

ПЛАЗМЕННЫЙ РЕЛЬСОТРОН С КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫМИ
ЭЛЕКТРОДАМИ© 2021 г. Ю. В. Мартыненко^{a, b, *}, М. Ю. Нагель^{a, **}^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия^b Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*e-mail: martyn907@yandex.ru

**e-mail: mifst04nmy@mail.ru

Поступила в редакцию 07.11.2020 г.

После доработки 25.11.2020 г.

Принята к публикации 03.12.2020 г.

Предлагается схема двигателя для космических аппаратов на основе импульсного плазменного рельсотрона с капиллярно-пористыми электродами. Такие электроды возобновляемы и не деградируют, а срок их службы ограничен запасом металла наполнителя капиллярно-пористого электрода. Найдены режимы, при которых капиллярно пористые электроды эффективны. При этих режимах рассмотренная конструкция рельсотрона может дать тягу несколько ньютонов и удельный импульс десятки км/с. В качестве металла наполнителя капиллярно-пористых электродов могут быть использованы металлы Li, Sn и Ga с пористыми матами из молибдена или вольфрама.

Ключевые слова: плазменный двигатель, рельсотрон, капиллярно-пористые электроды

DOI: 10.31857/S0367292121040077

1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время разрабатываются мощные двигатели для межорбитальных и межпланетных полетов [1]. Важной характеристикой таких двигателей является долговечность. Одним из решений проблемы долговечности являются безэлектродные двигатели [2–4]. Другим решением этой проблемы может стать двигатель с возобновляемыми и не деградирующими электродами, например, капиллярно-пористые электроды для плазменных двигателей [5]. Капиллярно-пористый электрод состоит из корпуса с расплавом металла. Его сторона, обращенная к плазме, состоит из пористых матов, пропитанных жидким металлом, поступающим за счет поверхностного натяжения, при этом корпус соединен с резервной емкостью с расплавом металла. Такие электроды возобновляемы, их срок службы ограничен запасом металла, используемого для расплава. Использование капиллярно-пористых электродов возможно в различных типах плазменных двигателей. В работе [5] предлагался МГД-укоритель с капиллярно-пористыми электродами. В настоящей работе рассмотрено электродинамическое ускорение плазмы в рельсотроне, впервые предложенное в [6]. Изучен импульсный режим работы плазменного рельсотрона. Для получения максимума удельного импульса (скорости вылетающей плазмы) в качестве рабочего тела выбран гелий. Найдены режимы, при которых могут работать ка-

пиллярно-пористые электроды. Рассмотрен рельсотрон из двух параллельных электродов, называемых рельсами, подключенных к источнику тока. Возможен также аксиально-симметричный рельсотрон. Однако в импульсном режиме заполнение всего объема аксиально-симметричного пространства вряд ли реализуется, ускоряться будут ступки в виде столба плазмы. Здесь мы не останавливаемся на вопросе геометрии рельсотрона, а изучаем условия работы капиллярно-пористых электродов. В нашем случае рельсы капиллярно-пористые. Расстояние между рельсами равно h , длина – l . Не рекомендуется устанавливать боковые стенки для предотвращения утечек тока и эрозии дополнительных элементов. Возможна также система коаксиальных электродов. Ускоряемой массой является плазма, которая замыкает электрическую цепь и, находясь в магнитном поле рельсов, приобретает ускорение под действием силы Ампера. Сопротивление плазмы много больше сопротивления рельс.

2. ИМПУЛЬСНЫЙ РЕЖИМ ПЛАЗМЕННОГО
РЕЛЬСОТРОНА

Сила, ускоряющая плазму, равна [7]

$$F = \frac{LJ^2}{2}, \quad (1)$$

где L – индуктивность единицы длины рельсотрона, равная по порядку величины магнитной постоянной μ_0 , а точное выражение приведено, например, в [8]; J – ток. Скорость плазмы v определяется из уравнения

$$\frac{dv^2}{dx} = \frac{LJ^2}{M_p}, \quad (2)$$

где $M_p = \rho r^2 h$ – масса ускоряемой в импульсе порции плазмы, $\rho = Mn$ – массовая плотность плазмы, M – масса атомных частиц плазмы, n – число атомных частиц в единице объема плазмы, r – поперечный размер канала тока в плазме. Поскольку можно пренебречь сопротивлением рельса, то ток J определяется из обобщенного закона Ома для плазмы:

$$J(x) = \sigma r^2 (E - v(x)B(x)), \quad (3)$$

где σ – проводимость плазмы, $E = U/h$ – напряженность электрического поля между рельсами, U – разность потенциалов в плазме между рельсами. Для простоты полагалось $J = 0$ на конце электродов рельсотрона при $x = l$. В реальности происходит “вынос” тока за пределы рельсотрона на расстояние $\approx h$. Среднее значение магнитной индукции в контуре равно $B = LJ/h$ и, следовательно, уравнение (3) можно записать как

$$J = \frac{\sigma r^2 E}{1 + vL\sigma r^2/h}. \quad (4)$$

Проводимость плазмы при малом параметре Холла $\beta = \omega\tau \ll 1$ ($\omega = eB/m$ – циклотронная частота электрона, $\tau = (n\sigma_{ei}v_e)^{-1}$ и σ_{ei} – время и сечение столкновения электрона с ионами соответственно) равна

$$\sigma = \frac{e^2}{m\sigma_{ei}v_e}, \quad (5)$$

где e и m – заряд и масса электрона, v_e – тепловая скорость электронов. Как будет показано далее, нагрев плазмы быстро приводит к ее ионизации, так что можно не учитывать столкновения электронов с нейтральными атомами. Для оценок полагаем, что $\sigma \approx 400 \cdot T^{3/2} (\text{Ом} \cdot \text{м})^{-1}$ [5], где T – температура электронов в эВ, которая определяется из уравнения

$$\begin{aligned} \left(3\alpha_1 + (3T + I_1) \frac{\partial \alpha_1}{\partial T} \right) nr^2 h \frac{dT}{dt} = \\ = \frac{J^2 h}{\sigma r^2} - W_R - Q_c r^2 - Q_a r^2, \end{aligned} \quad (6)$$

α_1 и I_1 – степень и потенциал однократной ионизации соответственно, W_R – мощность излучения плазмы, последние два слагаемых в правой части –

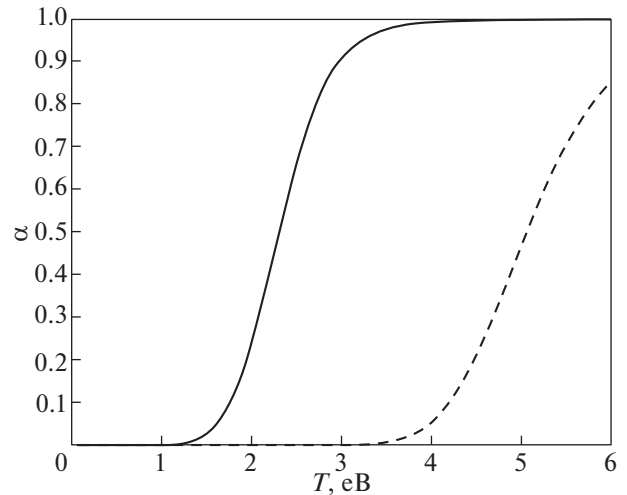


Рис. 1. Степени ионизации He при $n = 10^{23} \text{ м}^{-3}$. Сплошная кривая – α_1 , штриховая кривая – α_2 . Для He величина $I_1 = 24.5 \text{ эВ}$, $I_2 = 54.5 \text{ эВ}$.

мощность, выделяемая на электродах (см. (17), (20)). Оценки на основе базы данных [9] показали, что слагаемое W_R мало, в расчетах оно не учитывалось. Также в расчетах не учитывалась двукратная ионизация, подробнее это описано далее.

Время передачи энергии от электронов к ионам $t = (M/m)(n\sigma_{ei}v_e)^{-1}$ много меньше времени пролета ускорительной камеры $l/v \approx (1-3) \times 10^{-5} \text{ с}$. Потому температура T_i ионов равна температуре электронов T , то есть при омическом нагреве греются электроны и ионы.

Для расчета степеней ионизации α_i можно использовать формулу Саха, поскольку время рекомбинации плазмы $t = (\alpha n)^{-1} < (10^{-19} n)^{-1}$ (α – коэффициент рекомбинации) больше времени пролета ускорительной камеры при $n < 10^{24} \text{ м}^{-3}$. В приближении Саха

$$\begin{aligned} \alpha_i = -0.5(1 + C_i) + (0.25(1 + C_i)^2 + C_i)^{0.5}, \\ C_i = 1.16 \times 10^{27} T_{\text{эВ}}^{3/2} n^{-1} e^{-I_i/T}. \end{aligned} \quad (7)$$

На рис. 1 приведены функции $\alpha_1(T)$ и $\alpha_2(T)$ для гелия при $n = 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ ИМПУЛЬСНОГО ПЛАЗМЕННОГО РЕЛЬСОТРОНА

Все расчеты проведены для гелиевой плазмы. Система уравнений (2), (4), (6) решалась численно при различных значениях плотности плазмы n и размерах токового канала плазмы r , что позволяет оценить влияние поперечного размера и плотности плазменного столба на характеристи-

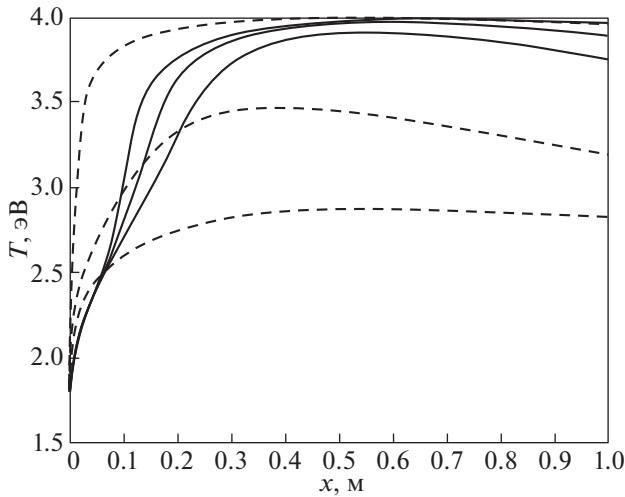


Рис. 2. Температура плазмы как функция расстояния x от начала ускорения. Сплошные кривые соответствуют значению $r = 5$ см, штриховые кривые — $r = 10$ см. В порядке убывания T значения плотности: $n = 3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $n = 6 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $n = 1.2 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

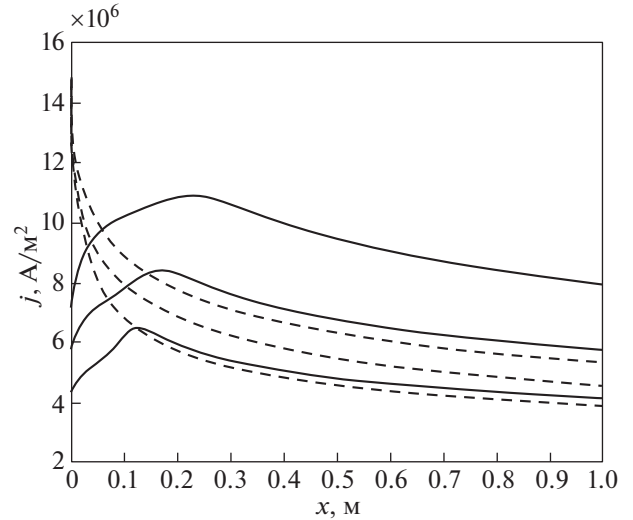


Рис. 3. Плотность тока в плазме как функция расстояния x от начала ускорения. Сплошные кривые соответствуют значению $r = 5$ см, штриховые кривые — $r = 10$ см. В порядке возрастания j значения плотности: $n = 3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $n = 6 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $n = 1.2 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

ки рельсотрона. Напряжение между рельсами выбиралось максимально возможным при отсутствии двукратной ионизации (то есть температура плазмы должна быть меньше ~ 4 эВ), негативно влияющей на испарение электродов (см. разд. 4), но не более 1.5 кВ; расстояние $h = 10$ см. Всюду, где не указаны единицы, используется система СИ. Результаты представлены на рис. 2–4. Из рис. 4 видно, что скорость v растет с увеличением x медленнее, чем $v \sim x^{1/2}$. Это показывает влияние второго члена справа в уравнении (3). По рис. 2–4 прослеживается следующая общая тенденция: при уменьшении плотности плазмы n увеличивается скорость, приобретаемая в рельсотроне. Это происходит не только вследствие уменьшения укоряемой массы, но и вследствие более быстрого нагрева плазмы, и как следствие, увеличения проводимости плазмы и тока в рельсотроне. Энергетическую эффективность рельсотрона η можно оценить как

$$\eta = \frac{\epsilon}{U_B q + \epsilon_H}. \quad (8)$$

Здесь $\epsilon = M_p v^2(l)/2$ — кинетическая энергия вылетающей плазмы; U_B — напряжение на батарее, оно складывается из напряжения U , определяющего ток в плазме, и разности напряжений в приэлектродных слоях (см. разд. 4); q — протекший за импульс заряд; ϵ_H — энергия, необходимая для начального разогрева и ионизации плазмы:

$\epsilon_H = (3T_0 + I_1)\alpha_1 n r^2 h$, где T_0 — начальная температура плазмы, которая подбиралась достаточной

для значительной ионизации (1.5–2 эВ). На рис. 5 дана зависимость коэффициента энергетической эффективности рельсотрона от r и n . При этом напряжение U подбиралось исходя из максимальной КПД, но так, чтобы не допустить двукратную ионизацию. Энергетическая эффективность

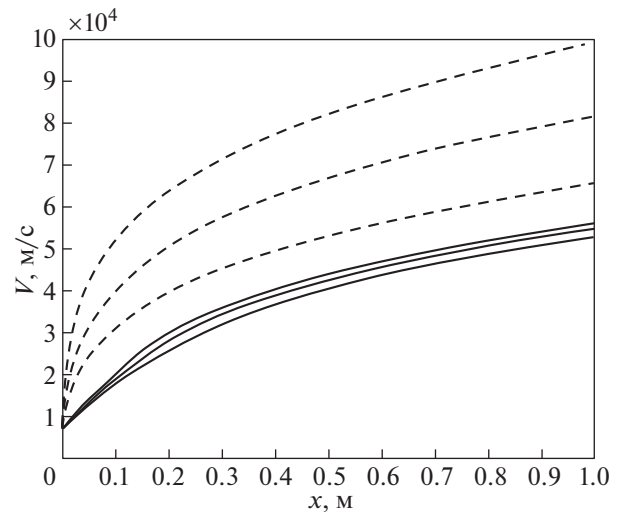


Рис. 4. Скорость плазмы как функция расстояния x от начала ускорения. Сплошные кривые соответствуют $r = 5$ см, штриховые кривые — $r = 10$ см. В порядке убывания v значения плотности: $n = 3 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $n = 6 \times 10^{22} \text{ м}^{-3}$, $n = 1.2 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$.

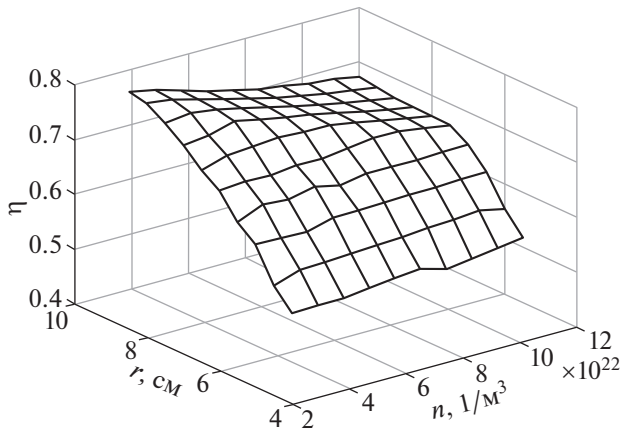


Рис. 5. Зависимость коэффициента энергетической эффективности рельсотрона от r и n .

убывает при увеличении n и уменьшении r . Однако практически во всех рассмотренных случаях величина η превосходит 50%.

На рис. 6 представлена зависимость скорости плазмы $v(x)$ при разных значениях напряженности электрического поля. Данные приведены для $r = 10$ см, $n = 1.2 \times 10^{23}$ м⁻³. С ростом скорости плазмы растет и энергетическая эффективность.

Приведем формулы для важнейших характеристик ускорителя:

длительность импульса

$$\tau = \int_0^l dx/v(x); \quad (9)$$

тяга в импульсе

$$F = M_p \frac{V}{\tau}; \quad (10)$$

полезная мощность в импульсе

$$W = \frac{M_p V^2}{2\tau}; \quad (11)$$

средняя мощность рельсотрона

$$\langle W \rangle = \frac{Wf\tau}{\eta}, \quad (12)$$

где f – частота следования импульсов;

средняя тяга

$$\langle F \rangle = M_p v f; \quad (13)$$

расход рабочего вещества (He)

$$\frac{dm_{\text{He}}}{dt} = M_p f. \quad (14)$$

В табл. 1 представлены параметры рельсотрона при различных исходных данных. Частота следования импульсов определялась максимально до-

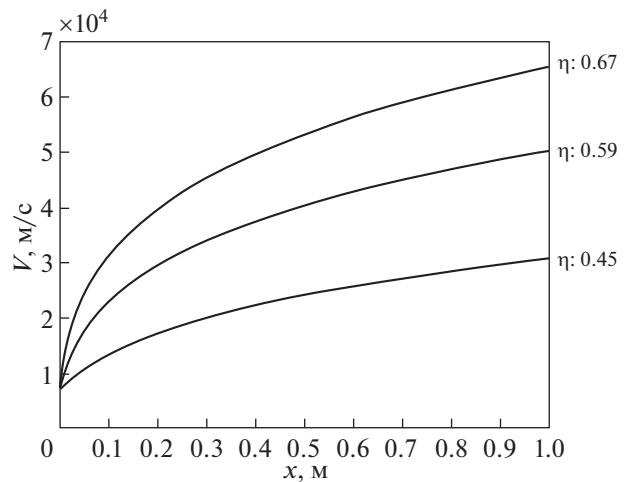


Рис. 6. Зависимость скорости $v(x)$ при разных значениях напряженности электрического поля E . В порядке возрастания v значения поля: $E = 5000$ В/м, 10000 В/м, 15000 В/м. Возле каждой кривой приведены значения энергетической эффективности. Длина ускоряющей части $l = 1$ м, $r = 10$ см, $n = 1.2 \times 10^{23}$ м⁻³.

пустимой тепловой нагрузкой на электроды (см. раздел “капиллярно-пористые электроды”).

4. КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫЕ ЭЛЕКТРОДЫ

Для определения условий работы КПС электродов надо знать тепловую нагрузку на электроды рельсов. Определим потенциал плазмы по отношению к катоду U_k . В отсутствие эмиссии электронов с катода, при $T_i = T_e = T$, то есть при выполненном условии Бома, а также при $j < en\alpha_1 v_i/4$, потенциал U_c определяется из баланса потоков зарядов, обеспечивающего ток j :

$$\frac{1}{4} en v_i \alpha_1 - \frac{1}{4} en v_e \alpha_1 e^{-eU_c/T} = j, \quad (15)$$

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

$$U_c = \frac{T}{e} \ln \left(\frac{v_e}{v_i - 4j/en\alpha_1} \right). \quad (16)$$

На катоде в импульсе выделяется энергия с плотностью мощности

$$Q_c = \frac{1}{4} en\alpha_1 v_i (U_c + I_1 - \phi) + \frac{1}{4} \left(v_i - 4 \frac{j}{en\alpha_1} \right) \frac{3}{2} T, \quad (17)$$

где ϕ – работа выхода. В (17) учитывается энергия нейтрализации ионов. Отраженные и десорбированные атомы гелия нейтральны. Потенциал плазмы относительно анода U_a устанавливается также из условия обеспечения тока j на анод. На

Таблица 1. Значения скорости v , энергетической эффективности η ; средняя тяга $\langle F \rangle$ и средняя мощность $\langle W \rangle$, а также расход гелия dm/dt при $l = 1$ м

$v, 10^5$ м/с	0.5	0.6	0.6	0.7	0.8	1.0
$n, \text{м}^{-3}$	1.2×10^{23}	6×10^{22}	3×10^{22}	1.2×10^{23}	6×10^{22}	3×10^{22}
$r, \text{см}$	5	5	5	10	10	10
$M_p, \text{мкг}$	200	100	50	800	400	200
$\langle W \rangle, \text{кВт}$	150	160	150	750	850	800
η	0.5	0.5	0.5	0.7	0.7	0.8
$f, \text{кГц}$	0.25	0.5	0.9	0.3	0.5	0.75
$\langle F \rangle, \text{Н}$	2.7	2.8	2.5	16	16	13
$dm/dt, \text{мг/с}$	50	50	45	240	200	150

Таблица 2. Сравнительные характеристики Li, Ga и Sn

	${}^7\text{Li}$	${}^{70}\text{Ga}$	${}^{119}\text{Sn}$
$\rho, \text{кг/м}^3$	534	5900	7310
$T_m, \text{К}$	453	302	505
$H, \text{эВ/атом}$	1.48	2.73	2.975
Теплопроводность, Вт/(м · К)	47	27	32
T_{max} совместимости, °С	1200 (Mo), 1500 (W)	600 Mo, W	600 Mo, W
$\langle Q \rangle_{\text{max}}, \text{МВт/м}^2$	1	1.5	1

анод поток ионов пренебрежимо мал, а поток электронов при $en\alpha_1 v_e/4 > j$ равен

$$j = \frac{1}{4} n\alpha_1 v_e e^{-eU_a/T}. \quad (18)$$

Отсюда

$$U_a = \frac{T}{e} \ln \left(\frac{en v_e \alpha_1}{4j} \right). \quad (19)$$

Поток энергии на анод в импульсе составляет

$$Q_a = j \left(\frac{3}{2} T + \phi \right). \quad (20)$$

Тепловая нагрузка на электроды приводит к испарению жидкого металла КПС. Хотя капиллярно-пористые электроды не деградируют, их испарение приводит к потере металла наполнителя КПС. Для эффективности ускорителя с капиллярно-пористыми электродами надо, чтобы потеря массы материала наполнителя была, по крайней мере, в $\gamma = 10$ раз меньше потери массы гелия $dm_{\text{He}}/dt = M_p f$. Величина γ выбрана достаточно произвольно. Но температура поверхности и допустимая плотность мощности зависят от этой величины слабо (логарифмически), поэтому этот выбор мало влияет на результат. Последовательность периодических импульсов приводит к нагреву электрода и установлению средней тем-

пературы электрода T . За время воздействия плазмы на стенку $\tau_1 \approx r/v$ температура стенки возрастает до $T + \Delta T \approx T + Q \frac{(\tau_1/\chi)^{1/2}}{\rho C}$ (C – теплоемкость

лития, χ – его температуропроводность). При рассматриваемых плотностях мощности величина $\Delta T \approx 100$ К, и скорость испарения u возрастает в несколько раз. Однако температура поднимается всего на время $\approx r/v$, что на два порядка меньше периода следования импульсов, и учет подъема температуры во время импульса дает поправку несколько процентов для общей массы испаренного вещества. Поэтому можно рассматривать скорость испарения при средней мощности, выделяемой на поверхности электрода $\langle Q_{c/a} \rangle = Q_{c/a} r f / v(x)$. При отводе тепла от поверхности теплопроводностью, температуру поверхности можно оценить как

$$T = T_{\text{cool}} + \langle Q_{c/a} \rangle \frac{d}{K}, \quad (21)$$

где d – расстояние от поверхности электрода до “холодильника” с температурой T_{cool} , которая должна быть выше температуры плавления металла наполнителя, по которому отводится тепло, K – коэффициент теплопроводности. Скорость

потери массы металла наполнителя КПС с единицы поверхности электрода равна

$$\frac{dm}{dt} = \rho_m s e^{-H/T}, \tag{22}$$

ρ_m – плотность металла наполнителя, $s e^{-H/T}$ – скорость движения границы поверхности в результате испарения, $s = (3/4\pi)^{1/3} c$, c – скорость звука, H – энергия испарения [10]. Полная скорость потери массы электрода равна интегралу выражения (22) по поверхности электрода и должна быть меньше $0.1 dm_{He}/dt$:

$$\frac{dM}{dt} = \int_0^L \frac{dm}{dt} r dx < 0.1 \frac{dm_{He}}{dt}. \tag{23}$$

На основе условия (23) выбирается частота следования импульсов при использовании лития как наполнителя КПС, см. табл. 1. Отметим также, что, поскольку основное испарение происходит со всей поверхности электродов, то доля испаренного металла, попадающего в плазменную перемычку, мала. Соответственно не учитывалось влияние испаренного металла на параметры плазмы.

В качестве металла наполнителя КПС в работе [10] были рассмотрены литий, галлий и олово. Галлий и олово имеют большую энергию испарения H и более выгодны с точки зрения скорости испарения, см. табл. 2. Однако при высоких температурах они растворяют другие металлы. Наиболее стойкие W и Mo могут работать в контакте с Ga и Sn при температуре $T < 600^\circ\text{C}$ [11], в то время как у Li предел совместимости составляет 1200°C для Mo и 1500°C для W. Поэтому для Ga и Sn ограничением использования является максимальная температура электродов и, соответственно, плотность мощности, рассчитываемая по формуле (21), см. табл. 2. На рис. 7 приведены тепловые нагрузки (в импульсе) на электроды и температура катода (Li) для случая $r = 10$ см, $n = 1.2 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$, в зависимости от x . Видно, что наиболее нагружена начальная часть рельсотрона, где малая скорость и большая плотность тока, а следовательно, и плотность потока мощности $\langle Q \rangle$. Температура катода в начале рельсотрона не должна превышать допустимую температуру для Ga и Sn, а начальный участок рельсотрона дает основной вклад в интеграл (23) и определяет предельную $\langle Q \rangle$ для Li.

Смягчение нагрузки на начальном участке ускорения плазмы позволит увеличить частоту f и существенно увеличить тягу. Решением этой проблемы может быть предварительное ускорение плазмы с меньшей напряженностью электрического поля.

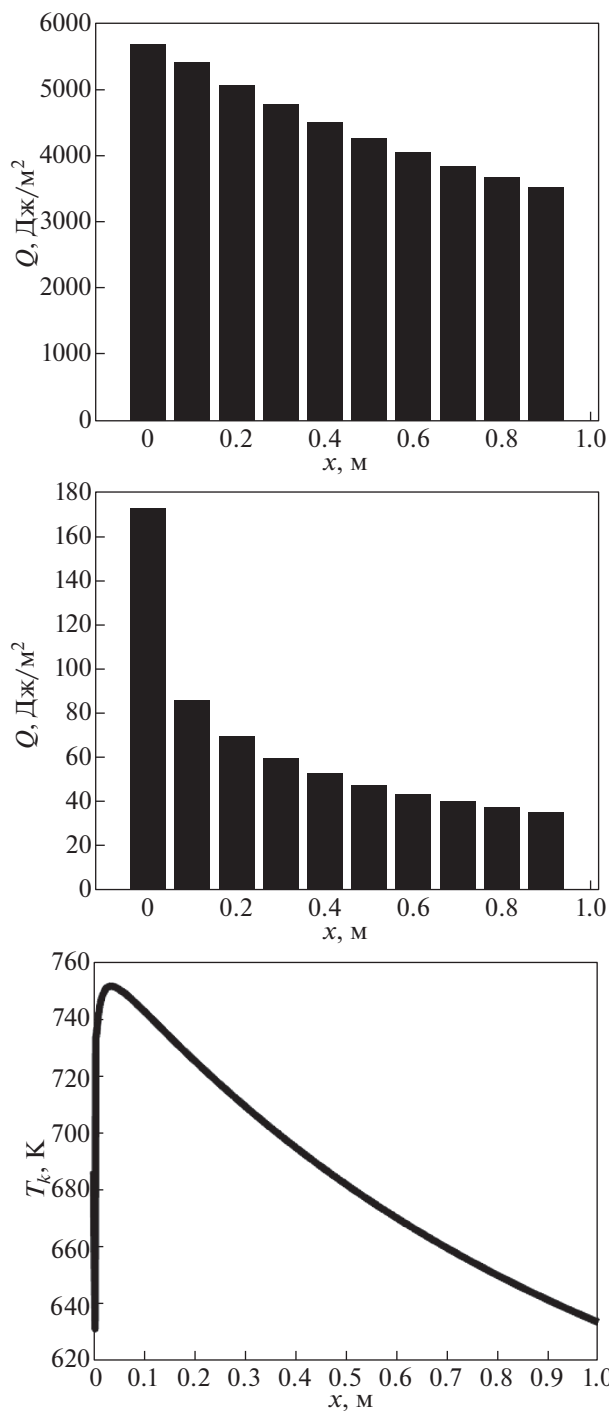


Рис. 7. Тепловая нагрузка в импульсе на катод (рисунок а), анод (б) и температура литиевого катода (в) при $r = 10$ см и $n = 1.2 \times 10^{23} \text{ м}^{-3}$ в зависимости от x .

В работе [12] показано, что даже при скорости испарения $0.1 \text{ г}/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$ капиллярные силы успевают восстанавливать слой лития на поверхности. Капиллярные силы Sn и Ga также позволяют использовать их в качестве капиллярно-пористых

электродов [9]. Так что все рассмотренные металлы: Li, Sn и Ga, — можно использовать в качестве металла наполнителя с пористыми матами из молибдена или вольфрама.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Предложена схема двигателя для космических аппаратов на основе импульсного плазменного рельсотрона с капиллярно-пористыми электродами. Такие электроды возобновляемы и не деградируют, а их срок службы ограничен запасом металла наполнителя капиллярно-пористого электрода. Допустимые режимы импульсного плазменного рельсотрона с использованием капиллярно-пористых электродов позволяют при тяге F несколько ньютонов иметь удельный импульс v десятки км/с. Анализ условий работы капиллярно-пористых электродов показал, что металлы Li, Sn и Ga могут быть использованы в качестве металла наполнителя с пористыми матами из молибдена или вольфрама.

Авторы благодарны М.Н. Казееву за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агеев В.П., Островский В.Г. // Изв. РАН. Энергетика. 2007. № 3. С. 83.
2. Bathgate S.N., Bilek M.M., McKenzie D.R. // Plasma Sci. Technol. 2017. V. 19. 083001.
3. Ковальчук М.В., Ильгисонис В.И., Кулыгин В.М. // Природа. 2017. № 12. С. 33.
4. Жильцов В.А., Кулыгин В.М. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2018. Т. 41. Вып. 3. С. 21.
5. Ильгисонис В.И., Мартыненко Ю.В. // Физика плазмы. 2019. Т. 45 (1). С. 63.
6. Арцимович Л.А., Лукьянов С.Ю., Подгорный И.М., Чуватин С.А. // ЖЭТФ. 1958. Т. 33. С. 3.
7. Носов В.Г. // Известия Томского политехнического университета. 2007. Т. 310. № 2. С. 70.
8. Калантаров П.Л., Цейтлин Л.А. Расчет индуктивностей. Л.: Энергоатомиздат, 1986.
9. ADAS
http://open.adas.ac.uk/detail/adf11/plt42/plt42_ar.dat
10. Анисимов С.И., Имас Я.А., Романов Г.С. Действие излучения большой мощности на металлы. М.: Наука, 1970.
11. Люблинский И.Е., Вертков А.В., Семенов В.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2015. Т. 38. Вып. 1. С. 7.
12. Петров В.Б., Хрипунов Б.И., Шапкин В.В., Антонов Н.В. // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2004. № 4. С. 23.