

04

## Электродинамический плазменный двигатель с капиллярно-пористыми электродами

© Ю.В. Мартыненко,<sup>1,2</sup> М.Ю. Нагель<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“, 123182 Москва, Россия

<sup>2</sup> Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ, 115409 Москва, Россия  
e-mail: mifst04nmy@mail.ru, martyn907@yandex.ru

Поступило в Редакцию 11 февраля 2021 г.

В окончательной редакции 4 апреля 2021 г.

Принято к публикации 20 апреля 2021 г.

Предложена схема двигателя для космических аппаратов на основе стационарного электродинамического плазменного ускорителя с капиллярно-пористыми электродами. Такие электроды возобновляемы и не деградируют, а срок их службы ограничен запасом металла-наполнителя. Найдены режимы, при которых капиллярно-пористые электроды эффективны. При этих режимах рассмотренный ускоритель может дать тягу более десяти ньютонов и удельный импульс десятки km/s. В качестве металла-наполнителя капиллярно-пористых электродов могут быть использованы Li, S и Ga с пористыми матами из молибдена или вольфрама.

**Ключевые слова:** плазменный двигатель, тяга, удельный импульс, капиллярно-пористые электроды.

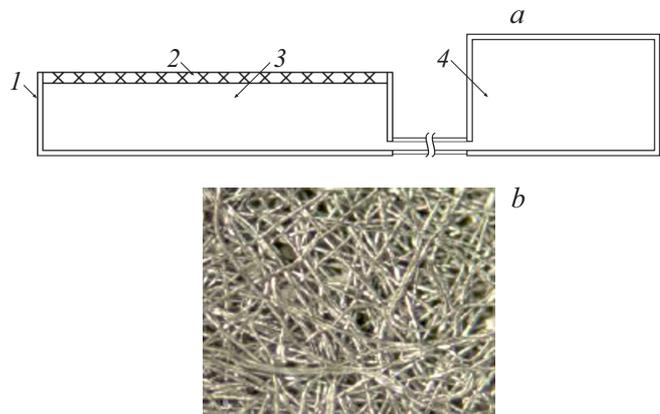
DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51213.31-21

### Введение

В настоящее время ведутся интенсивные работы по созданию мощных двигателей для космических аппаратов [1–4]. Важной характеристикой таких двигателей является долговечность. Одним из решений проблемы долговечности являются безэлектродные двигатели [5–7]. Другим решением может стать двигатель с возобновляемыми и недеградирующими электродами, например, плазменный двигатель с капиллярно-пористыми электродами [8]. Капиллярно-пористый электрод состоит из корпуса с расплавом металла (рис. 1, *a*). Его сторона, обращенная к плазме, состоит из пористых матов (рис. 1, *b*), пропитанных жидким металлом, поступающим за счет поверхностного натяжения, при этом корпус соединен с резервной емкостью с расплавом металла (рис. 1, *a*). Поверхность электродов, обращенная к плазме, все время покрыта слоем расплавленного металла, возобновляемого за счет капиллярных сил, и не деградирует.

Такие электроды возобновляемы, их срок службы ограничен запасом металла, используемого для расплава. Использование капиллярно-пористых электродов возможно в различных типах плазменных двигателей. В работе [8] предлагался магнитогиродинамический ускоритель с капиллярно-пористыми электродами. Здесь рассмотрено электродинамическое ускорение плазмы, впервые предложенное в [9], в стационарном режиме работы плазменного ускорителя. В качестве плазмообразующего вещества выбран гелий. В настоящей работе определяются режимы, при которых капиллярно-пористые электроды эффективны. Предлагается коаксиальный плазменный ускоритель, состоящий из внешнего

электрода радиуса  $R_1$  и внутреннего радиуса  $R_0$  (рис. 2). Полезная длина электродов  $l$ . Ускоряемой массой является плазма, которая замыкает электрическую цепь и, находясь в магнитном поле тока в электродах, приобретает ускорение вследствие силы Ампера. В настоящей работе предлагается общая концепция двигателя на основе стационарного электродинамического плазменного ускорителя с капиллярно-пористыми электродами. Детальная разработка такого двигателя, изучение, например, таких вопросов, как неустойчивости плазмы в ускорительной камере, не входит в задачу настоящей работы.



**Рис. 1.** *a* — схема капиллярно-пористого электрода: корпус электрода 1, сторона, обращенная к плазме пористого мата 2, заполненного жидким металлом и контактирующая с объемом жидкого металла 3, пополняемого из резервного объема с жидким металлом 4; *b* — пористый мат.

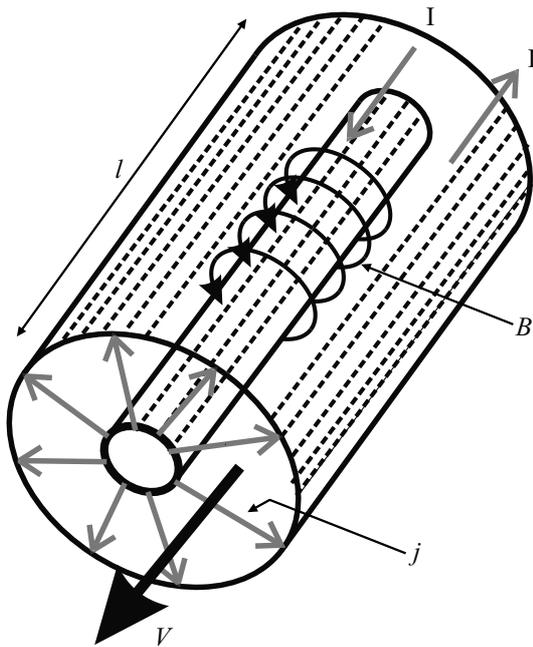


Рис. 2. Схема коаксиального плазменного электродинамического ускорителя.

### 1. Стационарный режим плазменного ускорителя

Полагается, что на входе в ускоритель гелий ионизуется, и образовавшаяся плазма потом ускоряется на длине  $l$ . Способ создания плазмы — высокочастотный или дуговой разряд — здесь не рассматривается. Мы рассматриваем только ускорение плазмы в аксиальном ускорителе с капиллярно-пористыми электродами.

Уравнения, описывающие ускорение плазмы в ускорителе, следующие. Неразрывность потока плазмы дает зависимость плотности плазмы  $\rho = M \cdot n$  ( $M$  — масса атома He,  $n$  — число атомов He в единице объема) от координаты  $x$  вдоль ускорителя:

$$\rho(x) = \rho_0 V_0 / V(x), \tag{1}$$

где  $\rho_0$  и  $V_0$  — плотность плазмы и ее начальная скорость на входе в ускоритель,  $V(x)$  — скорость плазмы на расстоянии  $x$  от входа в ускоритель.

Сила, действующая на единицу объема плазмы в ускорителе, равна

$$\rho(x) \frac{dV}{dt} = \langle j(x)B(x) \rangle, \tag{2}$$

где  $\langle jB \rangle$  — усредненное по сечению произведение плотности тока и магнитного поля, создаваемого током в электродах. Мы рассматриваем параметры плазмы с малым давлением и не учитываем градиент давления в (2). Сопротивление плазмы много больше сопротивления электродов. Обобщенный закон Ома

$$j(x, r) = \sigma(E(r) - V(x) \cdot B(x, r)), \tag{3}$$

где  $\sigma$  — проводимость плазмы,  $E = U/r \cdot \ln(R_1/R_0)$  — напряженность электрического поля в коаксиальном ускорителе,  $U$  — разность потенциалов в плазме между электродами.

Проводимость плазмы перпендикулярно магнитному полю равна

$$\sigma = \sigma_0 / (1 + \beta^2), \tag{4}$$

где  $\sigma_0 = (e^2 n / m) \tau$  — проводимость плазмы без магнитного поля,  $e$  и  $m$  — заряд и масса электрона,  $v_e$  — тепловая скорость электронов,  $\beta = \omega \tau$  — параметр Холла,  $\omega = eB/m$  — циклотронная частота электрона,  $\tau = (n \sigma_{ei} v_e)^{-1}$  и  $\sigma_{ei}$  — время и сечение столкновения электрона с ионами. Нагрев плазмы быстро приводит к ее ионизации, так что можно не учитывать столкновения электронов с нейтральными атомами. При однократной ионизации  $\sigma_{ei} \approx 10^{-16} / T^2$  ( $m^2$ ), где  $T$  — электронная температура в eV и  $\sigma_0 \approx 400 T e_e^{3/2}$  ( $\Omega \cdot m$ )<sup>-1</sup>.

Время передачи энергии от электронов к ионам  $t = (M/m) \cdot \tau$  много меньше времени пролета ускорительной камеры  $l/V \approx 10^5 - 3 \cdot 10^{-5}$  (s). Потому температура  $T_i$  ионов равна температуре электронов  $T$ , а ускорение, приобретаемое электронами под действием силы Ампера, передается ионам, т.е. плазма ускоряется как единое целое.

Время двукратной ионизации и время рекомбинации ионов He+ много больше времени пролета ускорительной камеры при  $n < 10^{24}$  ( $m^{-3}$ ), поэтому степень ионизации не меняется в процессе ускорения плазмы. Мы полагаем для простоты, что плазма, поступающая в ускоритель, однократно ионизована и степень ионизации  $\alpha \approx 1$ .

Температура электронов  $T$  определяется из уравнения

$$3n \cdot dT/dt = \langle j^2 \rangle / \sigma - W_R - q_c \cdot 2R_1 / (R_1^2 - R_0^2) - q_a \cdot 2R_0 / (R_1^2 - R_0^2), \tag{5}$$

где  $W_R$  — мощность излучения плазмы, последние два слагаемых в правой части — мощность, выделяемая на электродах (см. разд. 2), отнесенная к единице объема плазмы. Оценка на основе базы данных [10] показала, что  $W_R$  мало, в расчетах оно не учитывалось. Плотность тока  $j$  связана с током в электродах:

$$j(x, r) = -dI/dx \cdot (1/2\pi r), \tag{6}$$

а магнитное поле равно

$$B(x, r) = \frac{\mu_0}{4\pi} \int_{x_0}^l \frac{r I(x_1) dx_1}{((x - x_1)^2 + r^2)^{3/2}}. \tag{7}$$

Граничные условия

$$x = 0: \quad \rho(0) = \rho_0, \quad V(0) = V_0, \quad T = T_0, \tag{8}$$

$$x = l: \quad I(l) = 0, \quad V(l) = V, \tag{9}$$

где  $V_0$  — тепловая скорость, соответствующая начальной температуре плазмы  $T_0$ ,  $V$  — конечная скорость плазмы. Система уравнений (1)–(7) с условиями (8), (9) описывает ускорение плазмы. Для простоты все рассчитываемые величины усреднены по сечению ускорителя.

## 2. Капиллярно-пористые электроды

Для определения условий работы капиллярно-пористых электродов надо знать тепловую нагрузку на электроды. Определим потенциал плазмы по отношению к катоду  $U_c$ . В отсутствие эмиссии электронов с катода при  $T_i = T_e = T$ , т.е. при выполненном условии Бома, а также при  $j < env_i/4$  потенциал  $U_k$  определяется из баланса потоков зарядов, обеспечивающего ток  $j$ :

$$\frac{1}{4}env_i - \frac{1}{4}env_e \cdot \exp(-e \cdot U_c/T) = j,$$

где  $v_i = (2eT/M)^{1/2}$ ,  $v_e = (2eT/m)^{1/2}$ . Тогда потенциал  $U_c$  равен

$$U_c = \frac{T}{e} \ln \left( \frac{v_e}{v_i - 4j/en} \right).$$

Поток тепла на катод равен

$$q_c = (env_i/4) \cdot (U_c + (I_1 - \varphi) + 1.5T) + ((v_i - 4j/(e \cdot n))n/4) \cdot 1.5T, \quad (10)$$

где  $\varphi$  — работа выхода. В (10) учитывается энергия нейтрализации ионов. Отраженные и десорбированные атомы гелия нейтральны.

Потенциал плазмы относительно анода  $U_a$  устанавливается также из условия обеспечения тока с плотностью  $j$  на анод. На анод поток ионов пренебрежимо мал, а поток электронов при  $env_e/4 > j$  равен

$$j = \frac{1}{4}nv_e \cdot \exp(e - U_a/T).$$

Отсюда

$$U_a = \frac{T}{e} \ln \left( \frac{env_e}{4j} \right).$$

Поток тепла на анод

$$q_a = j \cdot (1.5 \cdot T + \varphi). \quad (11)$$

В качестве внешнего электрода предлагается брать катод, обоснование приведено в разд. 3.

Металл наполнителя в капиллярно-пористой системе (КПС) испаряется под действием тепловой нагрузки. Капиллярно-пористые электроды не деградируют, но их испарение приводит к потере металла наполнителя. Для эффективности ускорителя с капиллярно-пористыми электродами потеря массы материала наполнителя должна быть, по крайней мере, в  $\gamma = 10$  раз меньше потери массы гелия  $\frac{dm_{He}}{dt} = \rho(0) \cdot V(0) \cdot S$ , где  $S = \pi \cdot (R_1^2 - R_0^2)$ . Величина  $\gamma$  выбрана достаточно произвольно. Но температура поверхности и допустимая плотность мощности зависят от этой величины слабо (при изменении  $\gamma$  в 2 раза допустимая температура меняется менее чем на 10%, что видно из (12), (13)), поэтому этот выбор мало влияет на результат.

При отводе тепла от поверхности теплопроводностью температуру поверхности можно оценить как

$$T = T_c + q_{(c,a)}d/K,$$

где  $d$  — расстояние от поверхности электрода до „холодильника“ с температурой  $T_c$ , которая должна быть выше температуры плавления металла наполнителя и по которому отводится тепло,  $K$  — коэффициент теплопроводности. Скорость потери массы металла наполнителя КПС с единицы поверхности электрода равна

$$\frac{dm}{dt} = \rho_m s \cdot \exp(-H/T), \quad (12)$$

где  $\rho_m$  — плотность металла-наполнителя,  $s \cdot \exp(-H/T)$  — скорость движения границы поверхности в результате испарения,  $s = (3/4\pi)^{1/2} \cdot c$  — скорость звука,  $H$  — энергия испарения [11]. Полная скорость потери массы электрода равна интегралу выражения (12) по поверхности электрода и должна быть меньше  $\frac{1}{\gamma} \frac{dm_{He}}{dt}$ :

$$\frac{dM}{dt} = \int_0^L dm/dt \cdot 2\pi R_{0,1} dx. \quad (13)$$

Мы пренебрегаем влиянием испаренного металла на параметры плазмы, поскольку доля металлических ионов в плазме мала при выполнении условия (13).

В качестве металла наполнителя КПС в работе [12] были рассмотрены литий, галлий и олово. Галлий и олово имеют большую энергию испарения и более выгодны с точки зрения скорости испарения (табл. 1). Однако при высоких температурах они растворяют другие металлы. Наиболее стойкие W и Mo могут работать в контакте с Ga и Sn при температуре  $T < 600^\circ\text{C}$  [12], в то время как у Li предел совместимости составляет  $1200^\circ\text{C}$  для Mo и  $1500^\circ\text{C}$  для W. Поэтому для Ga и Sn ограничением использования является максимальная температура электродов и соответственно плотность мощности, рассчитываемая по формулам (10) и (11) (табл. 1).

**Таблица 1.** Сравнительные характеристики Li, Ga и Sn

Характеристики	${}^7_3\text{Li}$	${}^{70}_{31}\text{Ga}$	${}^{119}_{50}\text{Sn}$
$\rho, \text{kg/m}^3$	534	5900	7310
$T_m, \text{K}$	453	302	505
$H, \text{eV}$	1.48	2.73	2.98
Теплопроводность, W/(m·K)	47	27	32
$T_{\text{max}} \text{ совместимости}, ^\circ\text{C}$	1200 (Mo), 1500 (W)	600 Mo, W	600 Mo, W
$\langle q \rangle_{\text{max}}, \text{MW/m}^2$	1	1.5	1

**Таблица 2.** Значения скорости  $V$ , тяги  $F$ , расхода рабочего вещества (He), цены тяги, мощности ускорителя, энергетической эффективности  $\eta$  при разных значениях начальной плотности плазмы  $n$ , радиусов внутреннего ( $R_0$ ) и внешнего ( $R_1$ ) электродов, напряжения между электродами  $U$

$n, m^{-3}$	$0.3 \cdot 10^{21}$	$0.4 \cdot 10^{21}$	$0.4 \cdot 10^{21}$	$0.5 \cdot 10^{21}$	$0.5 \cdot 10^{21}$	$0.5 \cdot 10^{21}$	$1.0 \cdot 10^{21}$	ЭРД [4]
$R_0, cm$	2	2	3	2	2.5	3	2	
$R_1, cm$	10	9	10	9	8	7	8	
$U, V$	70	60	52	56	40	26	48	
$W, MW$	1.0	1.0	1.0	1.0	0.7	0.5	1.0	0.5
$V, km/s$	48	44	41	39	37	34	31	50
$F, N$	23	22	25	25	18	11	31	12
Цена тяги, kW/N	43	45	40	40	39	45	32	83
$dm_{He}/dt, g/s$	0.5	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3	1.0	0.1
$\eta$	0.50	0.51	0.50	0.50	0.46	0.40	0.47	0.6

В работе [13] показано, что даже при скорости испарения  $0.1 g/(cm^2 \cdot s)$  капиллярные силы успевают восстанавливать слой лития на поверхности. Капиллярные силы Sn и Ga также позволяют использовать их в качестве капиллярно-пористых электродов [12]. Так что все рассмотренные металлы Li, S и Ga можно использовать в качестве металла-наполнителя с пористыми матами из молибдена или вольфрама.

### 3. Результаты расчетов стационарного плазменного ускорителя

Система уравнений (1)–(7) граничными условиями (8) и (9) решалась численно при различных значениях плотности плазмы  $n$  и радиусах электродов  $R_0, R_1$ . Температура плазмы на входе в ускоритель была  $1.6 eV$ .

Падение напряжения в плазме  $U$  подбиралось так, чтобы удовлетворить следующим ограничениям:

- 1) полная мощность не более  $1 MW$  (были рассмотрены значения  $0.5, 0.7$  и  $1 MW$ ),
- 2) скорость потери массы металла наполнителя в  $\gamma$  раз меньше скорости потери массы He (см. (13)),
- 3) концентрация плазмы ограничена снизу ( $n > 3 \cdot 10^{20} m^{-3}$ ) условием  $\beta < 1$  (при  $\beta > 1$  проводимость плазмы убывает с ростом  $\beta$ ), ограничения сверху нет, но при росте концентрации падает скорость плазмы и энергетическая эффективность.

Длина ускорителя выбрана из следующих соображений. В средней части камеры ускорение практически отсутствует. Поэтому нерационально выбирать слишком большое  $\ell$ . При слишком малом  $\ell$  области ускорения вначале и в конце камеры перекрываются, и общее ускорение уменьшается. Наиболее оптимальная длина ускорителя  $\ell = 0.4 m$ .

Результаты расчетов приведены в табл. 2. Энергетическая эффективность двигателя  $\eta$  оценивалась как

$$\eta = W_u / (U_b \cdot I_b + W_i),$$

где  $W_u = \rho_0 \cdot V_0 \cdot SV^2(l)/2$  — полезная мощность;  $U_b$  — напряжение на батарее, оно складывается из напряжения  $U$ , определяющего ток в плазме, и разности напряжений в приэлектродных слоях;  $W_i$  — мощность, необходимая для начального нагрева и ионизации плазмы:

$W_i = (3T_0 + I) \cdot n_0 V_0 S$ , где  $T_0$  — начальная температура плазмы. Эта оценка  $\eta$  включает основные каналы расхода энергии, но не учитывает менее энергетически емкие каналы потребления энергии, такие, как поддержание необходимой температуры капиллярно-пористых электродов, подача гелия и прочее. Сравнение энергетической эффективности, рассчитанной нами, и  $\eta$  магнитоплазгодинамического двигателя [1] с таким же принципом ускорения плазмы, показывают, что неучтенные нами затраты энергии на обеспечение работы ускорителя не превышают нескольких процентов от полного расхода энергии. А затраты на поддержание необходимой температуры капиллярно-пористых электродов, хотя и зависят сильно от конструкции системы, но по опыту авторов работы [13] не превышают  $\sim 1 kW$ .

Приведем формулы для других важнейших характеристик двигателя.

Тяга

$$F = \rho_0 V_0 \cdot S \cdot V(l).$$

Расход рабочего вещества (He) составляет

$$dm_{He}/dt = \rho_0 V_0 \cdot S.$$

Отметим, что испарение Li растет при увеличении плотности тока  $j$  вследствие увеличения тепловой нагрузки на начальном и конечном участках ускорения,

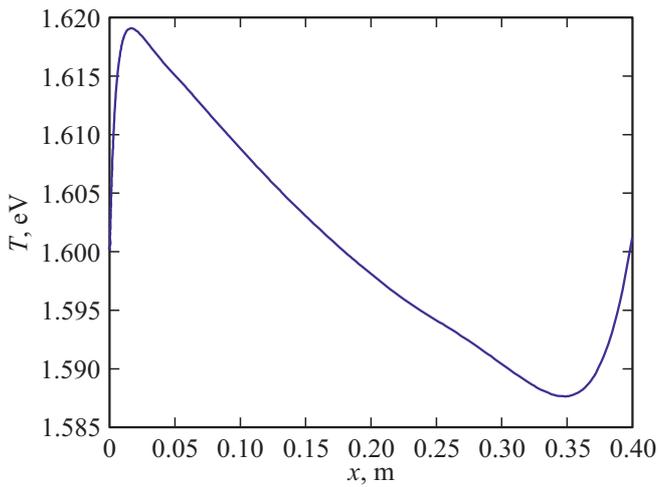


Рис. 3. Температура плазмы как функция расстояния от начала ускорения при  $R_0 = 2$  см,  $R_1 = 10$  см,  $n = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

На всем участке ускорения температура плазмы меняется в пределах  $\sim 3\%$ . Небольшой рост температуры (на 1.5%) происходит на участках наибольшего ускорения, в

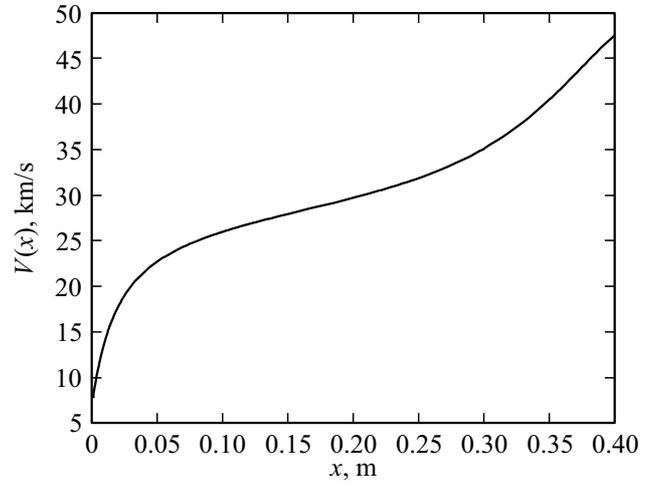


Рис. 5. Скорость плазмы как функция расстояния от начала ускорения при  $R_0 = 2$  см,  $R_1 = 10$  см,  $n = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

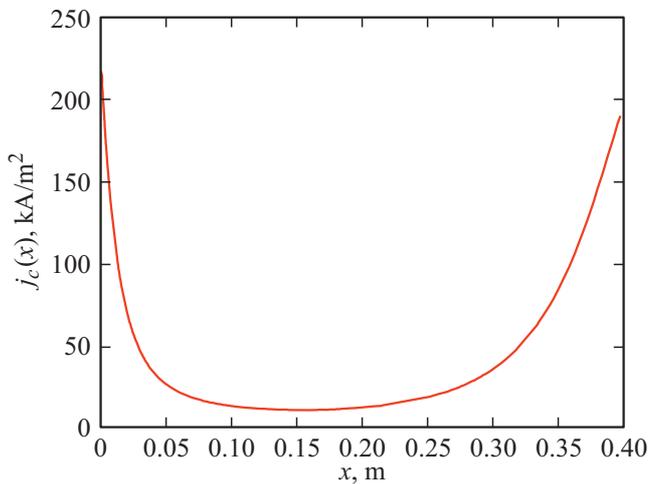


Рис. 4. Плотность тока на катод как функция расстояния  $x$  от начала ускорения при  $R_0 = 2$  см,  $R_1 = 10$  см,  $n = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

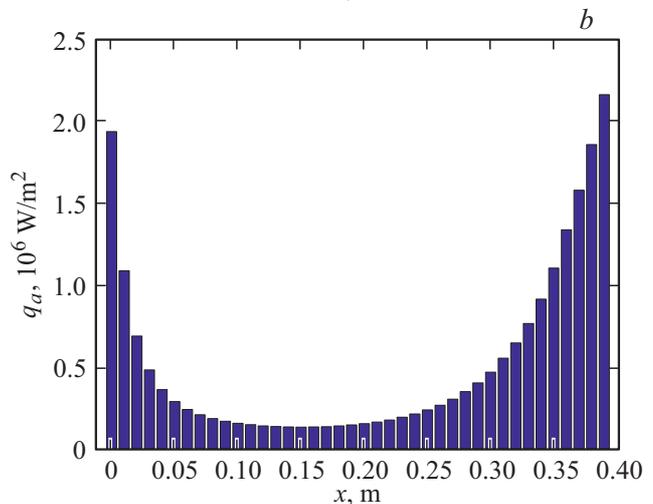
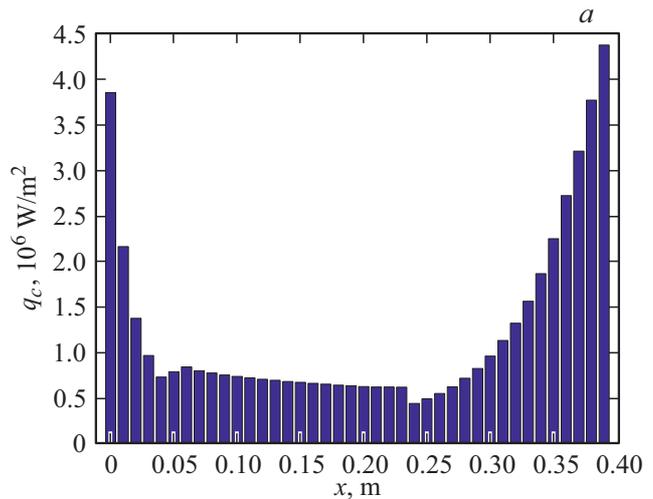


Рис. 6. Тепловая нагрузка на катод (а) и анод (b) при  $R_0 = 2$  см,  $R_1 = 10$  см,  $n = 3 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  в зависимости от  $x$ .

которые дают основной вклад в испарение Li. Ограниченные плотности тока означает ограничение скорости истечения плазмы  $V$ . Поэтому ограничение (13) означает ограничение скорости  $V$ . Также отметим, что энергетическая эффективность  $\eta$  растет с ростом мощности и при понижении плотности плазмы.

Зависимости температуры плазмы, плотности тока на катод и скорости от координаты приведены на рис. 3–5. Видно, что основную роль в ускорении плазмы играют начальный и конечный участки. По этой же причине электроды на этих участках испытывают наибольшую тепловую нагрузку (рис. 6). Также из рис. 6 видно, что тепловая нагрузка на катод значительно больше, чем на анод, даже если последний используется в качестве внутреннего электрода (с большей плотностью тока  $j$ ). Поэтому именно условия на катоде определяют допустимые режимы работы ускорителя с капиллярно-пористыми электродами.

начале и в конце ускорения, в средней части камеры ускорения происходит небольшое снижение  $T$  (на 3%) вследствие охлаждения на электродах.

Для уменьшения нагрузки на начальном участке ускорения можно предложить предварительное ускорение плазмы с меньшей напряженностью электрического поля. Для конечного участка ускорения можно предложить схему, допускающую  $I(l) \neq 0$ , т. е. дополнительное замыкание концов электродов.

Для сравнения в табл. 2 приведены параметры одного из наиболее продвинутых двигателей [4].

## Заключение

Рассчитаны режимы электродинамического плазменного двигателя для космических аппаратов с капиллярно-пористыми электродами, при которых такие электроды эффективны. Такие электроды возобновляемы и не деградируют, а срок их службы ограничен запасом металла-наполнителя капиллярно-пористого электрода. Однако для эффективности двигателя необходимо ограничение температуры электродов. В случае Ga и Sn в качестве металла-наполнителя ограничение температуры диктуется совместимостью этих металлов с металлами, из которых изготовлены маты (Mo и W). Допустимые режимы ускорителя с использованием капиллярно-пористых электродов позволяют при тяге  $F$  более 10 ньютонов иметь удельный импульс  $V$  десятки km/s.

## Благодарности

Авторы благодарны М.Н. Казееву за полезные обсуждения.

## Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

## Список литературы

- [1] A.S. Voronov, A.A. Troitskiy, I.D. Egorov, S.V. Samoilenkov, A.P. Vavilov. *J. Phys.: Conf. Series*, **1686**, 012023 (2020). DOI: 10.1088/1742-6596/1686/1/01202
- [2] И.А. Хмелевской, Д.А. Томилин. *ЖТФ*, **89** (9), 1360 (2019). DOI: 10.21883/JTF.2021.09.51213.31-21 [I.A. Khmelevskoi, D.A. Tomilin. *Tech. Phys.*, **64** (9), 1283 (2019). DOI: 10.1134/S1063784219090068]
- [3] I.V. Romadanov, A.I. Smolyakov, Y. Raitses, I. Kaganovich, T. Tian, S. Ryzhkov. *Phys. Plasmas*, **23** (12), 122111 (2016). DOI: 10.1063/1.4971816
- [4] В.П. Агеев, В.Г. Островский. *Известия АН. Энергетика*, **3**, 83 (2007).
- [5] S.N. Bathgate, M.M. Bilek., D.R. McKenzie. *Plasma Sci. Technol.*, **19** (8), 3001 (2017). DOI: 10.1088/2058-6272/aa71fe
- [6] М.В. Ковальчук, В.И. Ильгисонис, В.М. Кулыгин. *Природа*, **12**, 33 (2017).
- [7] В.А. Жильцов, В.М. Кулыгин. *ВАНТ, сер. термоядерный синтез*, **41** (3), 21 (2018).
- [8] В.И. Ильгисонис, Ю.В. Мартыненко. *Физика плазмы*, **45** (1), 63 (2019). DOI: 10.1134/S0367292119010062 [V.I. Ilgisonis, Yu.V. Martynenko. *Plasma Phys. Reports*, **45**, 57 (2019). DOI: 10.1134/s1063780x19010069]
- [9] Л.А. Арцимович, С.Ю. Лукьянов, И.М. Подгорный, С.А. Чуватин. *ЖЭТФ*, **33**, 3 (1958).
- [10] ADAC [http://open.adas.ac.uk/detail/adf11/plt42/plt42\\_ar.dat](http://open.adas.ac.uk/detail/adf11/plt42/plt42_ar.dat)
- [11] С.И. Анисимов, Я.А. Имас, Г.С. Романов. *Действие излучения большой мощности на металлы* (Наука, М., 1970), с. 100.
- [12] И.Е. Люблинский, А.В. Вертков, В.В. Семенов. *ВАНТ, сер. термоядерный синтез*, **38** (1), 7 (2015).
- [13] В.Б. Петров, Б.И. Хрипунов, В.В. Шапкин, Н.В. Антонов. *ВАНТ, сер. термоядерный синтез*, **4**, 23 (2004).