

03;04

## Влияние расхода криптона через ускорительный канал стационарного плазменного двигателя Морозова на его тяговую эффективность

© В.П. Ким, Д.В. Меркурьев, П.Г. Смирнов, Е.А. Шилов

Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики Московского авиационного института (Национального исследовательского университета)  
E-mail: riame4@sokol.ru

Поступило в Редакцию 2 марта 2017 г.

Стационарные плазменные двигатели (СПД) Морозова успешно используются в космической технике уже многие годы и работают на ксеноне. Вместе с тем с учетом дороговизны ксенона в настоящее время проявляется повышенный интерес к альтернативным рабочим веществам. Одним из них является криптон. Поэтому ранее проводились исследования особенностей работы и характеристик СПД на криптоне, которые показали, что они имеют традиционный для СПД вид. Здесь рассматриваются результаты исследования влияния расхода криптона на тяговую эффективность СПД. Важность полученных результатов определяется тем, что они определяют целесообразные диапазоны рабочих режимов СПД на криптоне.

DOI: 10.21883/PJTF.2017.23.45272.16758

Стационарный плазменный двигатель (СПД) представляет собой плазменный ускоритель, в котором поток газообразного или парообразного рабочего вещества (РВ) движется в ускорительном канале, и его атомы (или молекулы) ионизируются и ускоряются в электрическом разряде, горящем в скрещенных электрическом и магнитном полях (см., например, [1]). Тяговая эффективность двигателя тем выше, чем выше степень переработки потока атомов РВ в ионы, или так называемый коэффициент его использования  $\eta_m$ . В свою очередь величина  $\eta_m$  будет тем больше, чем больше отношение протяженности  $L$  слоя ионизации и ускорения (СИУ) к длине  $\lambda_i = V_a / \langle \sigma_i V_e \rangle n_e$  свободного пробега атомов до их ионизации [2,3] ( $V_a$ ,  $\langle \sigma_i V_e \rangle$ ,  $n_e$  — соответственно скорость

атомов, коэффициент скорости ионизации, осредненный по функции распределения электронов по скоростям, и концентрация электронов). Концентрация электронов в первом приближении пропорциональна массовому расходу  $\dot{m}_a$  РВ через ускорительный канал. Для того чтобы получить достаточно высокие значения  $\eta_m$  и тягового коэффициента полезного действия (КПД), величина плотности расхода должна превышать минимальную величину  $\dot{m}_{a \min}$ , которая может быть записана в следующем виде [2]:

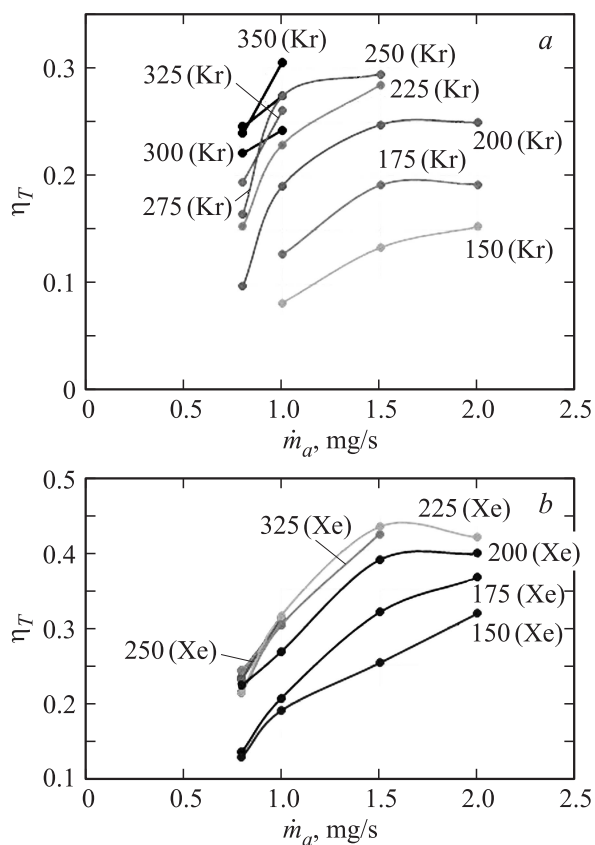
$$\frac{\dot{m}_{a \min}}{S_{ch}} \geq \frac{V_i V_a}{\langle \sigma_i V_e \rangle L} \approx C \frac{\sqrt{k T_a e \Delta U_i}}{\langle \sigma_i V_e \rangle L}, \quad (1)$$

где  $S_{ch}$ ,  $V_i$ ,  $k T_a$ ,  $\Delta U_i$ ,  $e$ ,  $C$  — соответственно площадь поперечного сечения ускорительного канала, скорость ионов, температура атомов в энергетических единицах, падение напряжения в зоне ионизации, заряд электрона и константа, не зависящая от рода РВ.

Из этого выражения следует, что при одинаковых падениях напряжения  $\Delta U_i$  и  $L$  основное различие значений плотностей расхода будет определяться различиями значений  $\langle \sigma_i V_e \rangle$ , которые при сопоставимых и типовых величинах температуры (энергии) электронов в случае криптона в 1.5–2 раза меньше [4]. Имеющиеся экспериментальные данные свидетельствуют о том, что при сопоставимых плотностях расхода и разрядных напряжениях толщина СИУ, в котором реализуется основное падение потенциала, изменяется незначительно [3]. Более сложно учесть изменение  $\langle \sigma_i V_e \rangle$ , поскольку распределения температур электронов в СИУ значительно отличаются как по величине, так и по характеру их изменения по длине канала [3].

В настоящей работе, как и в [5,6], осуществлялось прямое определение значений тягового КПД  $\eta_T$  путем измерения реактивной тяги  $F$  двигателя, расхода  $\dot{m}_a$  РВ, разрядного тока  $I_d$  и разрядного напряжения  $U_d$ , определяющих мощность разряда  $N_d = U_d I_d$ . В качестве полезной мощности при этом принималась величина, рассчитанная по среднемассовой скорости истечения  $w$  частиц РВ из двигателя, определявшейся по реактивной тяге двигателя  $F = \dot{m}_a w$ , а именно

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_a w^2}{2N_d} = \frac{F^2}{2\dot{m}_a N_d}. \quad (2)$$



Зависимости тягового КПД  $\eta_T$  моделей СПД-40 (a, b), СПД-100 (c, d) и СПД-140 (e, f) от расхода  $\dot{m}_a$  криптона и ксенона. Указаны соответствующие разрядные напряжения (в В) и РВ.

Для сравнения полученных данных с известными данными при работе СПД на ксеноне в настоящей работе определялись характеристики лабораторных моделей СПД разного масштаба при их работе на криптона и ксеноне в вакуумной камере диаметром 2 м и длиной до 3.5 м, откачиваемой безмасляными форвакуумными и криогенными высоковакуумными насосами. Давление в вакуумной камере при работе

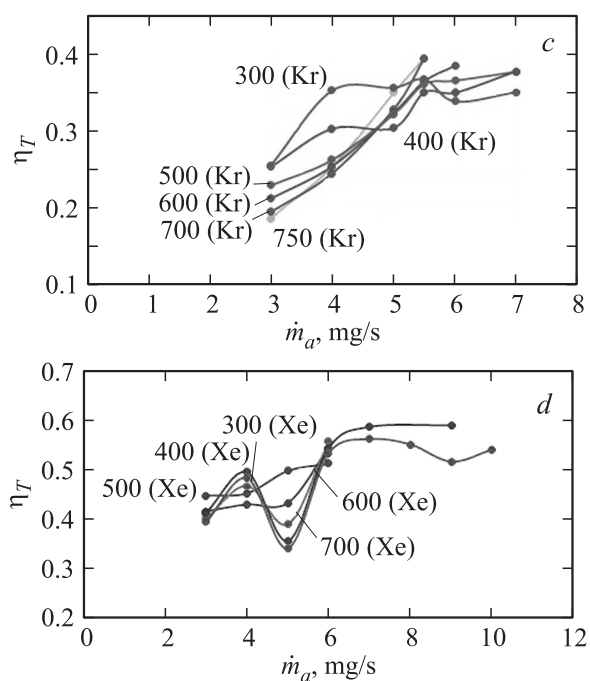


Рисунок (продолжение).

различных моделей с разным расходом не превышало  $1 \cdot 10^{-4}$  mm Hg, что является приемлемым для достаточно точного определения параметров двигателя. Экспериментальная установка для исследования характеристик СПД была оснащена средствами измерения всех параметров, входящих в формулу (2) для расчета тягового КПД. В разных сериях экспериментов были исследованы характеристики лабораторных моделей типа СПД-40 „классической“ схемы, а также моделей СПД-100 и СПД-140 с вынесенной зоной ускорения [7]. Наружные диаметры ускорительного канала в указанных моделях составляли соответственно 40, 100, 140 mm, а ширина ускорительного канала — 8, 11 и 16 mm. В этих моделях выходные части ускорительного канала были выполнены с коническими расширениями. Так что площади выходных сечений

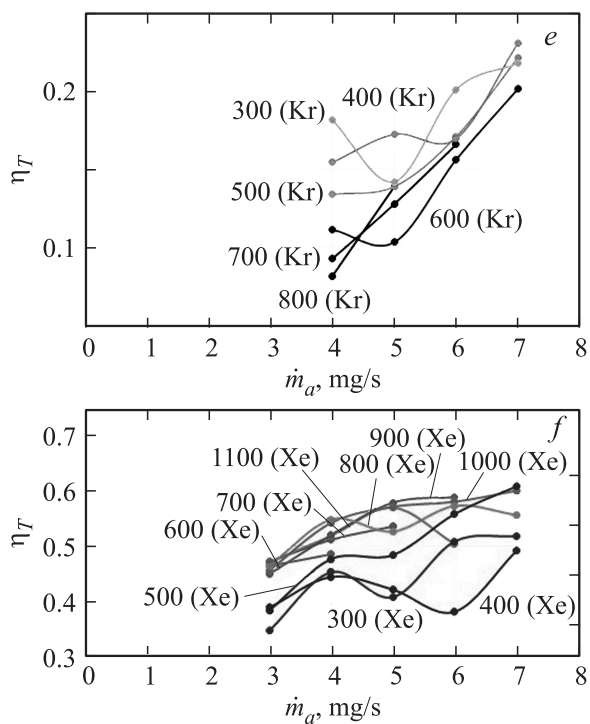


Рисунок (продолжение).

каналов этих моделей составляли около 10, 55 и 80  $\text{cm}^2$  соответственно, при этом наибольшая степень расширения была реализована в модели СПД-100.

Проведенные исследования показали, что значения тягового КПД двигателя при работе на криптоне, как и ожидалось, возрастают с увеличением расхода  $\dot{m}_a$  и уменьшаются с уменьшением разрядного напряжения быстрее, чем на ксеноне, вероятнее всего вследствие более резкого уменьшения температуры электронов и коэффициента скорости ионизации (см. рисунок). Поэтому далее сравнивались значения, полученные при разрядных напряжениях 200–300 В. При этом высокие значения тягового КПД модели СПД-40 (см. рисунок, а, б) при

указанных разрядных напряжениях достигаются как на криптоне, так и на ксеноне при расходе около 1.0–1.5 mg/s. Для моделей большего размера зависимости тягового КПД от расхода имеют более сложный характер. Тем не менее для модели СПД-100 (см. рисунок, *c, d*) граничные значения расхода как на криптоне, так и на ксеноне можно принять равными 6 mg/s, а для модели СПД-140 (см. рисунок, *e, f*) в качестве граничных при работе на криптоне и ксеноне можно принять значения более 7 mg/s. Совокупность приведенных данных свидетельствует о том, что граничные значения расхода ксенона и криптона, выше которых достигаются повышенные величины тягового КПД, оказались очень близкими, хотя, как уже отмечалось, уровень значений коэффициента скорости ионизации  $\langle \sigma; V_e \rangle$  криптона значительно ниже. Поэтому, согласно соотношению (1), должны были получаться более высокие граничные значения плотности расхода. Полученный результат может быть объяснен тем, что уменьшение значений коэффициента скорости ионизации при работе на криптоне компенсируется расширением зоны с повышенными значениями электронной температуры, установленным в работе [3], и соответствующим увеличением протяженности зоны ионизации. Важно также отметить, что минимальные значения плотности расхода РВ, рассчитанные по площади выходного сечения всех моделей, оказались примерно на одном уровне: порядка  $0.1 \text{ mg/s} \cdot \text{cm}^2$ , несмотря на разницу размеров и конструктивных схем моделей. Поэтому данные значения плотности расхода можно использовать при выборе значений массового расхода в новых моделях СПД на криптоне и ксеноне.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 16-19-10429).

## Список литературы

- [1] Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П., Ким В., Попов Г.А., Обухов В.А. и др. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 277–292.
- [2] Kim V., Kozlov V., Popov G. et al. // 27th IEP. Pasadena, 2001. Paper IEP-01-065.
- [3] Kim V., Kozlov V., Skrylnikov A. et al. // 38th JPC. Indianapolis, USA, 2012. Paper AIAA 2002-4108.

- [4] *Морозов А.И., Меликов И.В.* // ЖТФ. 1974. Т. 44. В. 3. С. 544–549.
- [5] *Dussi C., Andreussi T., Arkhipov A., Passaro A., Andrenucci M., Bulit A., Edwards C.* // Proc. of the 30th Int. Symp. on space technology and science, 34th Int. Electric Propulsion Conf. and 6th Nano-satellite Symp. Kobe, Hyogo, Japan, 2015. Paper IERC-2015-126/ISTS-2015-b-126.
- [6] *Жасан В.С., Ким В.П., Меркурьев Д.В., Мурашко В.М., Нестеренко А.Н., Попов Г.А., Потапенко М.Ю., Смирнов П.Г., Шилов Е.А.* // Изв. РАН. Энергетика. 2016. № 2. С. 66–79.
- [7] *Ким В.П.* // ЖТФ. 2015. Т. 85. В. 3. С. 45–59.