

04;12

## Результаты исследования характеристик струй стационарных плазменных двигателей, работающих на различных режимах

© А.С. Архипов, В. Ким, Е.К. Сидоренко

Научно-исследовательский институт прикладной механики и электродинамики государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования „Московский авиационный институт“ (государственный технический университет)  
Москва, Россия  
e-mail: riame4@sokol.ru

(Поступило в Редакцию 31 мая 2011 г.)

Изложены результаты исследования характеристик струй лабораторных моделей электрореактивных двигателей типа СПД-100 и СПД-140, созданных на базе плазменных ускорителей с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП). Основными исследуемыми характеристиками струи являлись распределения плотности тока ускоренных ионов по углу отклонения направлений их движения от оси двигателя и распределения ионов, движущихся вдоль различных направлений, по энергии. Эти характеристики изучены при работе названных двигателей на режимах работы с повышенными разрядными напряжениями, обеспечивающими повышенные скорости истечения потоков плазмы, истекающих из двигателя. Полученные данные дают возможность изучения закономерностей изменения таких параметров и характеристик струи, как ее расходимость и пространственные распределения потоков энергии, переносимой ускоренными ионами, с изменением режима работы двигателя.

### Введение

Как известно, в настоящее время так называемые стационарные плазменные двигатели (СПД), представляющие собой электрореактивные двигатели (ЭРД), созданные на основе плазменных ускорителей с замкнутым дрейфом электронов (УЗДЭ), успешно работают в космической технике, и масштабы их применения расширяются [1]. В связи с этим повышаются требования к двигателю прежде всего по величине создаваемой им тяги, скорости истечения ускоренного потока плазмы и ресурсу. Поэтому как в России, так и в других странах изучаются особенности работы и характеристики таких двигателей и ускорителей, работающих на различных режимах, в том числе при повышенных разрядных напряжениях, обеспечивающих увеличение скорости истечения. В частности, изучается изменение характеристик струй двигателей при изменении режима их работы. В настоящей работе приведены результаты исследования распределений плотности тока ускоренных ионов по углу отклонения направлений их движения от оси ускорителя и распределений по энергии ионов, движущихся вдоль различных направлений в струях двух лабораторных моделей названных ускорителей стандартной схемы, рассчитанных соответственно на работу при мощностях разряда 1–2 и 3–5 kW. Эти характеристики позволяют осуществлять оценку расходимости струи двигателя и качественных изменений пространственных распределений потоков энергии, переносимой ускоренными ионами, с изменением режима работы ускорителя.

### 1. Предмет и некоторые результаты предыдущих исследований. Цель настоящей работы

Прежде всего представляется необходимым дать краткую характеристику предмета исследования. Как известно, принципиальная схема ускорителя с замкнутым дрейфом электронов и протяженной зоной ускорения (УЗДП) в СССР была разработана в институте атомной энергии имени И.В. Курчатова под руководством А.И. Морозова [2]. Типовой современный ускоритель (см. рис. 1) включает в себя анод 1, катод 2, диэлектрическую (керамическую) разрядную камеру 3, магнитную систему с наружным полюсом 4, катушками

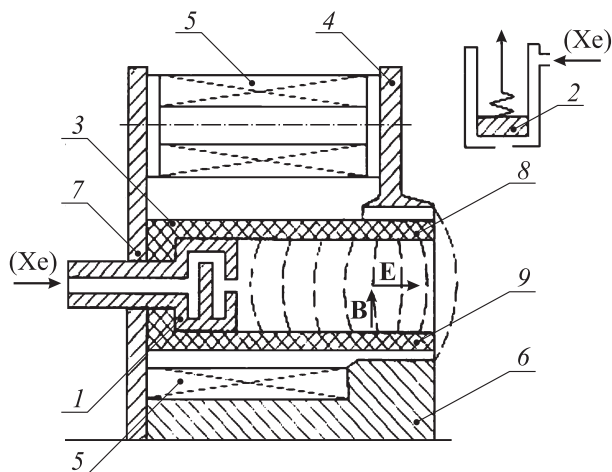


Рис. 1. Принципиальная схема СПД и УЗДП.

намагничивания 5, внутренним полюсом 6 и магнитопроводом 7. Выходные участки стенок 8, 9 разрядной камеры обычно располагаются в межполюсном зазоре. В разрядной камере выполняется кольцевой ускорительный канал, в глубине которого размещается кольцевой анод, который служит обычно и для организации равномерного распределения потока рабочего газа (например, ксенона) в ускорительном канале. Катод располагается вне ускорительного канала и в двигательном исполнении представляет собой газоразрядный источник электронов на основе полого катода с подогреваемым для запуска двигателя термоэммитером. В ускорительном канале создаются преимущественно радиальное магнитное поле и преимущественно продольное электрическое поле путем приложения постоянного напряжения между анодом и катодом. При подготовленном к работе катоде, подаче рабочего газа в ускорительный канал, наложении магнитного поля в канале и приложении напряжения между анодом и катодом в ускорительном канале зажигается разряд в скрещенных электрическом и магнитном полях, в котором удается достаточно эффективно ионизировать поток атомов, поступающих в канал через анод-газораспределитель, электронами, поступающими в разряд из катода и вновь образовавшимися в разряде, а также ускорить образовавшиеся ионы электрическим полем, созданным в плазме названного разряда как проводящей среде. Ускоряемый в ускорительном канале ионный поток истекает из него, нейтрализуется частью электронов, поступающих в поток ионов из катода, и создает реактивное усиление, используемое в двигателях.

Основной частью струи УЗДП и СПД является поток ускоренных ионов. Для его характеристики можно использовать:

- полный ток ускоренных ионов, истекающих из ускорителя;
- распределение плотности тока ускоренных ионов по направлениям их движения;
- распределение ионов, движущихся по определенным направлениям, по энергии;
- зарядовый состав ионов в струе.

Исследованию характеристик струй СПД (УЗДП) до настоящего времени уделялось заметное внимание (см., например, [3–9]). В настоящей работе основное внимание будет уделено рассмотрению влияния режима работы на названные характеристики и взаимосвязи характеристик струи и тяговых характеристик двигателя. Среди уже выявленных тенденций изменения характеристик струи при изменении режима работы двигателя можно отметить следующие:

- увеличение как расхода через ускорительный канал, так и разрядного напряжения до 400–450 В приводит к увеличению значения плотности ионного тока в струе [5], что, естественно, обусловлено увеличением общего потока частиц и повышением эффективности переработки атомов в ионы за счет увеличения плотности плазмы (электронов) при увеличении расхода газа и

увеличением температуры электронов при увеличении разрядного напряжения;

— наблюдается снижение расходимости ускоренного потока ионов на оптимизированных режимах работы с увеличением разрядного напряжения, по крайней мере, до 500–700 В, при этом с увеличением разрядного напряжения энергия ионов в периферийных частях струи возрастает несколько быстрее, чем в приосевой ее части [6];

— при фиксированном разрядном напряжении с увеличением расхода рабочего газа через ускорительный канал плотность тока в приосевой части струи возрастает быстрее, чем плотность тока в ее периферийной части [7], что можно трактовать как „сужение“ струи;

— показано [8], что в струе двигателя (типа ВНТ-1500) с увеличением разрядного напряжения происходит некоторое увеличение плотности тока в приосевой области и некоторое ее уменьшение в периферийных частях, что приводит к снижению расходимости струи.

Исследование взаимосвязи характеристик струи и тяговых характеристик модели двигателя (типа КМ-88) при его работе в диапазоне разрядных напряжений 300–1000 В было проведено в работе [9]. К сожалению, в этой работе не приведены первичные результаты измерений, а лишь результаты их обработки. При этом для оценки потерь тяги из-за разброса ионов по энергии используется коэффициент

$$\gamma_E = \frac{\int_0^\infty dU \int_0^{\pi/2} d\beta \sin \beta \cos \beta \sqrt{U} \frac{\partial j_i(\beta, U)}{\partial U}}{\sqrt{U_d} \int_0^{\pi/2} 0\beta \sin \beta \cos \beta j_i(\beta, 0)} \quad (1)$$

где  $U$  и  $j_i(\beta, U)$  — соответственно задерживающий потенциал зонда-энергоанализатора и значение плотности тока на коллектор такого зонда при названном потенциале  $U$  и направлении измерений ионного тока  $\beta$ , отсчитываемом от оси ускорителя, а для оценки влияния угловой расходимости — коэффициент

$$\gamma_\beta = \frac{\int_0^{\pi/2} d\beta \sin \beta \cos \beta j_i(\beta, 0)}{\int_0^{\pi/2} d\beta \sin \beta j_i(\beta, 0)} \quad (2)$$

который представляет собой среднее значение косинуса угла отклонения направлений вылета от оси.

Согласно полученным в [9] данным, значения  $\gamma_E$  и  $\gamma_\beta$  для названной модели КМ-88 монотонно возрастали с увеличением разрядного напряжения. Приведены также данные по коэффициенту использования рабочего вещества в ускорительном канале двигателя  $\eta_m$ , который определялся из сопоставления экспериментально полученных значений тягового КПД  $\eta_T$  и параметров  $\gamma_E$ ,  $\gamma_\beta$  и  $\eta_I = \frac{I_i}{I_d}$ , где  $I_i$  и  $I_d$  — соответственно ток ионов, истекающих из двигателя, и разрядный ток.

Следует отметить, что коэффициенты  $\gamma_E$  и  $\gamma_B$  недостаточно полно учитывают влияние расходимости струи и других факторов на потери тяги и снижение тягового кпд. Действительно, представляется более правильным характеризовать влияние расходимости ионного потока на потери тяги отношением среднего по струе значения продольной составляющей скорости ионов  $\langle V_{iz} \rangle$ , определяющего тягу двигателя, к среднему значению скорости ионов  $\langle V_i \rangle$ :

$$\eta_{BT} = \frac{\langle V_{iz} \rangle}{\langle V_i \rangle}. \quad (3)$$

Поскольку коэффициент  $\gamma_B$  рассчитывается без учета распределения названных скоростей по струе, то значения  $\gamma_B$  и  $\eta_{BT}$  в принципе должны отличаться, и представляет интерес оценить их разницу.

Что касается коэффициента  $\gamma_E$ , то в числителе выражения (1) по существу стоит величина, пропорциональная среднему значению продольной составляющей скорости ионов для всей струи, если не учитывать неравномерности распределения плотности тока по направлениям их вылета. В знаменателе же стоит величина, пропорциональная возможному значению скорости ионов, если бы все они имели скорость  $V_i = \sqrt{\frac{2eU_d}{M}}$ .

Таким образом, этот коэффициент может дать обобщенную характеристику потерь, но не позволяет детализировать составляющие потерь. В частности, он не позволяет выделить влияние разброса ионов по скоростям и неполноты использования приложенной разности потенциалов на ускорение ионов.

Известны и другие подходы к определению взаимосвязи параметров струи и тяговой эффективности ускорителя и двигателя. Так, в [10] было приведено выражение для „анодного“ (рассчитанного без учета расхода через катод) тягового кпд двигателя  $\eta_T$  в предположении отсутствия многозарядных ионов

$$\eta_T = \frac{\dot{m}_a \langle V_z \rangle^2}{2N_d} \approx \eta_{TP} = \frac{I_i}{I_d} \eta_m \eta_\beta \eta_V \eta_\epsilon. \quad (4)$$

Стоящие в правой части выражения (4) коэффициенты  $\eta_m = \dot{m}_i / \dot{m}_a$ ,  $\eta_\beta = \langle V_{iz} \rangle^2 / \langle V_i \rangle^2$ ,  $\eta_V = \langle V_i \rangle^2 / \langle V_i^2 \rangle$  и  $\eta_\epsilon = \langle \epsilon_i \rangle / eU_d$  отражают влияние на величину тягового кпд соответственно неполноты использования потока рабочего газа в ускорительном канале (неполноты переработки атомов в ионы), угловой расходимости струи, разброса ионов по скоростям и неполноты использования разрядного напряжения на ускорение ионов. Величины  $\dot{m}_a$ ,  $\dot{m}_i$ ,  $\langle V_z \rangle$ ,  $\langle V_i^2 \rangle$ ,  $N_d$ ,  $U_d$ ,  $I_i$ ,  $I_d$  и  $\langle \epsilon_i \rangle$  есть соответственно массовый расход рабочего газа через ускорительный канал (анод), массовый расход в виде ионов, среднемассовое значение продольной составляющей скорости частиц, среднее значение квадрата скорости ионов, разрядная мощность, разрядное напряжение, ионный ток на выходе из ускорителя, разрядный ток и среднее значение энергии ионов.

Выражение (4) получено без учета многозарядных ионов, долю которых во всей струе измерить сложно.

Поэтому обычно делается ряд допущений с целью оценить влияние многозарядных ионов на характеристики двигателя. Простейшими среди них являются допущения о наличии в струе только однозарядных и двузарядных ионов и об идентичности для однозарядных и многозарядных ионов пространственных распределений потоков ионов и распределений ионов по энергии, приведенной к единице заряда. Тогда в выражение (4) можно добавить еще один множитель, а именно

$$\eta_{\nu\mu} = \frac{[1 + (\sqrt{2} - 1)\mu_2]^2}{(1 + \mu_2)^2}, \quad (5)$$

где  $\mu_2$  — доля двузарядных ионов.

При наличии результатов измерений хотя бы в одной точке струи можно оценить влияние двузарядных ионов, полагая, что она одинакова во всей струе.

Делались также попытки оценки усредненной доли двузарядных ионов по совокупности измерений характеристик струи и интегральных параметров двигателя (см., например, [7,11]). В настоящей работе эти попытки продолжены, а именно как и в некоторых других работах, проведены измерения с помощью электростатического энергоанализатора на сферической контрольной поверхности с радиусом  $R$  и с центром в точке пересечения оси двигателя с выходной плоскостью ускорительного канала, распределений плотности тока ионов  $j(R, \beta)$  по углу отклонения направлений вылета ионов от оси и функция распределения  $f(R, \beta, U_a)$  по энергии  $\epsilon_i$  или по соответствующему ей потенциалу  $U_a = \epsilon_i / e$  для ионов, движущихся по направлению с углом отклонения  $\beta$  от оси двигателя. Полагая, что все ионы истекают из упомянутого центра, что в струе присутствуют только однозарядные и двузарядные ионы, что доля двузарядных ионов  $\mu_2$  постоянна во всей струе и что функции распределения ионов по углу отклонения направлений их вылета от оси и по энергии, приведенной к единице заряда, одинаковы для однозарядных и двузарядных ионов, движущихся вдоль одного направления можно использовать следующие выражения для оценки параметров ионного потока:

— полный ионный ток ускоренных ионов в струе:

$$I_i = \int_0^{\pi/2} 2\pi R^2 j_i(R, \beta) \sin \beta d\beta; \quad (6)$$

— полуугол расходимости потока ускоренных ионов  $\beta_\gamma$ , соответствующий конусу, с центром, совпадающим с центром упомянутой окружности и осью, совпадающей с осью двигателя, в пределах которого распространяется доля  $\gamma$  ионов, где

$$\gamma = \frac{1}{I_i} \int_0^{\beta_\gamma} 2\pi R^2 j_i(R, \beta) \sin \beta d\beta; \quad (7)$$

— доля однозарядных и двузарядных ионов соответственно  $\mu_1$  и  $\mu_2$

$$\mu_1 = \frac{\dot{m}_{i1}}{\dot{m}_i}, \quad \mu_2 = \frac{\dot{m}_{i2}}{\dot{m}_i}, \quad \mu_1 + \mu_2 = 1, \quad (8)$$

где  $\dot{m}_i$  — общий расход массы в виде ионов,  $\dot{m}_{i1}$  и  $\dot{m}_{i2}$  — расход массы в виде однозарядных и двузарядных ионов соответственно;

— коэффициент использования рабочего газа в ускорительном канале

$$\eta_m \approx \frac{I_i M}{\dot{m}_a e (1 + \mu_2)}, \quad (9)$$

где  $\dot{m}_a$ ,  $M$  и  $e$  — соответственно массовый расход через ускорительный канал, масса иона и заряд электрона;

— средние энергии однозарядных и двузарядных ионов, движущихся по направлению  $\beta$ , соответственно  $\langle \varepsilon_{i1} \rangle$  и  $\langle \varepsilon_{i2} \rangle$ :

$$\langle \varepsilon_{i1} \rangle(\beta) = \int_0^\infty e U_a f(R, \beta, U_a) dU_a,$$

$$\langle \varepsilon_{i2} \rangle(\beta) = \int_0^\infty 2e U_a f(R, \beta, U_a) dU_a = 2 \langle \varepsilon_{i1} \rangle(\beta); \quad (10)$$

— средние скорости однозарядных и двузарядных ионов, движущихся по направлению  $\beta$ , соответственно  $\langle V_{i1} \rangle$  и  $\langle V_{i2} \rangle$ :

$$\langle V_{i1} \rangle(\beta) = \int_0^\infty \sqrt{\frac{2eU_a}{M}} f(R, \beta, U_a) dU_a$$

$$\langle V_{i2} \rangle(\beta) = \int_0^\infty \sqrt{\frac{4eU_a}{M}} f(R, \beta, U_a) dU_a; \quad (11)$$

— средние значения осевых составляющих скоростей однозарядных и двузарядных ионов, движущихся по направлению  $\beta$ , соответственно  $\langle V_{iz1} \rangle$  и  $\langle V_{iz2} \rangle$ :

$$\langle V_{iz1} \rangle(\beta) = \int_0^\infty \sqrt{\frac{2eU_a}{M}} \cos \beta f(R, \beta, U_a) dU_a,$$

$$\langle V_{iz2} \rangle(\beta) = \int_0^\infty \sqrt{\frac{4eU_a}{M}} \cos \beta f(R, \beta, U_a) dU_a; \quad (12)$$

— среднеквадратичные скорости однозарядных и двузарядных ионов, движущихся по направлению  $\beta$ , соответственно  $\langle V_{i1}^2 \rangle$  и  $\langle V_{i2}^2 \rangle$ :

$$\langle V_{i1}^2 \rangle(\beta) = \int_0^\infty \frac{2eU_a}{M} f(R, \beta, U_a) dU_a,$$

$$\langle V_{i2}^2 \rangle(\beta) = \int_0^\infty \frac{4eU_a}{M} f(R, \beta, U_a) dU_a; \quad (13)$$

— средняя энергия ионов, движущихся по направлению  $\beta$ ,

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon_i \rangle(\beta) &= \mu_1 \langle \varepsilon_{i1} \rangle(\beta) + \mu_2 2 \langle \varepsilon_{i1} \rangle(\beta) \\ &= (\mu_1 + 2\mu_2) \langle \varepsilon_{i1} \rangle(\beta) = (1 + \mu_2) \langle \varepsilon_{i1} \rangle(\beta); \end{aligned} \quad (14)$$

— средняя скорость ионов, движущихся по направлению  $\beta$ ,

$$\begin{aligned} \langle V_i \rangle(\beta) &= \mu_1 \langle V_{i1} \rangle(\beta) + \mu_2 \langle V_{i2} \rangle(\beta) \\ &= \int_0^\infty \left( \mu_1 \sqrt{\frac{2eU_a}{M}} + \mu_2 \sqrt{\frac{4eU_a}{M}} \right) f(R, \beta, U_a) dU_a; \end{aligned} \quad (15)$$

— среднее значение осевой составляющей скорости ионов, движущихся по направлению  $\beta$ ,

$$\begin{aligned} \langle V_{iz} \rangle &= (\beta) \mu_1 \langle V_{iz1} \rangle(\beta) + \mu_2 \langle V_{iz2} \rangle(\beta) \\ &= \int_0^\infty \left( \mu_1 \sqrt{\frac{2eU_a}{M}} + \mu_2 \sqrt{\frac{4eU_a}{M}} \right) \cos \beta f(R, \beta, U_a) dU_a; \end{aligned} \quad (16)$$

— среднеквадратичная скорость ионов, движущихся по направлению  $\beta$ ,

$$\begin{aligned} \langle V_i^2 \rangle(\beta) &= \mu_1 \langle V_{i1}^2 \rangle(\beta) + \mu_2 \langle V_{i2}^2 \rangle(\beta) \\ &= \int_0^\infty \left( \mu_1 \frac{2eU_a}{M} + \mu_2 \frac{4eU_a}{M} \right) f(R, \beta, U_a) dU_a; \end{aligned} \quad (17)$$

— средняя скорость ионов для всей струи

$$\langle V_i \rangle = \frac{2\pi R^2}{I_i} \int_0^{\pi/2} \langle V_i \rangle(\beta) j_i(R, \beta) \sin \beta d\beta; \quad (18)$$

— среднее значение осевой составляющей скорости ионов для всей струи

$$\langle V_{iz} \rangle = \frac{2\pi R^2}{I_i} \int_0^{\pi/2} \langle V_{iz} \rangle(\beta) j_i(R, \beta) \sin \beta d\beta; \quad (19)$$

— среднеквадратичная скорость ионов для всей струи

$$\langle V_i^2 \rangle = \frac{2\pi R^2}{I_i} \int_0^{\pi/2} \langle V_i^2 \rangle(\beta) j_i(R, \beta) \sin \beta d\beta; \quad (20)$$

— полная кинетическая мощность ускоренного потока ионов

$$W_i = \frac{I_i}{e} \langle \varepsilon_i \rangle; \quad (20)$$

— коэффициенты  $\eta_\beta = \langle V_{iz} \rangle^2 / \langle V_i \rangle^2$ ,  $\eta_V = \langle V_i^2 \rangle / \langle V_i \rangle^2$  и  $\eta_\varepsilon = \langle \varepsilon_i \rangle / eU_a$ .

Для оценки доли двузарядных ионов и остальных приведенных выше параметров использовалось еще одно соотношение:

$$gI_{sp} = \eta_m \langle V_{iz} \rangle, \quad (22)$$

где  $g$  и  $I_{sp} = F/g\dot{m}_a$  — соответственно ускорение свободного падения тел на Земле и значение удельного импульса тяги, рассчитанное по измеренным значениям тяги  $F$  и расхода  $\dot{m}_a$  рабочего газа через ускорительный канал.

Оценку доли  $\mu_2$  двузарядных ионов можно сделать, варьируя ее значение и рассчитывая все приведенные выше параметры, подобрать такое ее значение, которое обеспечит выполнение соотношения (22). Естественно, для получения приемлемых результатов необходимо обеспечить достаточно точные измерения характеристик струи и интегральных параметров двигателя, что удается не всегда. В следующем разделе приведены примеры, когда это удавалось сделать, что подтверждает приемлемость изложенного подхода. В этом случае можно получить не только характеристики струи, но и оценку приведенных выше коэффициентов, характеризующих взаимосвязь интегральных параметров струи и тяговой эффективности двигателя. С учетом изложенного, целями настоящей работы являлись выявление новых и уточнение обнаруженных ранее закономерностей изменения характеристик струи двигателей двух размеров при изменении режима их работы и выявление взаимосвязи характеристик струи и тяговой эффективности двигателя.

## 2. Методика и основные результаты исследований

Исследование характеристик струи было проведено для лабораторных моделей двигателей типа СПД-100 и СПД-140, созданных на основе УЗДП с наружными диаметрами ускорительного канала соответственно 100 и 140 mm, работающих на оптимизированных по токам в катушках намагничивания режимах работы при разрядных напряжениях до 1000 V. Оптимизация названных токов обычно производится для того, чтобы минимизировать ток электронов из катода в разряд и разрядный ток, что, как правило, обеспечивает и наивысшую тяговую эффективность двигателя. Как уже отмечалось, в процессе исследования на каждом режиме работы определялись распределения тока ускоренных ионов в плоскости, проходящей через ось двигателя, по углу отклонения направления измерений от оси двигателя  $j(R, \beta)$  и распределения  $f(R, \beta, U_a)$  по энергии ионов, движущихся по направлению с углом отклонения от оси  $\beta$ . Измерения осуществлялись с помощью электростатического зонда — энергоанализатора, который перемещался в струе вдоль окружности, лежащей в плоскости, проходящей через ось двигателя, с радиусом  $R = 0.7$  m и с центром в точке пересечения оси двигателя с плоскостью среза ускорительного канала (рис. 2).

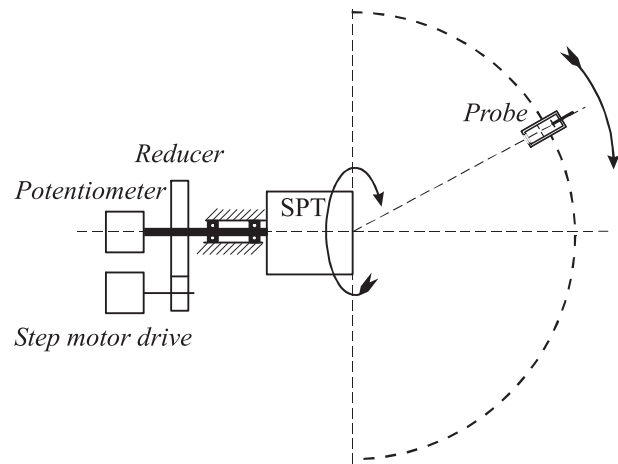


Рис. 2. Схема движения зонда при измерениях.

В режиме измерения распределения плотности тока ускоренных ионов на анализирующую сетку энергоанализатора подавалось смещение потенциала порядка +50 V относительно катода, обеспечивающих смещение этой сетки на +20–+30 V относительно потенциала плазмы в струе с целью отсечки тока „плазменных ионов“, и энергоанализатор перемещался с постоянной скоростью в пределах углов отклонения от оси  $\pm 70^\circ$ . При этом фиксировалось порядка 1000 значений тока на коллектор зонда и столько же соответствующих сигналов положения зонда. Для определения функции распределения ионов по энергии энергоанализатор останавливался в 15–20 положениях с разными углами  $\beta$  отклонения направлений измерения от оси двигателя и снималась „тормозная“ характеристика энергоанализатора при каждом угле, обработка которой позволяла получать распределение ионов по энергии с учетом разницы опорного потенциала энергоанализатора и потенциала плазмы.

Полученные результаты свидетельствуют о следующем:

1. Общие тенденции увеличения плотности тока при увеличении разрядного напряжения сводятся к увеличению плотности тока в приосевой части струи, что совпадает с результатами, полученными ранее в других работах. Характер изменения распределения более наглядно можно проследить, построив относительные распределения плотности тока. Как видно, при увеличении разрядного напряжения отчетливо наблюдается „сужение“ струи, и эта тенденция является общей для моделей разного размера и аналогична полученной ранее (рис. 3). При этом расходимость струи уменьшается при увеличении напряжения до 500–700 V, а затем стабилизируется или несколько возрастает (рис. 4). Как было показано ранее [6], изменение характера этой зависимости при напряжениях более 700 V связано с заметными изменениями в работе двигателя. Следует отметить, что напряжение, при котором происходят

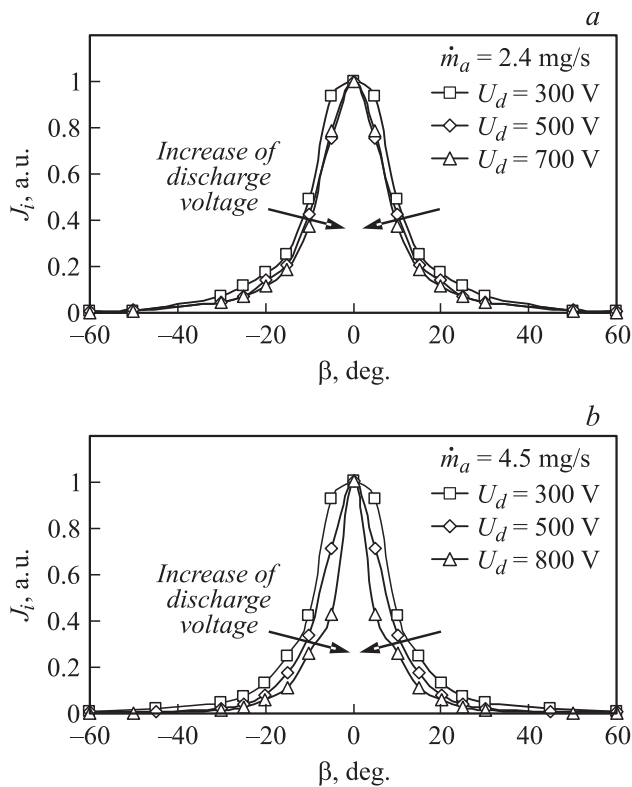


Рис. 3. Относительные распределения плотности ионного тока в струях моделей типа СПД-100 (а) и СПД-140 (b).

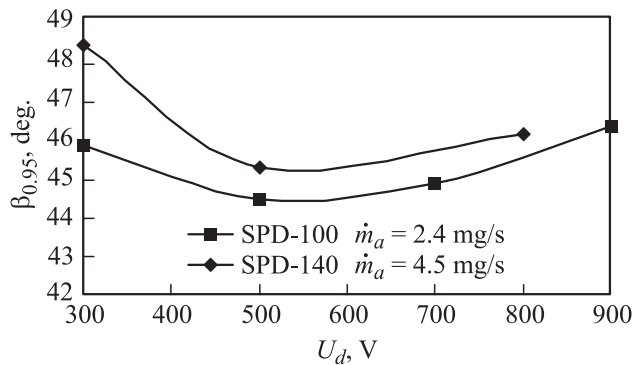


Рис. 4. Зависимость угла расходимости струи для 95% тока ускоренных ионов от разрядного напряжения.

названные изменения, зависит, очевидно, от конструктивных особенностей модели двигателя.

С учетом того, что в работах [6–8] по существу были получены аналогичные результаты, можно считать отмеченную закономерность уменьшения расходимости струи при увеличении разрядного напряжения до определенного уровня общей для рассматриваемого типа ускорителей и двигателей разных размеров.

2. Результаты определения распределений ионов по энергии свидетельствуют о том, что по мере увеличения угла отклонения направлений измерения от оси двигателя, как и ранее [4,8], наблюдается уменьшение высоко-

энергетической части рассматриваемого распределения. При этом с увеличением разрядного напряжения в ядре потока (при малых  $\beta$ ) отчетливо прорисовывается высокоэнергетическая часть распределения, и ширина распределения слабо изменяется с увеличением разрядного напряжения (рис. 5). Это свидетельствует о том, что падение потенциала в зоне ионизации не очень сильно изменяется с увеличением разрядного напряжения, а с увеличением напряжения возрастает в основном падение напряжения в зоне ускорения.

3. Рассмотрение характера изменения распределения средней энергии ионов по углу отклонения направлений измерения от оси двигателя свидетельствует о том, что помимо общего возрастания средней энергии ионов с увеличением разрядного напряжения обращает на себя внимание большая относительная величина этой энергии при малых расходах и разрядных напряжениях на периферии струи модели типа СПД-100 (рис. 6, а). Это менее заметно в струе модели типа СПД-140 (см. рис. 6, b), что связано, очевидно, с тем, что данные

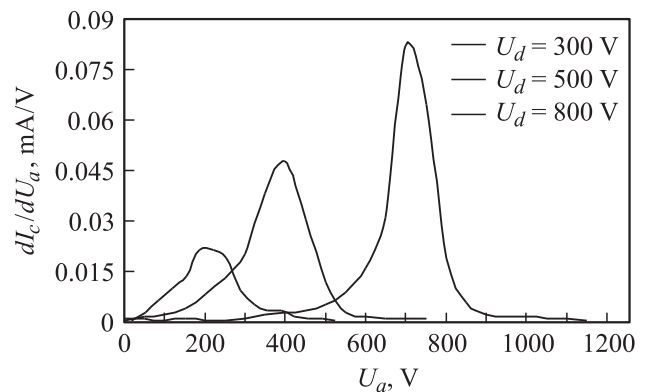


Рис. 5. Изменение функции распределения ионов по энергии в струе модели СПД-140 от разрядного напряжения при  $\beta = 0$ .

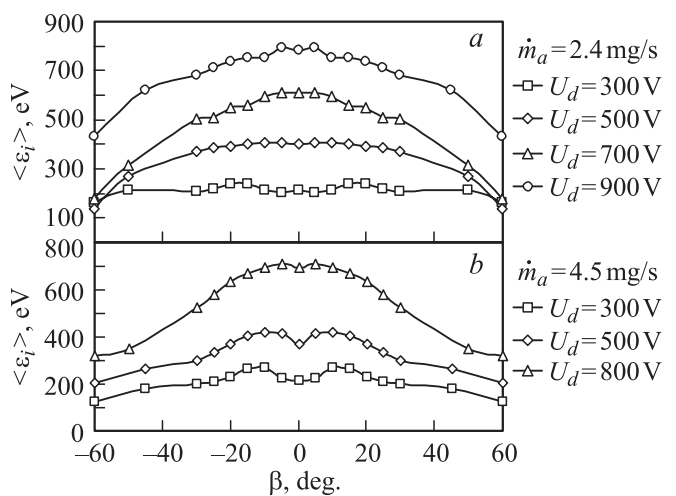
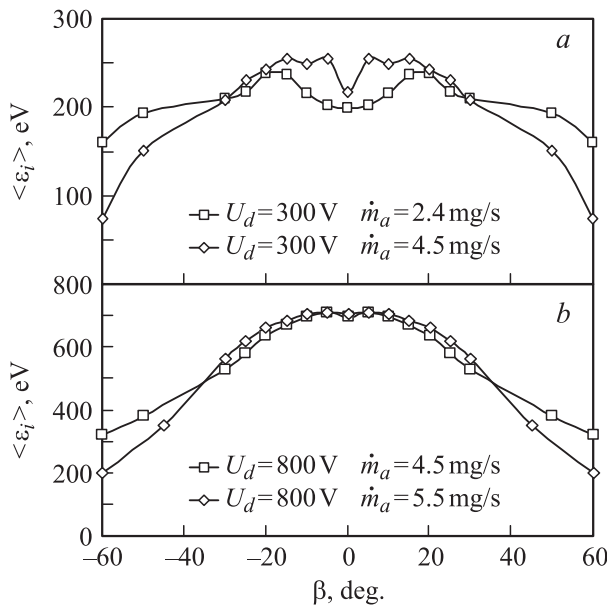


Рис. 6. Распределение средней энергии ионов по углу отклонения направлений измерения от оси модели типа СПД-100 (а) и модели СПД-140 (b) при разных разрядных напряжениях.



**Рис. 7.** Распределение средней энергии ионов в струе модели типа СПД-100 (а) и модели СПД-140 (б) при разных расходах рабочего газа через ускорительный канал.

получены при несопоставимых расходах рабочего газа через ускорительный канал.

Поскольку на названные распределения влияют как расход рабочего газа, так и разрядное напряжение, представляло интерес отдельно рассмотреть влияние расхода рабочего газа (рис. 7).

Полученные данные позволяют сделать вывод о том, что с уменьшением расхода газа через ускорительный канал средняя энергия ионов в приосевых частях струи уменьшается, а в периферийных частях струи возрастает. С увеличением расхода тенденции противоположны, т. е. энергия ионов в периферийных частях струи уменьшается. В совокупности с отмеченной ранее тенденцией „сужения“ струи с увеличением расхода рабочего газа через ускорительный канал уменьшение энергии ионов в периферийных частях струи свидетельствует об улучшении качества фокусировки ионного потока в двигателе с увеличением названного расхода.

4. По взаимосвязи тяговой эффективности и интегральных параметров струи можно отметить следующее:

4.1. Величина суммарного тока ионов, истекающих из двигателя, при повышенных разрядных напряжениях заметно превышает ток  $I_m = (\dot{m}_a/M)e$ , эквивалентный расходу рабочего газа через ускорительный канал, что свидетельствует о наличии многозарядных ионов в струе (таблица).

4.2. Отношение ионного тока  $I_i$  к разрядному току  $I_d$  составляет примерно 0.8 для модели СПД-100 и слабо изменяется с увеличением разрядного напряжения, а для модели СПД-140 оно составляет примерно 0.9, что свидетельствует о более эффективной работе последнего (см. таблицу).

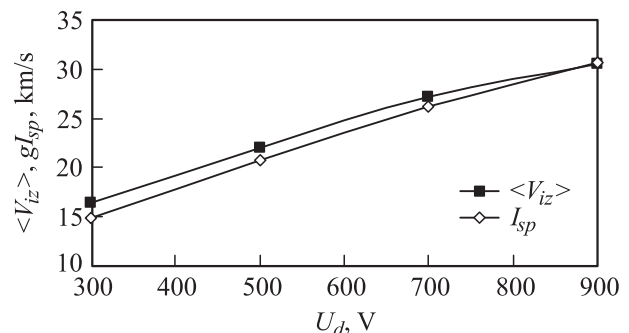
Как будет показано ниже, более эффективная работа модели СПД-140 подтверждается и прямыми измерениями тяговой эффективности двигателя.

4.3. По полученным данным и результатам прямого измерения тяговой эффективности с использованием приведенных в разд. 1 соотношений были рассчитаны основные интегральные параметры струи и оценена доля двухзарядных ионов (см. таблицу). Согласно результатам расчетов, при повышенных разрядных напряжениях доля двухзарядных ионов может составлять до 20%.

4.4. Средняя энергия ионов возрастает с увеличением разрядного напряжения, при этом характер ее изменения практически одинаков в моделях СПД-100 и СПД-140 (см. таблицу). Возрастает, естественно, и среднее значение продольной составляющей скорости ионов, которую можно сопоставить со скоростью, измеренной по тяге и соответствующей так называемому удельному импульсу тяги  $I_{sp}$  (см. рис. 8).

4.5. Коэффициент использования рабочего газа  $\eta_m$  возрастает с увеличением разрядного напряжения до значений, близких к единице (см. таблицу). Коэффициент  $\eta_v$  имеет достаточно большую величину и слабо изменяется по напряжению, что свидетельствует о слабом влиянии разброса ионов по скоростям на тяговую эффективность.

Наибольшее влияние на величину тяговой эффективности оказывают неполнота использования рабочего газа (при малых расходах и невысоких разрядных напряжениях), расходимость струи и „неполнота использования приложенной разности потенциалов на ускорение ионов“, характеризующая потери энергии на ионизацию и возбуждение атомов, потери на стенках разрядной камеры и затраты на получение и доставку электронов в разряд двигателя, а также на транспортировку всех электронов в канале к аноду. К сказанному следует добавить, что различия в значениях  $\eta_{\beta T}$  и  $\gamma_{\beta}$  могут доходить до 1.5%, а значения  $\eta_{\beta} = \eta_{\beta T}^2$  больше, чем  $\gamma_{\beta}^2 = \langle \cos \beta \rangle^2$ , и разница может составлять 3%. Как видно, отмеченная разница невелика, поэтому для оценок влияния расходимости струи на потери тяги и тягового



**Рис. 8.** Зависимость среднего значения продольной составляющей скорости ионов и скорости, рассчитанной по измеренному значению удельного импульса тяги, от разрядного напряжения.

Характеристики струй моделей СПД-100 и СПД-140, работающих в различных режимах

$\dot{m}_a, \text{mg/s}$	$U_d, \text{V}$	$\langle \varepsilon_i \rangle, \text{eV}$	$I_i/I_d$	$I_i/I_m$	$\mu_2$	$\eta_m$	$\gamma_\beta$	$\eta_{\beta T}$	$\eta_\beta$	$\eta_V$	$\eta_\varepsilon$	$\eta_T$	$\eta_{PT}$
Модель СПД-100													
2.53	307	223	0.81	0.93	0.022	0.91	0.93	0.93	0.86	0.96	0.73	0.42	0.44
2.53	492	406	0.83	1.01	0.066	0.94	0.92	0.93	0.86	0.96	0.83	0.48	0.53
2.53	695	606	0.80	1.07	0.105	0.96	0.93	0.94	0.88	0.95	0.87	0.49	0.57
2.53	886	843	0.79	1.18	0.186	1.00	0.89	0.90	0.81	0.94	0.95	0.47	0.58
Модель СПД-140													
4.95	299	249	0.82	1.02	0.089	0.93	0.92	0.93	0.87	0.95	0.83	0.47	0.53
4.95	510	443	0.90	1.12	0.160	0.97	0.94	0.95	0.90	0.95	0.87	0.53	0.64
4.95	802	783	0.92	1.20	0.201	0.99	0.94	0.95	0.90	0.93	0.98	0.59	0.74

кпд можно пользоваться значениями  $\gamma_\beta$  и  $\gamma_\beta^2 = \langle \cos \beta \rangle^2$ . Однако для более точных расчетов следует пользоваться коэффициентами  $\eta_{\beta T}$  и  $\eta_\beta = \eta_{\beta T}^2$ .

Полученные коэффициенты, отражающие зависимость различных составляющих потерь, могут быть использованы и для расчета тягового кпд по соотношению (4). Сравнение их с результатами прямых измерений позволяет оценить значимость погрешностей определения интегральных параметров струи по результатам измерения ее характеристик и погрешностей, обусловленных принятыми допущениями. Результаты расчетов (см. таблицу) свидетельствуют о том, что имеет место заметное отличие значений тягового кпд, рассчитанных с использованием измерений в струе, от полученных в результате прямых измерений тяги, хотя тенденции их изменения при увеличении разрядного напряжения близки по характеру.

Как видно, отличие значений тягового кпд, полученных с использованием измерений в струе двигателя и путем прямых измерений тяги, тем больше, чем выше разрядное напряжение. По совокупности представленных данных представляется, что наибольшую ошибку вносит, по-видимому, неточность измерения полного тока ускоренных ионов, поскольку, например, для модели типа СПД-100 при напряжении 900 V получается значение  $\eta_m \sim 1$ , а среднее значение продольной составляющей скорости ионов практически равно измеренному значению, что нереально. Поэтому представляется, что, повысив точность измерения таких параметров как полный ток ускоренных ионов и др., а также введя в рассмотрение трехзарядные ионы, можно будет получить лучшую сходимость рассмотренных результатов.

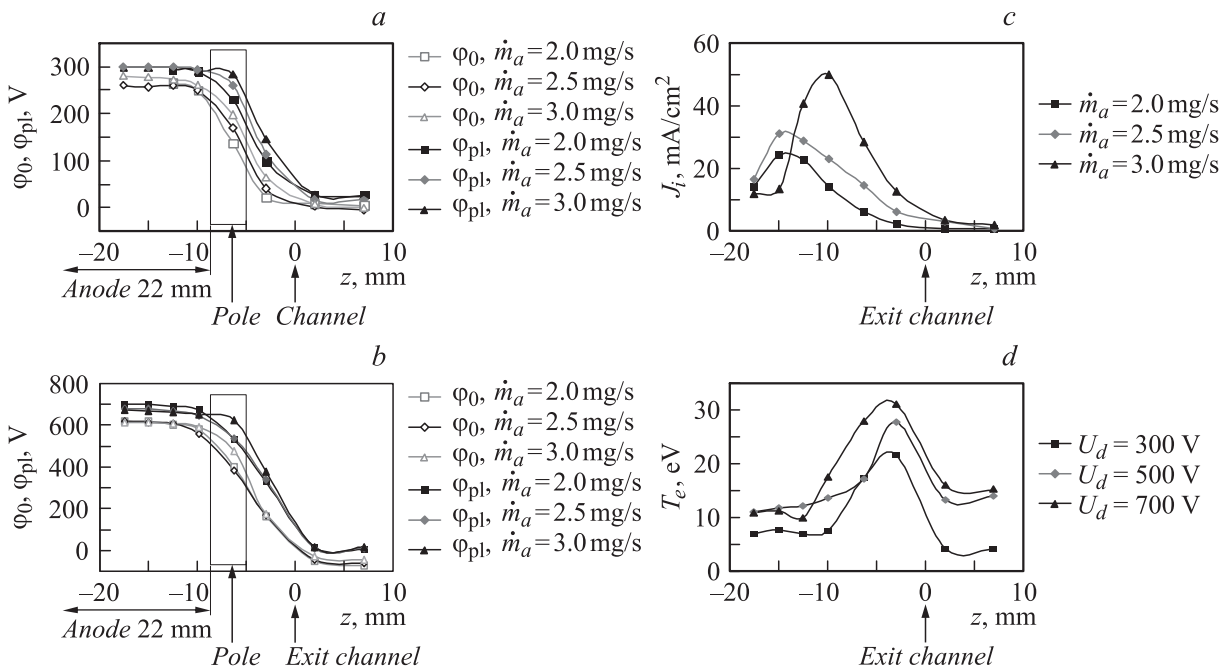
### 3. Некоторые дополнительные замечания

Переходя к обсуждению полученных данных, следует отметить, что к настоящему времени проведено мало измерений, которые могли бы быть использованы для анализа отмеченных выше закономерностей изменения характеристик струи СПД. К их числу можно отнести

результаты определения распределений локальных параметров плазмы вдоль ускорительного канала двигателя с помощью пристеночных зондов [12]. Полученные в этой работе результаты (рис. 9) свидетельствуют о том, что с уменьшением расхода рабочего газа через ускорительный канал происходит расширение зоны ионизации и ускорения к аноду, о чем свидетельствует соответствующее смещение зон, где начинается падение потенциала и достигается максимум ионного тока на зонд (рис. 9, c).

Кроме того, как видно из этого рисунка, максимумы ионного тока на пристеночные зонды достигаются в области, где продольное электрическое поле и соответственно падение потенциала в этой зоне еще малы. Поэтому, во-первых, положение зоны с максимальными значениями плотности тока на стенки может увязываться с положением „зоны ионизации“. Во-вторых, в этой зоне радиальное электрическое поле сопоставимо с продольным, и это поле приводит к тому, что ионам в зоне ионизации сообщаются значительные радиальные скорости. Это было подтверждено измерениями еще в работе [13] и служит объяснением значительной расходимости ионов в струях одноступенчатых УЗДП. Кроме того, упомянутое смещение слоя ионизации и ускорения должно приводить к увеличению доли ионов, выпадающих на стенки разрядной камеры, нейтрализующихся на ней и повторно ионизирующихся в выходной части. Последние имеют больше возможностей разлететься на большие углы без повторных столкновений со стенками. Таким образом, результирующий ионный поток при малых расходах должен иметь большую расходимость. Отмеченные тенденции могут служить и объяснением уменьшения энергии ионов в приосевой части струи и ее увеличения в периферийных частях при уменьшении расхода, отмеченного выше (см. рис. 6, 7). Действительно, если при малых расходах больше ионов попадает на стенки, то средняя энергия ионов, образовавшихся в результате повторной ионизации, будет меньше, и это проявляется в первую очередь в приосевой части струи, куда попадают ионы, образовавшиеся в центральной части канала.





**Рис. 9.** Распределения локальных параметров плазмы вдоль ускорительного канала модели СПД-100, полученные пристеночными зондами: *a* — потенциала плавления  $\varphi_0$  и потенциала плазмы  $\varphi_{pl}$  при  $U_d = 300$  В и различных расходах через ускорительный канал; *b* — потенциала плавления  $\varphi_0$  и потенциала плазмы  $\varphi_{pl}$  при  $U_d = 700$  В и различных расходах через ускорительный канал; *c* — плотности ионного тока на зонд при  $U_d = 700$  В и различных расходах через ускорительный канал; *d* — температуры электронов  $T_e$  при расходе через анод 2.5 мг/с и различных разрядных напряжениях.

Из приведенных данных видно также (см. рис. 9, *c*), что значения ионного тока на стенку максимальны в области канала, где величина падения потенциала не превышает 150–200 В (см. рис. 9, *b*). Это объясняет отмеченное выше малое изменение полуширины распределения ионов по энергии в приосевой области струи при разных напряжениях. Что касается уменьшения расходимости ионного потока с увеличением разрядного напряжения, то при постоянном расходе рабочего газа через ускорительный канал на расходимость может влиять и уровень температуры электронов, разный при разных разрядных напряжениях (рис. 9, *d*).

Действительно, если оценить характерное значение угла отклонения траекторий ионов от оси по возможной радиальной составляющей скорости ионов, рассчитанной по максимальной температуре электронов, измеренной, например, с помощью зондов

$$V_{ir} \sim \sqrt{\frac{kT_{e\max}}{e}}, \quad (23)$$

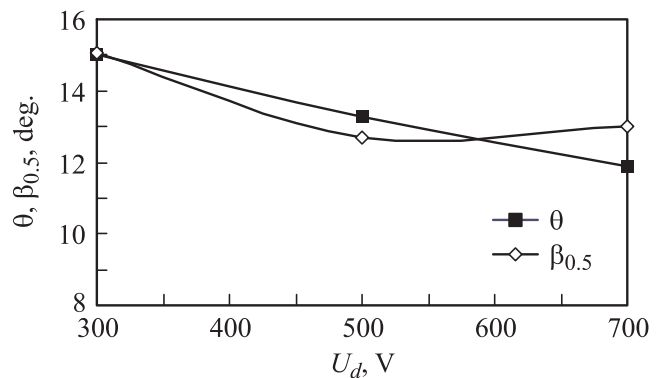
и оценить средний тангенс угла расходимости струи как

$$\text{tg } \theta = \frac{V_{ir}}{\langle V_{iz} \rangle}, \quad (24)$$

то можно сравнить значения  $\theta$  со значением угла расходимости „средней“ части ионного потока, для характеристики которого можно использовать величину  $\beta_{0.5}$ .

Как видно (рис. 10), характер зависимости  $\theta$  от разрядного напряжения до некоторого значения напряжения близок к соответствующей зависимости  $\beta_{0.5}$  от разрядного напряжения. Это подтверждает возможность использования эффекта „растаскивания“ ионов электронами как основного фактора, определяющего расходимость струи двигателя при умеренных значениях разрядного напряжения.

Таким образом, основные закономерности изменения характеристик струи СПД или УЗДП при изменении режима его работы являются достаточно общими для двигателей разных размеров и могут быть объяснены из-



**Рис. 10.** Зависимость значений  $\theta$  и  $\beta_{0.5}$  от разрядного напряжения.

менением процессов в ускорительном канале, приводящих к изменению распределений локальных параметров плазмы в этом канале.

## Заключение

Как следует из приведенных в работе данных, с увеличением разрядного напряжения и расхода рабочего газа через ускорительный канал в определенных пределах происходит „сужение“ струи ускорителей и двигателей разных размеров, что может быть объяснено перестройкой разряда и соответствующим изменением распределений локальных параметров плазмы в ускорительном канале. Кроме того, приведенные примеры подтверждают возможность оценки доли двузарядных ионов во всей струе по совокупности результатов определения характеристик струи и прямых измерений тяги двигателя, а также возможность анализа взаимосвязи интегральных параметров струи и потерь тяги и снижения тягового КПД с использованием результатов измерения ускоренных ионов в струе по направлениям их движения в струе и распределений по энергии ионов, движущихся в ней по различным направлениям.

## Список литературы

- [1] Козубский К.Н., Мурашко В.М., Рылов Ю.П. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 277–292.
- [2] Морозов А.И. // Физика плазмы. 2003. Т. 29. № 3. С. 261–276.
- [3] Асхабов С.Н., Бургасов М.П., Веселовзоров А.Н. и др. // Физика плазмы. 1981. Т. 7. № 1. С. 225–230.
- [4] Absalamov S.K., Andreev V.B., Colbert T., Day M. et al. // Paper AIAA-92-3156. 1992.
- [5] Manzella D.H., Sancovic J.M. // Paper AIAA-95-2927. 31<sup>st</sup> Joint Propulsion Conference. San Diego, CA, USA, 1995.
- [6] Kim V., Kozlov V., Popov G., Skrylnikov A., Sidorenko E., Umnitsin L. // Proc. of the 5<sup>th</sup> International spacecraft conference. Heraclion, Greece, 2008.
- [7] Kozubsky K., Kudryavtsev S., Pridannikov S. // Paper IEPC-99-073. 26<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference. Kitakyushu, Japan, 1999.
- [8] Azziz V., Martinez Sanchez M. // PhD thesis #17-07. MIT, USA, 2007.
- [9] Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А. Холлловские и ионные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2008. С. 279.
- [10] Kim V. // J. Propul. Power. 1998. Vol. 14. N 5. P. 736–743.
- [11] Albarede L., Bouchoule A., Lazurenko A., Kim V., Kozlov V., Skrylnikov A., Prioul M., Garrigues L. // Paper IEPC-2005-136. 29<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference. Princeton, USA, 2005.
- [12] Kim V., Kozlov V., Skrylnikov A. et al. // Paper IEPC-2007-151. 30<sup>th</sup> International Electric Propulsion Conference. Florence, Italy, 2007.
- [13] Бишаев А.М., Ким В. // ЖТФ. 1978. Т. 48. Вып. 9. С. 1853–1857.