

О ВЛИЯНИИ РАСХОДА КСЕНОНА И КРИПТОНА ЧЕРЕЗ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ НА ТЯГОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СТАЦИОНАРНЫХ ПЛАЗМЕННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МОРОЗОВА

© 2019 г. В. П. Ким^{а, *}, В. С. Захарченко^а, Д. В. Меркурьев^а, П. Г. Смирнов^а, Е. А. Шилов^а

^аНациональный исследовательский университет “Московский авиационный институт”,
Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики, Москва, Россия

*e-mail: riame4@sokol.ru

Поступила в редакцию 17.04.2018 г.

После доработки 20.06.2018 г.

Принята в печать 28.06.2018 г.

Стационарные плазменные двигатели 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. В ряде работ проводились исследования особенностей работы и характеристик СПД на криптоне, который более чем на порядок дешевле ксенона и производится в достаточно больших объемах. Эти исследования показали, что в случае криптона характеристики имеют традиционный для СПД вид. Вместе с тем тяговая эффективность двигателя на криптоне на типичных для СПД режимах работы значительно ниже, чем при работе на ксеноне. Одной из основных причин такого снижения тяговой эффективности является недостаточно высокая эффективность переработки потока атомов криптона в ионы, которая зависит от многих факторов. Среди них важнейший – плотность расхода криптона в ускорительном канале, определяющая концентрацию плазмы в разряде. Достаточного полного изучения влияния этого параметра на работу и характеристики СПД на криптоне до сих пор не было проделано, большинство исследований проведено на одной модели и в ограниченном диапазоне расходов рабочего вещества. В предлагаемой работе приводятся результаты сравнительного исследования влияния расхода ксенона и криптона на характеристики СПД разного масштаба в расширенном диапазоне расходов рабочего вещества. Полученные результаты дали сведения о физических особенностях работы СПД на криптоне при его разных расходах через ускорительный канал двигателя и при разных геометриях выходной части ускорительного канала. Они должны быть полезны для разработки перспективных двигателей на криптоне.

DOI: 10.1134/S0367292119010086

1. ВВЕДЕНИЕ

Стационарный плазменный двигатель (СПД) представляет собой плазменный ускоритель ионов, в котором поток газообразного или парообразного рабочего вещества (РВ) движется в открытом на выходе кольцевом ускорительном канале, образованном диэлектрическими (керамическими) стенками, см. [1]. Атомы (или молекулы) РВ ионизируются в разряде, горящем в канале с преимущественно продольным электрическим и преимущественно радиальным магнитным (скрещенными) полями. Образовавшиеся ионы ускоряются в электрическом поле, созданном в плазме разряда приложением разрядного напряжения между анодом, расположенным внутри канала, и полым катодом, расположенным вне канала.

Спецификой современных СПД является то, что основная ионизация частиц РВ и ускорение

образовавшихся ионов происходят в слое ионизации и ускорения (СИУ), имеющем значительно меньший продольный размер L (толщину) по сравнению с длиной ускорительного канала [2]. Одно из основных условий получения высокой эффективности двигателей с замкнутым дрейфом электронов, к которым относится СПД, известно давно [3]. Оно сводится к тому, что массовый расход РВ через ускорительный канал должен обеспечивать концентрацию плазмы, при которой длина свободного пробега атомов до их ионизации $\lambda_i = V_a / \langle \sigma_i V_e \rangle n_e$ (где $\langle \sigma_i V_e \rangle$ – усредненный по функции распределения электронов по скоростям коэффициент скорости ионизации, n_e – концентрация электронов) должна быть существенно меньше L , что обеспечивает высокую степень переработки потока атомов в ионы.

Применительно к работе СПД влияние свойств рабочих веществ и концентрации плазмы

было теоретически рассмотрено А.И. Морозовым и И.В. Меликовым в [4]. Показано, что условия получения высокой эффективности ионизации для разных РВ могут выполняться при существенно различающихся концентрациях плазмы в ускорительном канале, которые можно задавать расходом РВ через ускорительный канал. Это естественно объясняется значительным различием свойств разных рабочих веществ. Однако, в силу сложности и недостаточной изученности процессов в двигателе, не удавалось получить соотношения, позволяющие с приемлемой для практики точностью рассчитывать граничные значения расхода РВ, выше которых обеспечивается высокая степень переработки потока атомов в ионы в двигателях разного масштаба. Кроме того, было неясно, каковы реальные возможности увеличения коэффициента использования РВ увеличением его расхода. Поэтому оправданным является дальнейшее экспериментальное исследование влияния расхода на работу и характеристики двигателей на новых РВ, в том числе и на криптоне. С учетом изложенного авторы провели изучение характеристик СПД разных размеров при их работе на ксеноне и криптоне, и некоторые из результатов были кратко изложены в [5]. В настоящей статье эти результаты, а также новые данные полученные в последнее время, представлены более полно, проводится их обсуждение.

2. СОСТОЯНИЕ СРАВНИТЕЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РАБОТЫ И ХАРАКТЕРИСТИК СПД НА КРИПТОНЕ И КСЕНОНЕ

Как отмечалось выше, к настоящему времени проведено значительное число исследований СПД на различных РВ, в том числе и ряд сравнительных исследований работы и характеристик СПД на ксеноне и криптоне. Цель проведения сравнительных исследований состояла в том, чтобы использовать накопленные при работе на ксеноне данные для анализа характеристик двигателя при переходе на новое РВ, каким является криптон. Ниже будут рассмотрены наиболее интересные результаты тех исследований, которые имеют отношение к теме данной работы и позволяют лучше понять ее результаты.

Среди параметров, характеризующих эффективность работы СПД, важнейшим является тяговый коэффициент полезного действия. Величина тягового к.п.д. СПД определяется многими факторами, для выявления влияния которых полезно его выражение, которое без учета многозарядных ионов, расхода РВ через катод и затрат на создание магнитного поля можно представить в виде [2, 6]

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_a \langle V_{iz} \rangle^2}{2N_d} \approx \frac{I_i}{I_d} \eta_m \eta_\beta \eta_V \eta_e. \quad (1)$$

Стоящие в правой части (1) коэффициенты $\eta_m = \dot{m}_i / \dot{m}_a$, $\eta_\beta = \frac{\langle V_{iz} \rangle^2}{\langle V_i \rangle^2}$, $\eta_V = \frac{\langle V_i \rangle^2}{\langle V_i^2 \rangle}$, $\eta_e = \frac{\langle \epsilon_i \rangle}{e U_d}$ отражают влияние на величину тягового к.п.д. неполноты переработки потока атомов с массовым расходом $\dot{m}_a$ в ионы с массовым расходом $\dot{m}_i$, угловой расходимости струи, разброса ионов по скоростям и неполноты использования разрядного напряжения на ускорение ионов. Величины $\langle V_{iz} \rangle$, $\langle V_i \rangle$, $\langle V_i^2 \rangle^{1/2}$, U_d , I_d , N_d , e , $\langle \epsilon_i \rangle$ суть соответственно, среднемассовое значение продольной составляющей скорости ионов, среднее значение скорости ионов, среднеквадратичная скорость ионов, разрядное напряжение, разрядный ток, разрядная мощность ($N_d = I_d U_d$), заряд электрона и среднее значение энергии истекающих из двигателя ионов.

Определить достаточно точно коэффициенты, входящие в выражение (1), сложно. Наиболее простыми являются измерения тока ионов, истекающих из двигателя, и их энергетических характеристик. Эти измерения обычно проводят с использованием электростатических зондов и энергоанализаторов, размещенных в струе двигателя и перемещаемых в ней. Они позволяют определить пространственные распределения плотности тока ускоренных ионов по углу отклонения направлений их движения от оси двигателя и интегрированием этого распределения получать оценку полного тока ионов [7, 8]. Можно также определить распределения ионов, движущихся в разных направлениях, по энергии, среднее значение скорости ионов и ее продольной составляющей, рассчитать разброс ионов по скоростям и оценить его влияние на величину тягового к.п.д. [7, 8]. Для измерения потоков многозарядных ионов используют более сложные устройства [9].

Измерения полного тока I_i ионов, истекающих из двигателя, и доли многозарядных ионов позволяют получить оценку коэффициента использования РВ. Кроме того, эти измерения позволяют оценить и долю “сквозного” тока электронов, падающих из катода в разряд, поскольку

$$\frac{I_i}{I_d} = \frac{I_d - I_e}{I_d} = 1 - \frac{I_e}{I_d} = 1 - \xi_e, \quad (2)$$

где I_e , ξ_e — величина и доля в разрядном токе “сквозного” электронного тока.

Погрешность измерения суммарного тока ионов может в лучшем случае составлять около 10%, а погрешность измерения доли и токов многозарядных ионов может быть еще выше. Кроме

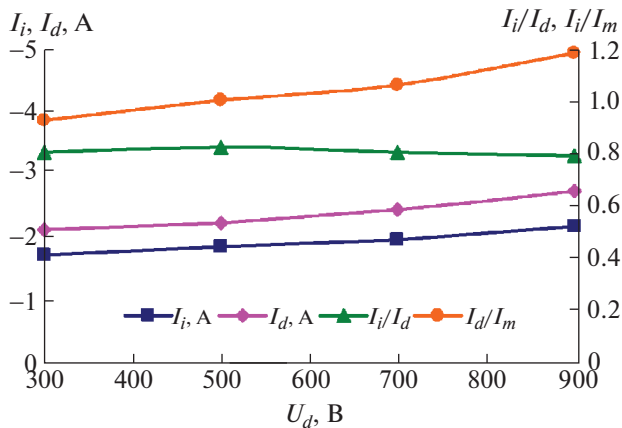


Рис. 1. Зависимости суммарного тока ускоренных ионов I_i , разрядного тока I_d и отношений ионного тока к разрядному току и току I_m потока однозарядных ионов, эквивалентного расходу через ускорительный канал, от разрядного напряжения для модели двигателя типа СПД-100, работающей при расходе через анод 2.4 мг/с [7].

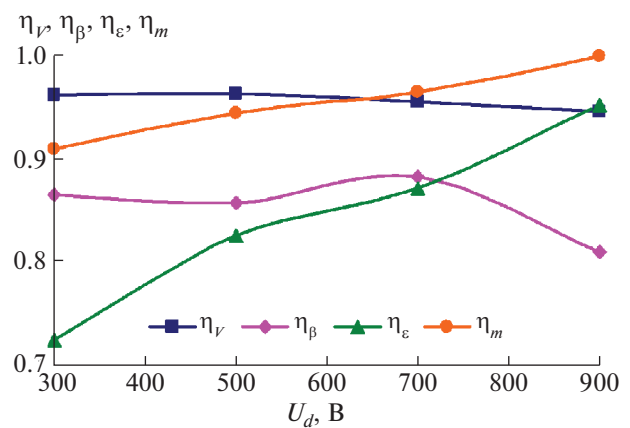


Рис. 2. Зависимости коэффициентов η_m , η_β , η_ν , η_ϵ от разрядного напряжения для модели двигателя масштаба СПД-100, работающей при расходе через анод 2.4 мг/с [7].

того, в струе происходит трансформация потоков ионов и их характеристик из-за столкновений ионов с нейтральными атомами, приводящих в том числе и к перезарядке ионов. Это требует введения поправочных коэффициентов в результаты измерений, что также сказывается на точности измерений. Поэтому прямые измерения реактивной тяги F и среднемассовой скорости $\langle V_z \rangle = F/\dot{m}_a$ частиц РВ оказываются более точными по сравнению с измерениями характеристик истекающих из двигателя ионов. В частности, измерения тяги двигателя и расхода РВ современными устройствами могут быть выполнены с погрешностью, не превышающей 2–3%, измерения разрядного тока и разрядного напряжения – с погрешностью, не превышающей 1%. В результате в зависимости от масштаба модели и величины измеряемой тяги тяговый к.п.д. может быть определен с погрешностью (5–10)%. Поэтому определение интегральных характеристик является одним из эффективных методов в изучении СПД и используется большинством исследователей, в том числе и в данной работе. Но поскольку фигурирующие в (1) коэффициенты позволяют осуществлять качественную оценку влияния разных факторов на результирующую тяговую эффективность двигателя, далее будут рассматриваться как результаты прямых измерений тяги, так и некоторые результаты измерений характеристик потока ускоренных ионов в струе исследуемых двигателей. В частности, эти измерения показывают, что при работе на ксеноне значения тока I_i быстро возрастают с увеличением разрядного напряжения вследствие возрастания энергии электронов

и их ионизирующей способности [6]. Но после выхода на так называемые “ускорительные” режимы с напряжениям порядка 150–200 В и выше (в зависимости от масштаба модели и типа катода) отношение I_i/I_d для двигателя на ксеноне на оптимизированных режимах работы слабо изменяется с увеличением разрядного напряжения (рис. 1, см. [7]). При этом отношение ионного тока к “расходному” току $I_m = e\dot{m}_a/M$, где M – масса атома (иона), при больших разрядных напряжениях может быть больше единицы. Это объясняется возрастанием доли многозарядных ионов с увеличением разрядного напряжения и отмеченными выше погрешностями измерений ионного тока.

Эксперименты показывают также, что на названных ускорительных режимах работы слабо изменяются и коэффициенты η_β , η_ν (рис. 2). Таким образом, в этих режимах СПД основные изменения тягового к.п.д. при изменении режима работы определяются изменениями коэффициентов η_m , η_ϵ (рис. 2).

Данных о характеристиках струи СПД при работе на криптоне значительно меньше. Для одного из режимов работы модели типа СПД-100 они приведены в [10], а для разных режимов работы модели СПД-50 – в [11]. Они свидетельствуют о том, что общий характер изменения характеристик ионного потока в струе в целом аналогичен полученному на ксеноне. Поэтому можно считать, что отмеченные особенности изменения коэффициентов η_m , η_β , η_ν , η_ϵ при работе двигателя на ксеноне будут характерны и для работы на криптоне. Следует также отметить, что общие закономерности изменения характеристик двигателя при изменении разрядного напряжения на качественном уровне объясняются достаточно про-

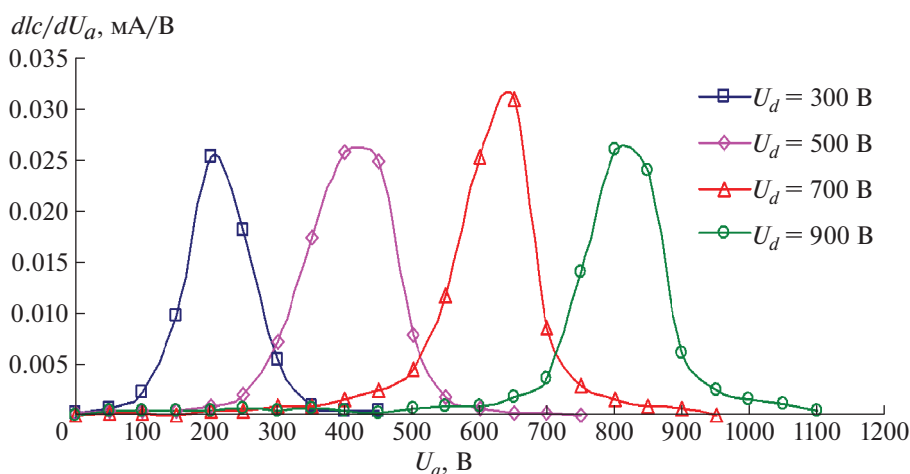


Рис. 3. Распределения ионов, истекающих из модели двигателя типа СПД-100, работающей с расходом ксенона через ускорительный канал 2.4 мг/с, и движущихся в струе в приосевой области при разных разрядных напряжениях [7].

сто. Поэтому их рассмотрению обычно не уделяется должного внимания. В данной статье представляется целесообразным рассмотреть эти закономерности несколько подробнее, чтобы показать различия в характеристиках СПД при работе на ксеноне и криптоне. В частности, коэффициент η_e может быть представлен в виде

$$\eta_e = \frac{\langle \varepsilon_i \rangle}{eU_d} = \frac{U_{eff}}{U_d} = \frac{U_d - \Delta U_i}{U_d}, \quad (3)$$

где U_{eff} — эффективная разность потенциалов, идущая на ускорение ионов.

Величина U_{eff} меньше приложенной между анодом и катодом разности потенциалов, из-за того что потенциал в объеме СИУ снижается в выходном направлении, и большинство ионов, рождающихся в нем, ускоряется неполной разностью потенциалов. Отмеченный эффект усиливается тем, что часть ионов гибнет на стенках и после их нейтрализации и возвращения в виде нейтральных атомов в объем разряда заново ионизируется в основном ближе к выходному сечению ускорительного канала. Кроме того, при работе катода в так называемом авторежиме, когда его тепловое состояние поддерживается разрядом в катод, разность потенциалов между эмиттером и плазмой на выходе из катода составляет обычно около 2-х потенциалов ионизации РВ, на котором работает катод.

В работе [7] было показано, что для модели типа СПД-100 при расходе ксенона через ускорительный канал 2.4 мг/с разность ΔU_i между приложенным разрядным напряжением и разностью потенциалов, соответствующей средней энергии ионов, составляет (80–100) В. Важно также то, что эта разность потенциалов, судя по распределениям ионов по энергии (рис. 3), слабо изменя-

ется при изменении разрядного напряжения. При большем расходе она может быть и несколько меньше. Так, при расходе ксенона 4.5 мг/с средняя энергия ионов в струе двигателя СПД-100 составляла примерно 240 эВ, т.е. примерно $0.8 eU_d$ [12]. С учетом этого и падения потенциалов в разряде катода можно принять, что в случае ксенона разность потенциалов ΔU_i может составить (60–70) В = (5–6) ϕ_i , где ϕ_i — потенциал ионизации РВ. При этом часть этой разности потенциалов порядка $3\phi_i$ соответствует среднему падению потенциала в зоне ионизации.

С учетом изложенного выше можно ожидать увеличения ΔU_i при работе на криптоне до (70–84) В. В соответствии с выражением (5) при работе на криптоне и увеличении разрядного напряжения должен наблюдаться сдвиг значений напряжений, при которых наблюдается повышение тягового к.п.д., как минимум на (10–12) В.

Кроме большего потенциала ионизации при одинаковых энергиях электронов, у криптона меньше сечение ионизации и коэффициент скорости ионизации [4]. Поэтому для достижения сопоставимой эффективности переработки потока атомов в ионы необходимы более высокие энергии электронов. Поскольку температура электронов возрастает с увеличением разрядного напряжения, то выход на режимы работы с высокой эффективностью должен получаться при работе на криптоне при еще больших разрядных напряжениях, чем было получено выше при оценке влияния потенциала ионизации.

Таким образом, при работе на криптоне ожидаемыми являлись заметные количественные изменения характеристик двигателя. Имеющиеся данные в целом подтверждают эти ожидания.

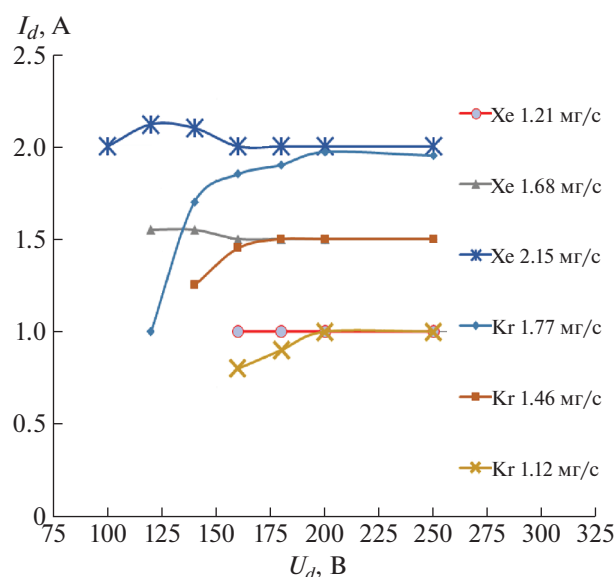


Рис. 4. Вольт-амперные характеристики модели двигателя СПД-50 с наружным диаметром ускорительного канала 50 мм при ее работе на ксеноне и крипто-не [12].

1. При работе на крипто-не с невысокими разрядными напряжениями получают-ся вольт-амперные характеристики (ВАХ) без характерного для ксенона максимума в области значений разрядного напряжения (100–150) В и пониженные значения отношения разрядного тока к расходу через ускорительный канал (см. рис. 4), хотя при сопоставимой степени переработки потока атомов в ионы они должны быть значительно больше. Так, при расходе ксенона порядка 1.77 мг/с и разрядных напряжениях выше 175 В разрядный ток получился равным 1.5 А (рис. 4), и отношение I_d/I_m составило около 1.18. При работе же на крипто-не соответствующие значения составили 1.46 мг/с и 1.75 А, т.е. отношение I_d/I_m оказалось равным примерно 0.85. Таким образом, даже при нулевом сквозном электронном токе коэффициент использования крипто-на не мог превышать 85%.

2. При работе на крипто-не при невысоких разрядных напряжениях получают-ся значительно меньшие значения отношения коэффициента I_i/I_d , чем на ксеноне (рис. 5). В соответствии с изложенными выше соображениями отмеченные особенности объясняются недостаточной величиной энергии электронов для эффективной ионизации крипто-на и большой величиной отношения $\Delta U_i/U_d$ в выражении (5) при невысоких разрядных напряжениях. В совокупности они объясняют и значительно более низкий уровень тягового к.п.д. при работе на крипто-не при невысоких разрядных напряжениях (рис. 6).

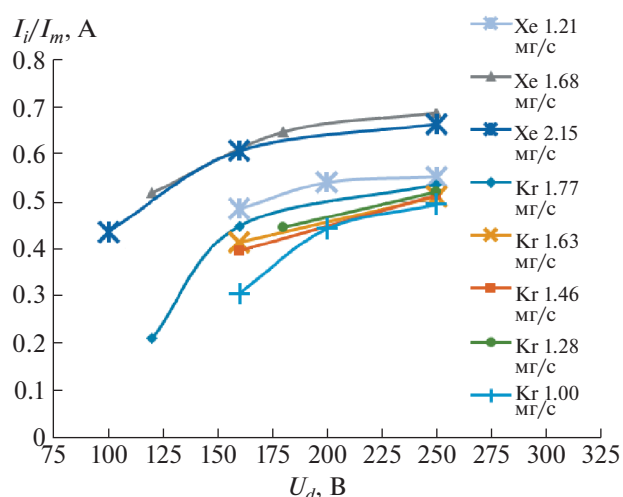


Рис. 5. Зависимости отношения тока I_i ионов, истекающих из модели двигателя СПД-50, к “расходному” току $I_m = e\dot{m}_a/M$.

При достаточно больших разрядных напряжениях в соответствии с выражением (1) отличия в значениях коэффициента η_e в случаях ксенона и крипто-на из-за отмеченных причин должны уменьшаться. Приведенные выводы подтверждаются результатами серии исследований работы и характеристик СПД на ксеноне, крипто-не и аргоне, выполненной в Московском авиационном институте, Институте атомной энергии им. И.В. Курчатова и Московском институте радио-электроники и автоматики в рамках проекта INTAS-99-1225 [13]. При этом показано, что повысить характеристики СПД на крипто-не и аргоне

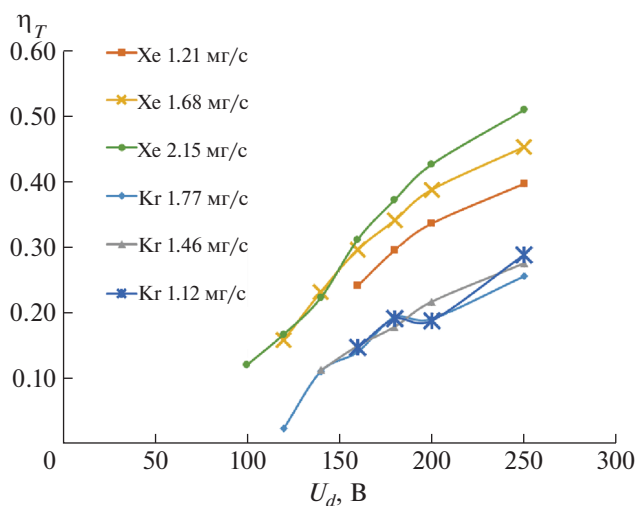


Рис. 6. Зависимости тягового к.п.д. модели двигателя СПД-50 от режима ее работы.

можно оптимизацией магнитного поля, изменением конструкции двигателя, а также увеличением разрядного напряжения и расхода РВ.

В работах [10, 13] было проведено также исследование влияния соотношения расходов в смесях криптона и ксенона на тяговую эффективность и расходимость струи. Показано, что с увеличением доли ксенона в его смеси с криптоном на типовых режимах работы СПД тяговая эффективность СПД повышается с увеличением доли ксенона. Это объясняется тем, что на таких режимах тяговый к.п.д. при работе на криптоне ниже. Этот результат повторен в [14] для модели СПД большего размера. В [15] основное внимание уделялось сравнению интегральных характеристик двигателей на ксеноне и криптоне и подтверждено, что с увеличением разрядного напряжения и расхода РВ разница в тяговой эффективности двигателя СПД-100 при работе на ксеноне и криптоне уменьшается.

Анализу влияния размеров модели и режима работы двигателя на граничные значения расхода РВ через ускорительный канал посвящены публикации [10, 16]. Так, в [10] показано, что названные граничные значения массового расхода РВ, $\dot{m}$, через ускорительный канал можно оценить, используя соотношение

$$\frac{\dot{m}}{S_{ch}} \geq \frac{V_{iz} V_a}{\langle \sigma_i V_e \rangle L} \approx C_1 \frac{\sqrt{k T_a e \Delta U}}{\langle \sigma_i V_e \rangle L}, \quad (4)$$

где S_{ch} , V_{iz} , $k T_a$, ΔU , C_1 — соответственно, площадь поперечного сечения ускорительного канала, продольная составляющая скорости ионов, температура атомов в энергетических единицах, падение потенциала в СИУ и постоянный коэффициент, не зависящий от рода РВ. В [2] дан более строгий вывод граничного массового расхода, но его общий вид остался таким же, как в (4).

В [16] показано, что примерно одинаковые условия для ионизации частиц РВ должны обеспечиваться на разных РВ при выполнении несколько иного условия, а именно, что двигатели на разных РВ будут работать при одинаковых массовых расходах примерно одинаково при выполнении равенства

$$\left(\frac{\dot{m}}{S_{ch}} b \right)^2 = \frac{e U_d}{(\sigma_i V_e)^2} T_a = \text{const}, \quad (5)$$

где b , U_d — ширина ускорительного канала и разрядное напряжение.

Из приведенных выражений видно, что при использовании формул (4) и (5) должны получаться значительно отличающиеся оценки требуемого расхода для двигателей разного масштаба. Необходимо было определить, какое из приведенных выражений лучше отражает влияние расхода РВ на тяговую эффективность двигателя.

В статье [17] представлена методика инженерного расчета характеристик СПД, в том числе на разных РВ, на основе обобщения опубликованных экспериментальных данных сделана попытка учета рассмотренных тенденций при переходе на новые РВ. Результаты настоящей работы могут быть полезны для уточнения зависимостей, используемых в этой методике.

К сказанному следует добавить, что использование соотношений типа (4) и (5) затруднено тем, что в них входят параметры, которые сложно оценить достаточно точно, не имея полных распределений основных параметров плазмы в объеме СИУ. Так, величина λ_i зависит от скорости атомов V_a , средних значений для СИУ коэффициента скорости ионизации $\langle \sigma_i V_e \rangle$ и концентрации электронов n_e , а толщину L СИУ можно оценить из необходимого условия стационарного его существования, впервые рассмотренного А.В. Жариновым, который получил следующее выражение [3]:

$$L \approx \sqrt{\frac{m \Delta U}{e B_r^2}} \frac{v_e}{v_i} = R_{Le}(U) \sqrt{\frac{v_e}{v_i}}, \quad (6)$$

где m , v_e , v_i , $R_{Le}(\Delta U)$ — масса электрона, радиальная компонента магнитной индукции, эффективная частота столкновений, приводящих к смещению поперек магнитного поля электронов, дрейфующих в скрещенных электрическом и магнитном полях, частота ионизационных столкновений электронов и ларморовский радиус электронов, соответствующий энергии электронов $e \Delta U$.

Для иллюстрации упомянутой сложности можно рассмотреть результаты измерения температуры электронов в модели двигателя типа СПД-100, работавшей на ксеноне и криптоне при одинаковом разрядном напряжении 300 В и сопоставимых массовых расходах ксенона и криптона (рис. 7). Как видно из этого рисунка, распределения температуры электронов при работе на криптоне и ксеноне значительно отличаются как по уровню значений, так и по характеру изменения по длине ускорительного канала, что затрудняет анализ.

В то же время результаты определения распределения потенциала плазмы в ускорительном канале при одинаковых разрядных напряжениях и расходах ксенона и криптона показывают, что толщина СИУ и его положение отличаются незначительно при работе одной и той же модели на ксеноне и криптоне (рис. 8). Это имеет место несмотря на возможную значительную разницу в величинах коэффициентов, определяющих толщину слоя в соответствии с выражением (6). Таким образом, можно считать, что в первом приближении толщина СИУ при одинаковых расхо-

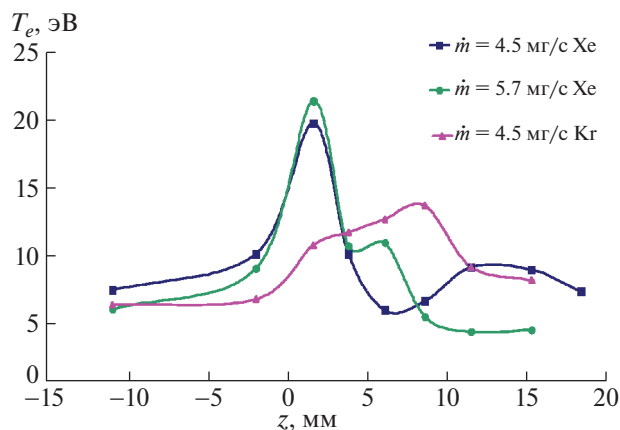


Рис. 7. Распределения температуры электронов по длине ускорительного канала в модели типа СПД-100 с наружным диаметром ускорительного канала 100 мм при ее работе с разрядным напряжением 300 В на ксеноне и криптоне [18].

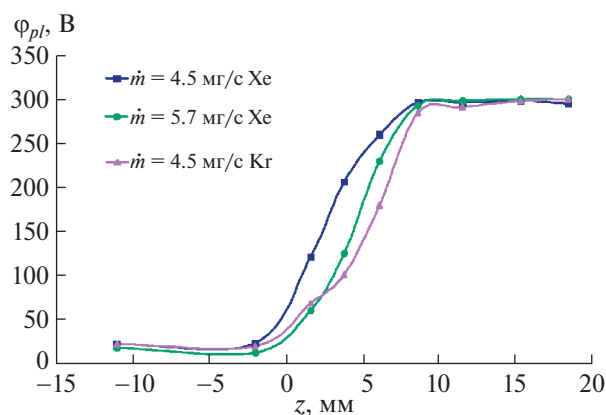


Рис. 8. Распределения потенциала плазмы по длине ускорительного канала при разрядном напряжении 300 В при работе модели СПД с наружным диаметром ускорительного канала 100 мм на ксеноне и криптоне [18].

дах и разрядных напряжениях одинакова, что значительно упрощает ситуацию.

Незначительное изменение толщины СИУ при переходе от ксенона к криптому при одинаковых массовых расходах и разрядных напряжениях свидетельствует о том, что усредненные для СИУ значения корня из отношения частоты “столкновений” электронов, определяющей перенос дрейфующих электронов поперек магнитного поля, и ионизационной частоты их столкновений с атомами в выражении (6) изменяются незначительно при переходе от ксенона к криптому.

Таким образом, можно говорить о некотором “подобии” процессов, определяющих процессы поперечного по отношению к магнитному полю переноса дрейфующих электронов и частоту ионизационных столкновений при одинаковых разрядных напряжениях и расходах ксенона и криптона через ускорительный канал. Полученный результат может быть объяснен выравнивающим действием усреднения значений концентрации электронов и коэффициента скорости ионизации по объему СИУ, а также тем, что толщина СИУ и его положение, помимо прочих факторов, существенно зависят и от распределения магнитной индукции в разряде и плотности расхода РВ [19].

Как следует из приведенного обзора, в рассмотренных экспериментальных работах не были определены граничные значения расходов РВ, выше которых достигаются высокие значения тягового к.п.д., и максимально достижимые значения тягового к.п.д. при работе на разных РВ — из-за того, что каждое исследование было выполнено на модели одного типоразмера и в ограниченном диапазоне расходов криптона. В то же время

для разработки новых двигателей важно иметь физические критерии для выбора режимов работы таких двигателей, пригодные для моделей СПД разного размера, в том числе при их длительной работе. Поэтому в качестве наших основных задач были выбраны:

определение упомянутых граничных значений расхода ксенона и криптона в расширенных диапазонах их изменения в моделях СПД разного масштаба и критериев выбора расхода РВ, пригодных в том числе и для длительно работающих двигателей;

определение максимально достижимого уровня тягового к.п.д. СПД при работе на криптоне.

В следующем разделе приведены результаты, полученные при решении этих задач.

3. МЕТОДИКА И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ РАСХОДА КСЕНОНА И КРИПТОНА ЧЕРЕЗ УСКОРИТЕЛЬНЫЙ КАНАЛ НА ТЯГОВУЮ ЭФФЕКТИВНОСТЬ СПД РАЗНОГО МАСШТАБА

Как уже отмечалось ранее, результаты 1-го этапа наших исследований кратко представлены в работе [5]. Эти исследования были проведены на трех моделях СПД с вынесенной зоной ускорения, реализованных путем смещения максимума распределения магнитной индукции вдоль срединной поверхности ускорительного канала в выходном направлении за плоскость наружного полюса магнитной системы [2]. Одна из них — модель СПД-40 с наружным диаметром ускорительного канала 39 мм в межполюсном зазоре. Она была выполнена с коническими расширениями выходной части ускорительного канала на

каждой из стенок в зонах их эрозии, под углом 30 градусов к исходной цилиндрической геометрии стенок.

Вторая модель — масштаба известного двигателя типа СПД-100 (далее модель СПД-100), разработанного ОКБ “Факел” и широко используемого в космосе [2, 20], — имела наружный диаметр ускорительного канала в межполюсном зазоре 92 мм и была также выполнена с коническими расширениями каждой из стенок в зонах их эрозии под углом 45 градусов к каждой из стенок.

Третья модель — масштаба двигателя типа СПД-140 разработки ОКБ “Факел” (далее модель СПД-140). Модель СПД-140 была изготовлена с наружным диаметром ускорительного канала в межполюсном зазоре 136 мм. Ее характеристики на первом этапе исследования определялись с малым расширением выходной части ускорительного канала; результаты опубликованы в [5]. После этого разрядная камера модели была изготовлена со значительным расширением ускорительного канала, аналогичным тому, что делалось в модели СПД-100, и были проведены дополнительные измерения характеристик. При этом площади выходных сечений ускорительного канала в моделях СПД-40 и СПД-100 составляли соответственно около 15 см² и 70 см². В модели СПД-140 без значительного расширения она была равна примерно 80 см², а в расширенном варианте — примерно 150 см². Выполнение выходной части канала расширенной моделировало изменение геометрии выходной части ускорительного канала при длительной работе двигателя и позволяло оценить влияние такого расширения на величину граничных значений плотности расхода ксенона и криптона.

Определялись зависимости интегральных параметров исследуемых моделей от разрядного напряжения и массового расхода $\dot{m}_a$ РВ через ускорительный канал. При этом измерялись разрядное напряжение U_d и оптимальное значение разрядного тока I_d , массовый расход $\dot{m}_a$, реактивная тяга F и ряд других параметров. В качестве оптимального принималось минимальное значение разрядного тока, которое обычно обеспечивает получение максимального значения тягового к.п.д. По реактивной тяге и расходу РВ определялось значение продольной составляющей средне-массовой скорости $\langle V_z \rangle = F / \dot{m}_a$ частиц РВ, истекающих из двигателя, а также тяговый к.п.д. по формуле $\eta_T = \dot{m} \langle V_z \rangle^2 / 2U_d I_d$.

Модели размещались в вакуумной камере с внутренним диаметром 2 м и длиной 5 м, которая откачивалась безмасляными средствами откачки. Максимальное давление в вакуумной камере при работе двигателей не превышало 1×10^{-4} мм рт.

ст., что является приемлемым для определения интегральных характеристик СПД.

На первом этапе исследований, для моделей СПД-40, СПД-100 и СПД-140 с малым расширением выходной части ускорительного канала, были получены оценки граничных значений массового расхода через ускорительный канал, выше которых должна получаться достаточно высокая тяговая эффективность двигателя. При этом оценки плотности расхода ксенона и криптона (с учетом площади выходного сечения ускорительного канала) дали практически одну и ту же величину для обоих РВ — порядка 0.1 мг/с · см² [5]. Следует отметить, что из-за ограниченных возможностей источника разрядного напряжения величина расхода ксенона и криптона при проведении первого этапа исследований ограничивалась 7 мг/с. Поэтому результаты, полученные для модели СПД-100 и особенно для модели СПД-140, были недостаточно убедительными. При проведении нового этапа работ был подготовлен новый источник разрядного напряжения, позволивший провести исследование в расширенном диапазоне расходов ксенона и криптона. При этом основное внимание уделялось выяснению влияния расхода криптона на тяговую эффективность модели СПД-140 как в варианте с малым расширением выходной части ускорительного канала в зоне эрозии стенок, так и в варианте с ее расширением на угол 45 градусов. Полученные результаты приведены на рис. 9, 10. Они свидетельствуют о том, что и на ксеноне, и на криптоне при повышенных разрядных напряжениях удалось выйти на максимальные значения тягового к.п.д., которые практически совпадают. Важно также то, что граничные значения расхода ксенона и криптона тоже оказались близки. Так, для модели с малым расширением ускорительного канала при ее работе на ксеноне можно выбрать в качестве граничного расхода величину около 9 мг/с (между 8.0 мг/с и 10 мг/с, см. рис. 9). При работе на криптоне в качестве граничного более подходит значение 10 мг/с. При этом граничное значение плотности расхода РВ укладывается в обоих случаях в диапазон (0.11–0.125) мг/с · см², если ее рассчитывать по площади выходного отверстия ускорительного канала. Эти значения близки к полученным ранее оценкам [5].

Для модели масштаба СПД-140 с расширенным ускорительным каналом на криптоне граничное значение расхода через ускорительный канал можно считать равным 15 мг/с, что дает граничное значение плотности расхода, равное 0.1 мг/с · см². Таким образом, для всех трех моделей с разными геометриями выходной части ускорительного канала получены практически одинаковые значения граничной плотности расхода как ксенона, так и криптона, выше которой

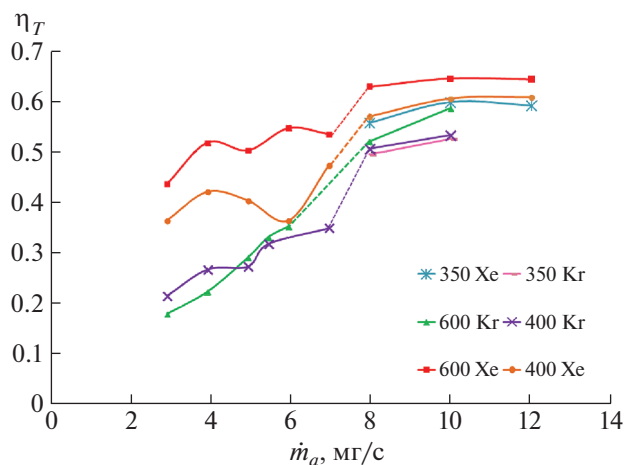


Рис. 9. Зависимости тягового к.п.д. модели СПД-140 с небольшим расширением ускорительного канала от расходов ксенона и криптона (в легендах показаны род РВ и значения разрядного напряжения).

достигаются значения тягового КПД, близкие к максимальным. Эти значения находятся в пределах $(0.1–0.125)$ мг/с · см², если плотность расхода рассчитывать по выходному сечению ускорительного канала. Значение плотности 0.11 мг/с · см² можно принять в качестве расчетного для граничной плотности расхода для всех исследованных моделей СПД, на него можно ориентироваться при выборе режимов работы СПД на криптоне. И в качестве критерия близости режимов работы СПД разного размера к оптимальным для получения высокой тяговой эффективности новых двигателей можно использовать сравнение реализующихся в них плотностей расхода РВ с указанным значением граничной плотности расхода.

Одно и то же значение граничной плотности расхода означает также, что названные граничные значения соответствуют формуле (4) и что отношение $\sqrt{kT_e \Delta U} / \langle \sigma_i V_e \rangle L$ в этой формуле, реализующееся на оптимизированных режимах работы, зависит в основном от плотности расхода РВ через ускорительный канал. Представляет интерес и то, что начиная с разрядных напряжений 300 В, как и ожидалось на основе проведенного в разд. 2 анализа, тяговый к.п.д. при повышенных разрядных напряжениях зависит в основном от расхода РВ и меньше зависит от разрядного напряжения (см. рис. 10). Это означает, что при этих разрядных напряжениях температура электронов и их ионизирующая способность оказываются достаточно высокими, что приводит к малому изменению коэффициента скорости ионизации с дальнейшим увеличением разрядного напряжения [4]. Следовательно, основной прирост коэффициента использования РВ и тягового к.п.д. да-

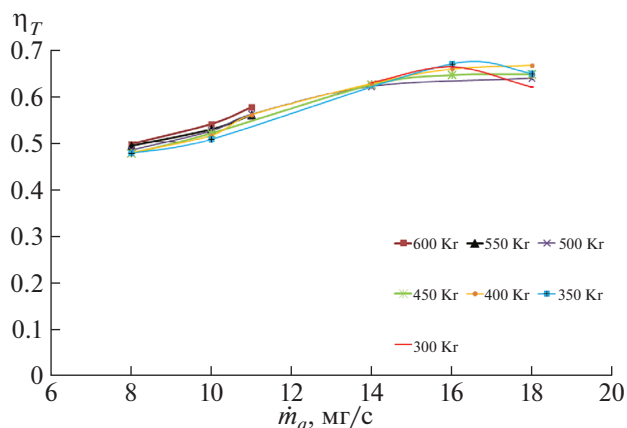


Рис. 10. Зависимости тягового к.п.д. модели масштаба СПД-140 с расширением ускорительного канала под углом 45 градусов на каждой из стенок от расхода криптона через ускорительный канал (в легендах указаны род РВ и значения разрядного напряжения).

ет увеличение концентрации плазмы (электронов) в СИУ. При этом отношение разрядного тока к расходному току I_m на таких режимах при работе на криптоне при повышенных расходах составило примерно 1.2, т.е. близко к получающемуся на ксеноне. Это подтверждает близость коэффициентов использования РВ при работе на ксеноне и криптоне при значениях расхода, близких к граничным значениям.

В прикладном плане важно то, что граничные значения расхода РВ необходимо рассчитывать с учетом планируемого расширения ускорительного канала вследствие износа его стенок. Существенно также то, что максимальные значения тягового к.п.д. и граничные значения плотности массового расхода через ускорительный канал при повышенных разрядных напряжениях в случаях ксенона и криптона практически одинаковы. Это подтверждает возможность создания конкурентоспособных двигателей на криптоне, которые при сопоставимых расходах и разрядных напряжениях будут обеспечивать более высокие скорости истечения. Так, для модели масштаба СПД-140 при разрядном напряжении 400 В и расходе ксенона через ускорительный канал около 15 мг/с получаются среднемассовые скорости истечения $\langle V_z \rangle$ около 22 км/с, а на криптоне при тех же массовом расходе и разрядном напряжении нами получены значения $\langle V_z \rangle$ около 27 км/с. Это соответствует увеличению скорости ионов криптона за счет уменьшения их массы при несколько меньшей эффективной ускоряющей разности потенциалов из-за больших значений ΔU_i в выражении (3). При этом при одинаковых расходах РВ и разрядных напряжениях при работе на криптоне с плотностями расхода, близкими к гранич-

ным, будут получаться разрядные токи и мощности разряда, примерно в 1.6 раза превышающие токи при работе на ксеноне. Это потребует специальных мер по обеспечению большого ресурса двигателей на криптоне. Анализ показывает [21], что такие возможности в настоящее время имеются, и проблема обеспечения большого ресурса СПД при расходах криптона, близких к граничным значениям, представляется разрешимой. Кроме того, при работе на криптоне из-за ограничений по мощности будут приемлемы меньшие предельные значения разрядного напряжения.

4. КРАТКОЕ ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

С физической точки зрения среди полученных результатов наибольший интерес представляют следующие.

1. Несмотря на достаточно заметное различие, как минимум, сечений ионизации и сечений столкновений электронов с атомами ксенона и криптона, распределения потенциала плазмы и толщина СИУ, при работе СПД на криптоне и ксеноне на оптимизированных режимах с сопоставимыми разрядными напряжениями и массовыми расходами получаются близкими. Это означает некоторое “подобие” процессов в СИУ, приводящее к близким значениям корня из отношения эффективной частоты столкновений, приводящих к смещению электронов поперек магнитного поля, к частоте ионизационных столкновений. Отмеченное может быть объяснено определяющим влиянием на толщину слоя, оказываемым продольным распределением магнитной индукции и концентрацией нейтральных атомов, задающими область возможных значений рассматриваемой толщины [19]. Действительно, если принять, что при работе на ксеноне и криптоне толщину слоя определяют одинаковые закономерности, обнаруженные в [19], то можно оценить возможное изменение толщины СИУ вследствие их действия. Так, в [19] показано, что граничные значения магнитной индукции на магнитной силовой линии, пересекающей границы зон эрозии на стенках, подчиняются единой зависимости от плотности расхода ксенона в моделях СПД разного масштаба, работающих на разных режимах. Это означает, что границы СИУ со стороны анода наиболее существенно зависят от распределения магнитной индукции вдоль ускорительного канала и от плотности расхода РВ, определяющей распределения локальных параметров плазмы, в том числе концентрацию нейтральных атомов в соотношении (4) для толщины СИУ. Относительные распределения магнитной индукции в одной и той же модели СПД при ее работе на ксеноне и криптоне были близкими, поскольку они определялись, главным об-

разом, конфигурацией элементов магнитной системы. Что касается концентрации нейтральных атомов, то при одинаковых массовых расходах и температурах стенок ускорительного канала концентрация атомов криптона могла увеличиться примерно на 28%, а корень из концентрации — примерно на 13%. Если учесть, что при работе на криптоне могут получаться более высокие температуры стенок, то вследствие большего увеличения скорости атомов криптона увеличение концентрации атомов и увеличение толщины СИУ должны быть еще меньше, чем приведено выше. Полученная оценка свидетельствует о том, что ожидаемое изменение толщины СИУ, в предположении одинакового характера зависимости толщины слоя от относительного распределения магнитной индукции и концентрации нейтральных атомов в нем, незначительно и не противоречит результатам измерений (см. рис. 8). В свою очередь это дает основание ожидать, что закономерности, выявленные в [19] и определяющие толщину СИУ, будут одинаковыми для СПД с одинаковым типом магнитных систем при их работе на ксеноне и криптоне.

2. Практически одинаковы граничные значения плотности расхода ксенона и криптона, выше которых тяговый к.п.д. и коэффициент использования РВ становятся высокими, несмотря на возможное значительное различие локальных значений коэффициента скорости ионизации в соотношении (3). Это означает, что для оценки граничных значений расхода РВ больше подходит выражение (4). Представляется, что такой результат, в первую очередь, определяется рассмотренным выше малым изменением толщины слоя при переходе от ксенона к криптону и определяющим влиянием концентрации плазмы при достаточно высоких разрядных напряжениях. Частично это может быть объяснено также эффектом усреднения распределения коэффициента скорости ионизации по объему СИУ.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенные в статье результаты раскрывают физические особенности изменения характеристик СПД на ксеноне и криптоне при изменении разрядных напряжений и расходов РВ через ускорительный канал. Они могут представить также интерес в прикладном плане, поскольку свидетельствуют о возможности создания конкурентоспособных СПД на криптоне, позволяют определить критерий близости режимов работы новых двигателей к режимам с высокой тяговой эффективностью.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 16-19-10429).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Морозов А.И. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. С. 261.
2. Ким В.П. // ЖТФ. 2015. Т. 85. № 3. С. 45.
3. Гришин С.Д., Ерофеев В.С., Жаринов А.В. Плазменные ускорители / Под ред. Л.А. Арцимовича. М.: Машиностроение, 1973. С. 54.
4. Морозов А.И., Меликов И.В. // ЖТФ. 1974. Т. 44. С. 544.
5. Ким В.П., Меркурьев Д.В., Смирнов П.Г., Шилов Е.А. // Письма в ЖТФ. 2017. Т. 43. № 23. С. 24.
6. Kim V. // J. Propulsion and Power. 1998. V. 14. P. 736.
7. Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К. Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: Изд. МАИ, 2012.
8. Архипов А.С., Ким В., Сидоренко Е.К. // ЖТФ. 2012. Т. 82. № 5. С. 42.
9. Hofer R.R., Gallimore A.D. // Proc. 39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conf & Exhibit, Huntsville, Ala, USA, 2003. Paper AIAA-2003-5001.
10. Kim V., Popov G., Kozlov V., Skrylnikov A., Grdlichko D. // Proc. 27th Int. Electric Propulsion Conf., Pasadena, USA, 2001. Paper IEPC-01-065.
11. 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. // Известия РАН. Энергетика. 2016. № 2. С. 66.
12. Absalamov S.K., Andreev V.B., Colbert T., Day M., Egorov V.V., Gnizdor R.Yu., Kaufman H., Kim V., Koryakin A.I., Kozubsky K.N., Kudryavtsev S.S., Lebedev U.V., Popov G.A., Zhurin V.V. // 28th Joint Propulsion Conf&Exhibit, Nashville, TN, USA, 1992. Paper AIAA 92-3156.
13. Darnon F., Cadiou A. Study, design and characterization of Hall thrusters optimized for being used with mixtures of Argon, Krypton and Xenon as propellant. Final report of the INTAS-99-1225 project. CNES. Toulouse, France, 2002.
14. Ducci C., Andreussi T., Arkhipov A., Passaro A., Andrenucci M., Bulit A., Edwards C. // Proc. 30th Int. Symposium on Space Technology and Science, 34th Int. Electric Propulsion Conf. and 6th Nano-satellite Symposium, Kobe, Hyogo, Japan, 2015. Paper IEPC-2015-126/ISTS-2015-b-126.
15. Nakles M.R., Hargus W.A., Delgado J.J., Corey R.L. // Proc. 32nd Int. Electric Propulsion Conf., Wiesbaden, Germany, 2011. Paper IEPC-2011-003.
16. Бугрова А.И., Лунатов А.С., Морозов А.И., Чурбанов Д.В. // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 19. С. 56.
17. Shagaida A. // Proc. 33rd Int. Electric Propulsion Conf., Washington, D.C., USA, 2013. Paper IEPC-2013-056.
18. Kim V., Grdlichko D., Kozlov V., Lazourenko A., Popov G., Skrylnikov A. // Proc. 38th Joint Propulsion Conf., Indianapolis, IN, USA, 2002. Paper AIAA 2002-4108.
19. Mitrofanova O.A., Gnizdor R.Yu. // Proc. 33rd Int. Electric Propulsion Conf., Washington, D.C., USA, 2013. Paper IEPC-2013-51.
20. Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П., Трифонов Ю.В., Ходненко В.П., Ким В., Попов Г.А., Обухов В.А. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. С. 277.
21. Ким В.П. // Физика плазмы. 2017. Т. 43. С. 406.