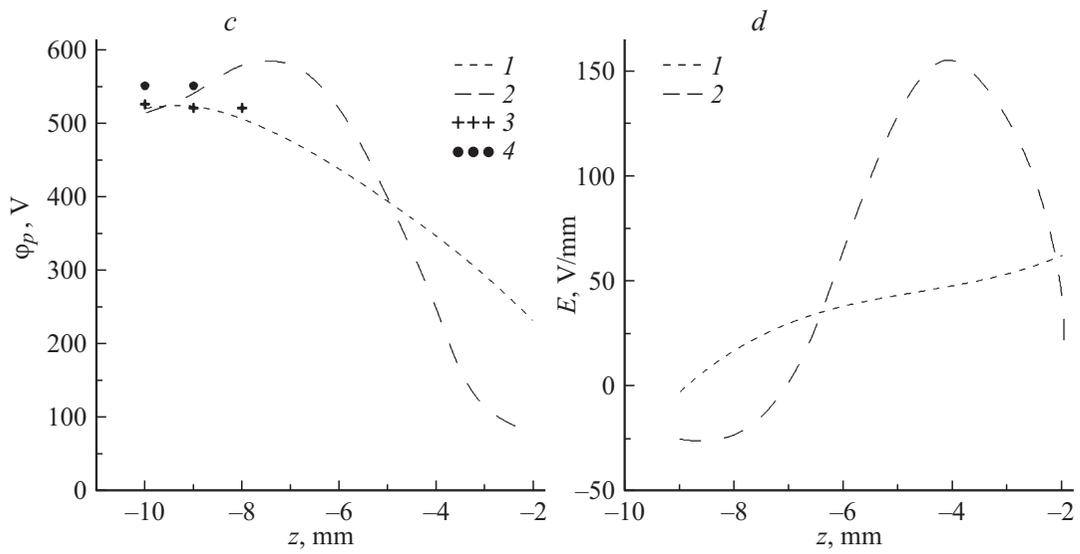


Рис. 2 (продолжение).

режиме „колокол“ в сторону анода. При этом зона ускорения в режиме „колокол“ сужается в ~ 2 раза, а максимум электрического поля по модулю превышает электрическое поле в „спице“ почти в 3 раза.

Концентрацию электронов в области анодной плазмы, где значение I_e известно, можно оценить по формуле

$$n_e = 4I_e / eV_{Te}S, \quad (3)$$

где $V_{Te} = \sqrt{\frac{2k_B T_e}{\pi m}}$ — средняя кинетическая скорость электронов, n_e — концентрация электронов, S — площадь поверхности зонда, m — масса электрона, I_e — ток на зонд при потенциале зонда, равном потенциалу плазмы.

В пределах погрешности концентрация электронов в „колоколе“ и „спице“ в области анодной плазмы одинакова и составляет $\sim 10^{16} \text{ м}^{-3}$.

Таким образом, в данной работе показано, что есть области параметров работы ХД, в которых при незначительной вариации магнитного поля скачком существенно изменяются как интегральные, так и локальные параметры плазмы разряда ХД. При перестроении в режим „колокол“ значение температуры электронов в максимуме растёт на $\sim 70\%$, зона ионизации смещается на 2–4 мм к аноду, зона ускорения сужается в ~ 2 раза, а максимум электрического поля увеличивается в ~ 3 раза.

В дальнейшем планируется провести исследование влияния параметров работы двигателя на перестроения разряда, а также исследование структуры колебаний плазмы в режимах „спица“ и „колокол“.

Список литературы

- [1] Жаринов А., Ерофеев В., Гришин С. Плазменные ускорители. М.: Машиностроение, 1973. С. 54.
- [2] Горшков О., Муравлев В., Шагайда А. Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов / Под ред. А. Коротева. М.: Машиностроение, 2008. Гл. 1. С. 18.
- [3] Морозов А., Кислов А., Зубков И. // Письма в ЖЭТФ. 1968. Т. 7.
- [4] Морозов А. Элементы динамики потоков в ЭРД. Т. 1. М.: Атомиздат, 1978. С. 13.
- [5] Lyszyk M., Cadiou A., Dudeck M., Marque J.P. // Spacecraft propulsion. 3rd International conference. France, Cannes, European space agency ESASP-465, 2001. P. 331.

- [6] *Roche S., Prioul M., Magne L.* et al. // Spacecraft propulsion. 3rd International conference, France, Cannes, European space agency ESASP-465, 2001. P. 351.
- [7] *Roche S., Bechu S., Prioul M.* et al. // 36th Joint Propulsion Conference. USA, Huntsville, Alabama, 2000. AIAA-00-3523.
- [8] *Prioul M., Bouchoule A., Dumax B.* et al. // Spacecraft propulsion. 3rd International conference. France, Cannes, European space agency ESASP-465, 2001. P. 317.
- [9] *Козлов О.В.* Электрический зонд в плазме. М.: Атомиздат, 1969. Гл. 9. С. 179.