

## Исследование формирования ионных потоков в переменных электрических полях стационарного плазменного двигателя

© А.Н. Веселовзоров, Е.Д. Длугач, А.А. Погорелов, Э.Б. Свирский, В.А. Смирнов

Национальный исследовательский центр „Курчатовский институт“,  
123182 Москва, Россия  
e-mail: vasmirnov@nfi.kiae.ru

(Поступило в Редакцию 10 сентября 2012 г.)

Представлена методика, которая позволяет исследовать функцию распределения составляющих скорости (радиальную  $V_r$  и азимутальную  $V_\phi$ ) ионов пучка. С помощью этой методики были проведены исследования потока ионов, выходящего из стационарного плазменного двигателя (СПД). Показано, что в пучке присутствуют ионы как с радиальной составляющей в диапазоне  $V_r/V_z = -1.2 - +0.74$ , так и с азимутальной составляющей скорости в диапазоне  $V_\phi/V_z = \pm 0.9$ . Численные расчеты позволили сделать вывод, что ионы набирают азимутальную составляющую скорости в поле азимутальной волны потенциала плазмы, которая развивается в канале СПД.

### Введение

Исследования потока ионов, вылетающих из СПД, выполненные ранее, в основном были ориентированы на изучение энергетического спектра ионов и расходимости пучка. Детальный анализ функции распределения составляющих скорости ионов не проводился. Предполагалось, что процесс расширения пучка определяется радиальной составляющей скорости  $V_r$ , которая появляется при движении ионов в электрическом поле, сформированном в канале двигателя. Известно, что оно в свою очередь зависит от конфигурации силовых линий магнитного поля и градиента электронного давления [1,2].

Проведенные исследования выявили, что в канале двигателя развиваются значительные по амплитуде колебания потенциала плазмы и температуры электронов [3,4], при этом колебания потенциала на частотах больше 50 kHz являются азимутальными волнами. Азимутальные волны могут стать причиной появления азимутальной составляющей скорости ионов  $V_\phi$  [5]. Расчеты показали, что колебания температуры электронов приводят к изменению конфигурации эквипотенциалов электрического поля. При движении ионов в таком поле радиальная составляющая их скорости должна увеличиваться.

Очевидно, детальное исследование функции распределения составляющих скорости ионов представляет практический интерес с точки зрения создания устройств с более высокими характеристиками, которые способны работать в большем диапазоне рабочих напряжений.

### 1. Экспериментальная установка и методики измерений

Экспериментальное исследование стационарного плазменного двигателя модели СПД-70 проводилось в НИЦ „Курчатовский институт“. Основные результаты были получены при работе на криптоне (Kr) в диапазоне

разрядных напряжений  $U_a = 200-400$  V, при этом расход рабочего вещества составлял 1.7 mg/s. Измерения проводились при оптимальном магнитном поле, при

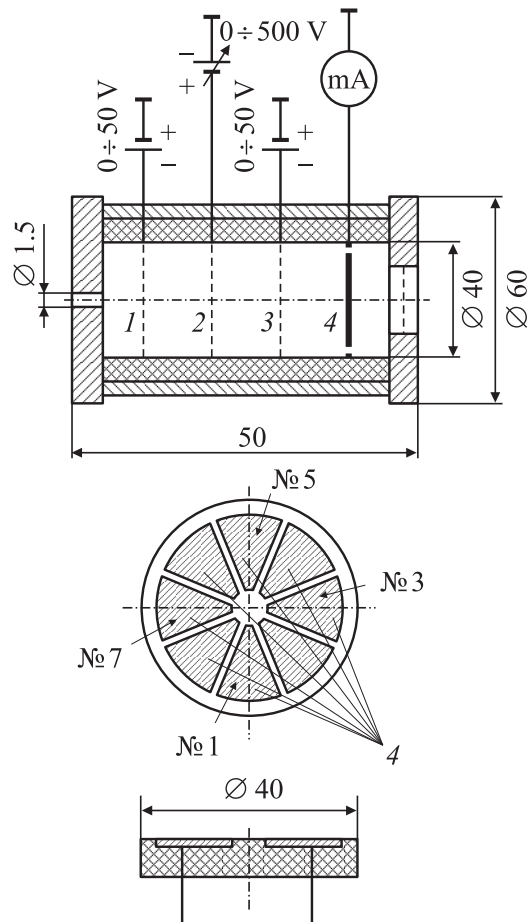
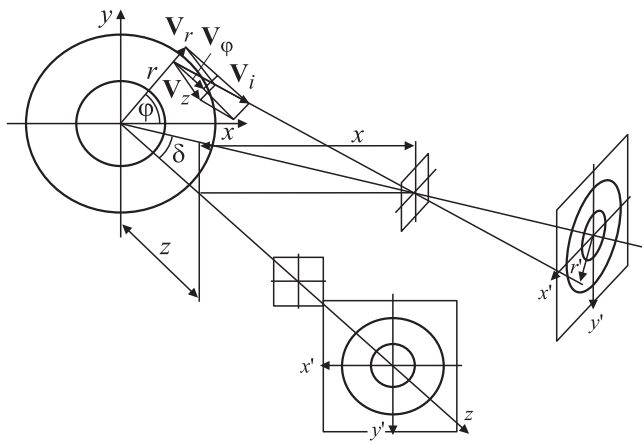


Рис. 1. Схема многосеточного зонда-анализатора с секционированным коллектором: 1 — сетка, отсекающая электроны, 2 — анализирующая сетка, 3 — антидинаatronная сетка, 4 — коллектор.



**Рис. 2.** Схема измерений азимутальной и радиальной составляющих скорости ионов.

котором разрядный ток принимал минимальное значение.

Для измерения радиальной и азимутальной составляющих скорости ионов был разработан модифицированный многосекционный зонд-анализатор, схема которого представлена на рис. 1 [6].

Модернизация заключалась в том, что приемник ионов (коллектор) был выполнен в виде 8 изолированных секторов, что позволяло измерять потоки ионов, приходящих под разными углами. Ионы попадали в анализатор через отверстие  $\varnothing = 1.5 \text{ mm}$ . Для того чтобы обеспечить выход нейтралов из анализатора, противоположная сторона его имела отверстие, затянутое сеткой. В процессе измерений секторы, с которых не проводилось измерение токов, заземлялись. Это устройство размещалось на подвижной каретке, которая могла перемещаться вдоль и поперек пучка.

Зонд-анализатор был ориентирован так, что вертикальная ось проходила через сектора 1 и 5, куда приходили ионы с максимальными азимутальными скоростями.

Можно показать [7], что для точки наблюдения (входного отверстия зонда), расположенной на расстоянии  $z$  от двигателя и на радиусе  $x$  от оси двигателя (рис. 2), справедливы следующие соотношения:

$$\frac{V_\phi}{V_z} = -\text{tg } \delta \sin \varphi, \quad \frac{V_r}{V_z} = \text{tg } \delta \cos \varphi - \frac{r}{z}, \quad (1)$$

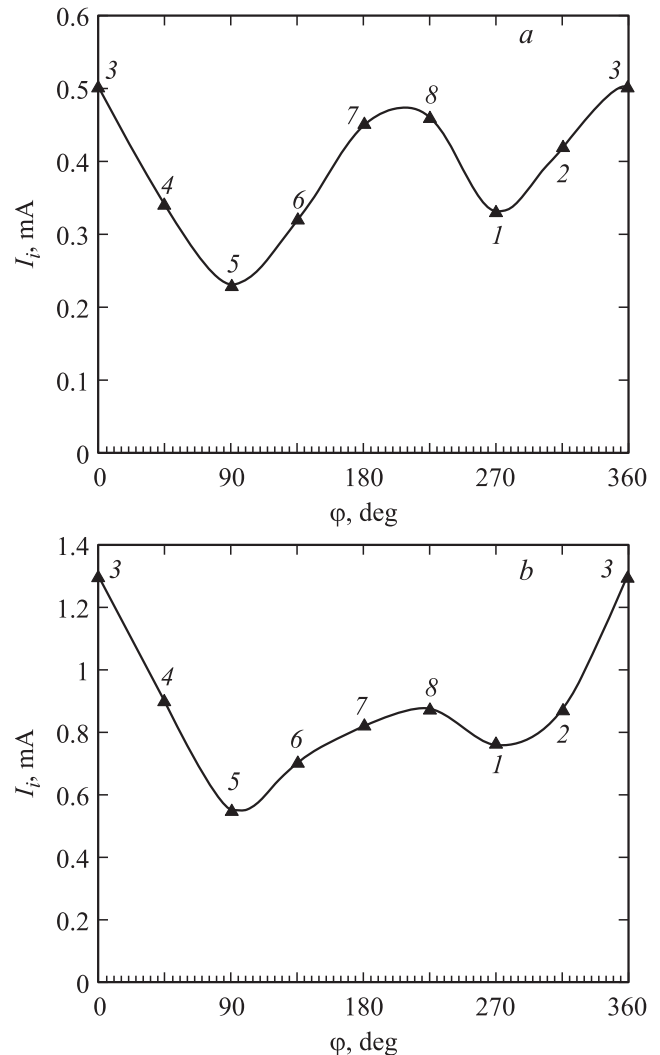
где  $\text{tg } \delta = x/z$ ;  $r, \varphi$  — координаты точек в выходном сечении двигателя.

Из приведенных соотношений видно, что, перемещая зонд относительно СПД по координатам  $z$  и  $x$ , можно регистрировать потоки ионов практически с любыми направлениями скоростей. Изменяя потенциал на анализирующей сетке зонда, можно было проводить анализ ионов по энергиям.

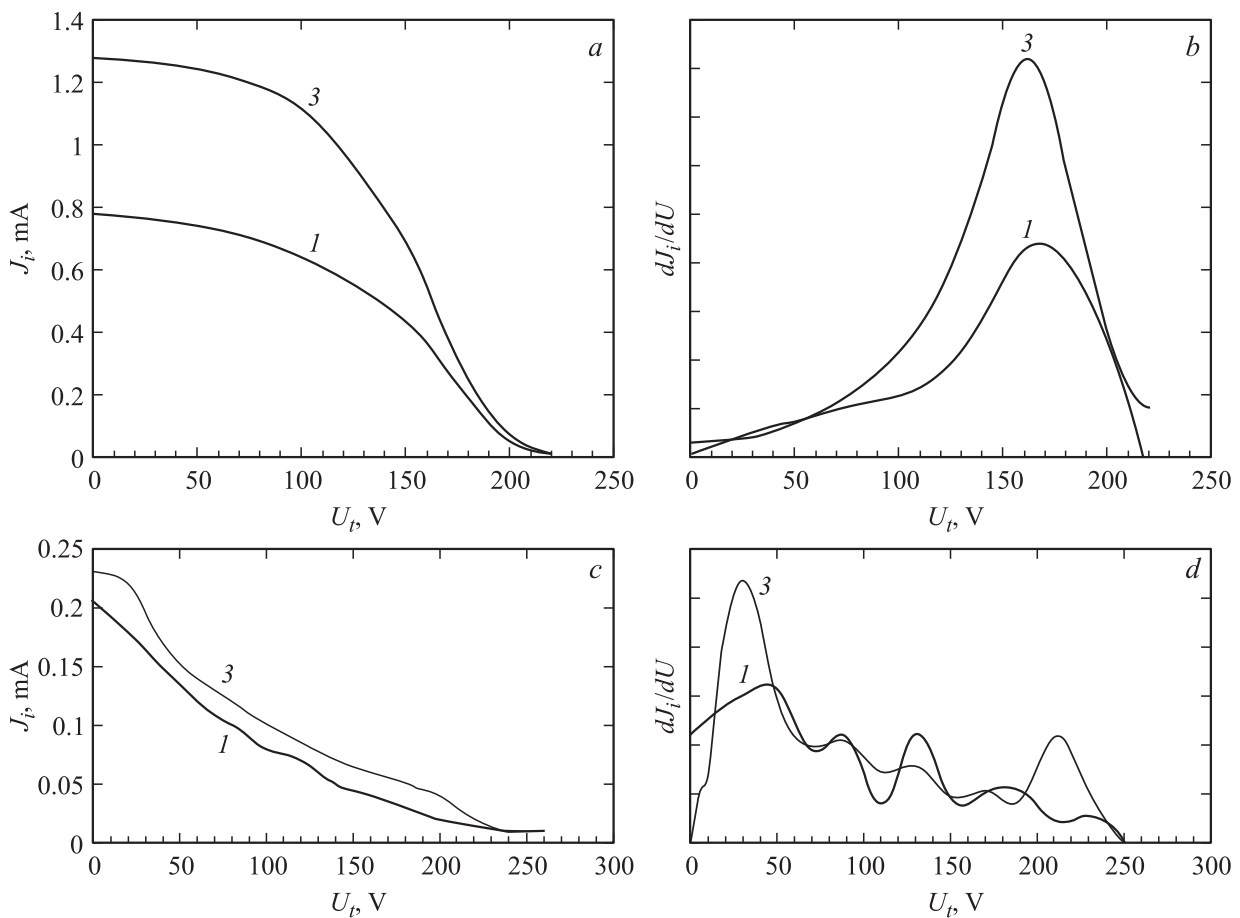
## 2. Экспериментальные результаты

### 2.1. Функция распределения составляющих скорости ионов

В ходе экспериментов при различных положениях зонда измерялись ионные токи, приходящие на различные секторы коллектора. Результаты этих измерений представлены на рис. 3. Видно, что токи ионов, поступающие на различные секторы, заметно отличаются. Токи ионов, которые имеют максимальные значения  $V_r/V_z$  (сектора 3, 7), заметно больше токов ионов, которые имеют максимальные значения  $V_\phi/V_z$  (сектора 1, 5). Обработка результатов измерений в соответствии с изложенной методикой показала, что в пучке присутствуют ионы как с радиальной, так и с азимутальной составляющей скорости во всем исследованном диапазоне  $V_r/V_z = -1.2 - +0.74$  и  $V_\phi/V_z = \pm 0.9$ .



**Рис. 3.** Распределения ионного тока по секторам коллектора многосекционного анализатора (цифрами обозначены номера секторов). *a* — на расстоянии  $z = 150 \text{ mm}$ ,  $x = -90 \text{ mm}$ . *b* — на расстоянии  $z = 150 \text{ mm}$ ,  $x = -60 \text{ mm}$ .



**Рис. 4.** Тормозные характеристики (*a, c*) и распределения ионов по энергиям (*b, d*): сектор *1* — для ионов с максимальными значениями  $V_\phi/V_z$  и минимальными значениями  $V_r/V_z$ , сектор *3* — для ионов с минимальными значениями  $V_\phi/V_z$  и максимальными значениями  $V_r/V_z$ .

На рис. 4, *a, c* приведены зависимости ионного тока  $J(U)$ , поступающего на секторы коллектора, для ионов с максимальными значениями  $V_\phi/V_z$  (сектор *1*) и  $V_r/V_z$  (сектор *3*) от величины потенциала на анализирующей сетке  $U_t$  для двух положений анализатора  $\delta = 22^\circ$  и  $\delta = 60^\circ$ . На рис. 4, *b, d* представлены энергетические спектры ионов  $dJ(U)/dU$ , полученные из этих зависимостей. Видно, что для этих групп ионов энергетические спектры близки, если они получены при одинаковых расположениях анализатора, однако они существенно отличаются для разных расположений анализатора. Видно, что спектр ионов, у которых  $V_\phi$  и  $V_r < V_z$ ,  $\delta = 22^\circ$ , является стандартным, т.е. большая часть ионов имеет энергию большую, чем  $2/3U_a$ , при этом доля медленных ионов незначительна. Спектр ионов, у которых  $V_\phi$  и  $V_r \geq V_z$ ,  $\delta = 60^\circ$ , сдвигается в область низких энергий, появляется значительная доля ионов, у которых энергия 20–100 эВ. Очевидно, такие ионы образуются в районе среза СПД.

Выполненные измерения подтверждают, что в пучке присутствуют ионы, у которых есть азимутальная составляющая скорости, причем ее величина сравнима с радиальной составляющей скорости.

## 2.2. Колебания ионного тока

Исследования колебаний ионного тока проводились с помощью цифрового осциллографа и набора фильтров, выделяющих полосу пропускания сигналов.

Колебания тока ионов, которые попадают на разные секторы коллектора, идентичны. Заметная амплитуда колебаний до 30% наблюдается в области низких частот  $f < 30$  kHz, эти колебания соответствуют колебаниям разрядного тока и, очевидно, вызваны неустойчивостью зоны ионизации.

Уровень колебаний для высокочастотных гармоник  $f > 100$  kHz существенно меньше, составляет только 5–10% как для ионов, у которых азимутальная скорость мала, так и для ионов, у которых азимутальная скорость максимальна. Незначительная модуляция тока ионов, имеющих большие азимутальные скорости, очевидно, объясняется тем, что эти ионы попадают на коллектор с полным набором фазовых сдвигов относительно начала воздействия на них азимутальных волн. Это происходит по нескольким причинам:

- азимутальное электрическое поле формируется из нескольких гармоник [3–5],

- зона ионизации занимает большую часть канала,
- время пролета ионов до места регистрации заметно больше, чем период азимутальных колебаний.

### 2.3. Расходимость пучка

Представляет интерес проанализировать вклад азимутальной составляющей скорости на расходимость пучка  $(V_\varphi + V_r)/V_z$ .

Очевидно, полная скорость ионов есть  $V = V_z + V_r + V_\varphi$ . Величина тяги будет определяться продольной составляющей скорости  $V_z = V - (V_r + V_\varphi)$ . Уменьшая величину  $V_\varphi$ , предполагая, что  $V$  является функцией разрядного напряжения, можно увеличить продольную составляющую скорости, а значит, и тяговые характеристики СПД. Для того чтобы реально оценить влияние азимутальной составляющей скорости на тяговые характеристики, необходимо иметь представление о функции распределения ионов по скоростям, что является достаточно сложной задачей. Азимутальная составляющая скорости, по-видимому, приводит к перераспределению потоков, попадающих на стенки канала. Поток ионов на внешнюю стенку канала должен увеличиваться, на внутреннюю стенку канала уменьшаться.

Измерения, которые были выполнены, позволяют в значительной степени качественно оценить вклад  $V_r$ ,  $V_\varphi$  на расходимость пучка.

Из выражений (1) следует, что  $(V_r + V_\varphi)/V_z = (\text{tg}^2(\delta) - 2 \text{tg}(\delta) \cos(\varphi) r/z + (r/z)^2)^{1/2}$ .

Очевидно, что на сектора 3 и 7 приходят ионы, которые имеют максимальную радиальную  $V_{rm}/V_z = (1 - 0.93) \text{tg}(\delta) - r/z$  и минимальную азимутальную  $V_\varphi/V_z = (0 - 0.38) \text{tg}(\delta)$  составляющие скорости. На сектора 1 и 5 приходят ионы, которые имеют максимальную азимутальную  $V_{\varphi m}/V_z = (1 - 0.93) \text{tg}(\delta)$  и минимальную радиальную  $V_r/V_z = (0 - 0.38) \text{tg}(\delta) - r/z$  составляющие скорости. При этом средние значения  $V_\varphi$  и  $V_r$  на соответствующих секторах отличаются более чем в 5 раз.

В таблице представлена зависимость отношений токов ионов, которые приходят на сектора 1, 5 и соответственно на 3, 7  $(J_1 + J_5)/(J_3 + J_7)$  от расположения анализатора по  $x/z$ .

Как видно, доля ионов, которые имеют  $V_{\varphi m}$  скорости, меньше доли ионов, которые имеют  $V_{rm}$  скорости, и она уменьшается примерно до 0.5–0.6 для  $x/z = 0.6$ . То есть вклад радиальной составляющей скорости в увеличение расходимости пучка более существен. Оценки показывают, что если потери тяги за счет расходимости пучка составляют примерно 10%, то на долю радиальной составляющей скорости приходится примерно 6% и соответственно на азимутальную компоненту 4%.

Вместе с тем максимальные значения  $V_{\varphi m}$  и  $V_{rm}$  отличаются незначительно. Следовательно, фазовая диаграмма пучка будет ограничена максимальным значением  $V_{rm}/V_z \approx V_{\varphi m}/V_z$ . Поскольку электрические поля, приводящие к появлению составляющих  $V_\varphi$  и  $V_r$ , разные, то уменьшение одной из них не должно приводить

Зависимость отношений токов ионов, которые приходят на сектора 1, 5 и соответственно на 3, 7  $(J_1 + J_5)/(J_3 + J_7)$ , от расположения анализатора по  $x/z$

$\text{tg } \delta$	0.07	0.11	0.15	0.19	0.4	0.6
$(J_1 + J_5)/(J_3 + J_7)$	0.78	0.71	0.55	0.5	0.52	0.62

к изменению эмиттанса пучка, но должно приводить к изменению яркости пучка в пределах этой фазовой области.

### 3. Численное исследование влияния азимутальных колебаний потенциала плазмы на динамику ионов в СПД

Оценка влияния азимутальных колебаний потенциала на ионные траектории проводилась на базе численной модели, которая ранее использовалась для расчетов самосогласованного поля в канале СПД [5]. Основное внимание было уделено возможности появления азимутальной составляющей скорости иона при движении в поле азимутальной волны потенциала плазмы.

Предполагалось, что распределение потенциала по радиусу канала является однородным, скорость ионизации в зоне ионизации постоянная по длине канала, фаза рождения ионов по отношению к волне задавалась произвольной, а полная энергия ионов, у которых значительные составляющие скорости, не превышает  $eU$ . Траектории движения ионов вычислялись интегрированием уравнения движения ионов в пренебрежении влиянием магнитного поля. Расчеты были проведены для ионов Кг.

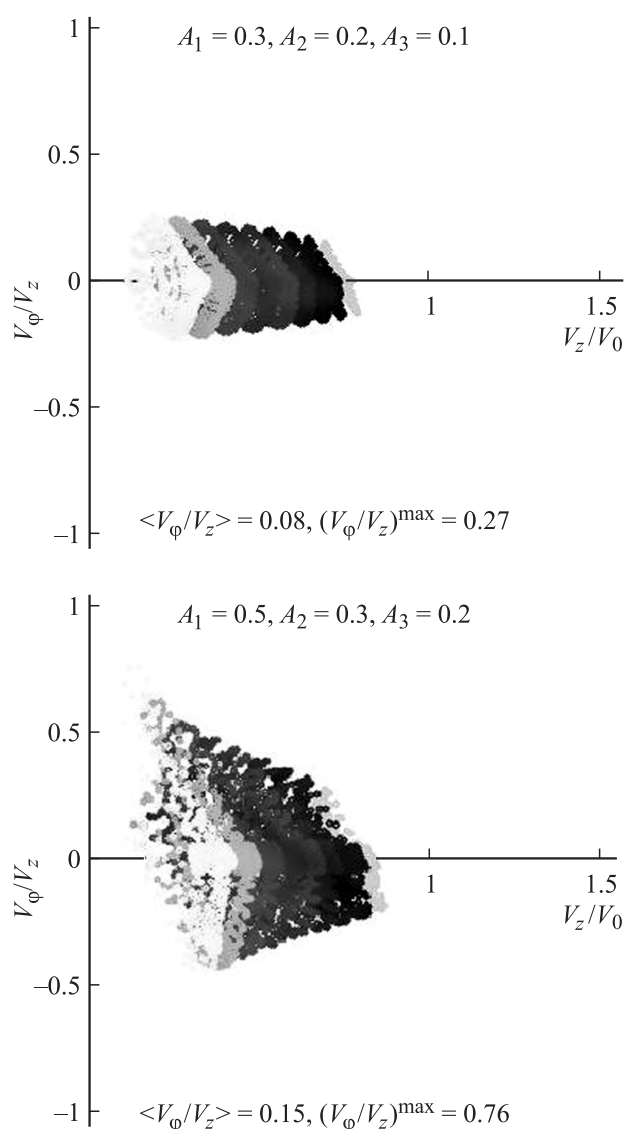
Колебания потенциала ( $\Phi$ ) по азимуту ( $\varphi$ ) задавались в виде

$$\Phi(z, \varphi, t) = \Phi_0 \cdot A \cdot \cos(k\varphi - \omega t) \times \exp(-|z - z_0|/b),$$

где  $\Phi_0$  — невозмущенное значение потенциала в точке,  $A$  — относительная амплитуда колебаний потенциала,  $k$  — волновое число,  $\omega = 2\pi f$  — частота.

Вдоль оси канала возмущение имеет форму колокола с вершиной при  $z = z_0$  и шириной  $b$ . Ширина  $b$ , значение  $z_0$ , амплитуда возмущения, волновое число и частота выбирались на основании экспериментальных данных. Амплитуда колебаний имела максимальное значение в области, где температура электронов принимает максимальное значение.

Воздействие волны на пучок рассматривалось с учетом того, что реальный спектр колебаний потенциала в СПД включает несколько гармоник различной частоты и амплитуды. Фазовая скорость волны задавалась в соответствии с экспериментальными данными  $\sim 2 \cdot 10^6$  см/с (для  $U_a = 200$  В). Результаты расчета выводились в виде фазовых диаграмм пучка на выходе из СПД. Примеры фазовых диаграмм представлены на рис. 5 (волна



**Рис. 5.** Примеры фазовых диаграмм ионного пучка на срезе СПД.

состоит из трех гармоник 80, 160 и 240 kHz, а их относительные амплитуды —  $A_1, A_2, A_3$ ).

Из анализа фазовых диаграмм следует, что с увеличением амплитуды и частоты колебаний азимутальная составляющая скорости увеличивается. Фазовая диаграмма существенно „распухает“, если азимутальная волна содержит несколько гармоник.

Сложение гармоник с различным фазовым сдвигом показало, что этот параметр практически не влияет на средний угол  $\langle V_\phi/V_z \rangle$ , хотя максимальное значение  $V_\phi/V_z$  может заметно меняться (почти вдвое) в зависимости от фазового сдвига.

Были проведены расчеты влияния скорости волны на азимутальную составляющую скорости. Показано, что увеличение фазовой скорости волны для гармоники  $f = 100 \text{ kHz}$  с  $1 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$  до  $1.5 \cdot 10^6 \text{ cm/s}$  уменьша-

ет усредненную относительную азимутальную скорость ионов в 4 раза.

Результаты численных расчетов, представленные в настоящей работе, показывают, что ионы при движении в поле азимутальной волны потенциала плазмы должны набирать азимутальную составляющую скорости, сравнимую с той, которая наблюдается в экспериментах.

## Заключение

1. Исследования функции распределения составляющих скорости ионов в пучке, выходящем из стационарного плазменного двигателя, показали, что в рассмотренном диапазоне углов  $\delta = \pm 60^\circ$  присутствуют ионы с азимутальной составляющей скорости, которая меняется в пределах  $V_\phi/V_z = \pm 0.9$ , а радиальная составляющая меняется в диапазоне  $V_r/V_z = -1.2 - + 0.74$ .

2. Результаты численных расчетов показали, что в канале СПД ионы при движении в поле азимутальной волны потенциала плазмы набирают азимутальную составляющую скорости, сравнимую с той, которая наблюдается в экспериментах.

3. Азимутальная составляющая скорости ионов увеличивает расходимость пучка, но в меньшей степени, чем радиальная составляющая скорости. При рассмотрении характеристик двигателя необходимо учитывать влияние азимутальных колебаний на величину тяги и тяговый КПД. Оценки показывают, что если потери тяги за счет расходимости пучка составляют примерно 10%, то на долю радиальной составляющей скорости приходится примерно 6% и соответственно на азимутальную компоненту 4%.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект РФФИ 06-08-00873.

## Список литературы

- [1] Плазменные ускорители / Под общей ред. акад. Л.А. Арцимовича. М.: Машиностроение, 1972.
- [2] Морозов А.И. Физические основы космических ЭРД. М.: Атомиздат, 1978. Т. 1.
- [3] Морозов А.И., Есинчук Ю.В., Капулкин А.М., Невровский В.А., Смирнов В.А. // ЖТФ. 1973. Вып. 5. С. 972–983.
- [4] Веселовзоров А.Н., Погорелов А.А., Свирский Э.Б., Смирнов В.А. // Тез. докл. XXXV Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС. 2008. С. 257.
- [5] Veselovzorov A.N., Dlugach E.D., Pogorelov A.A., Svirskiy E.B., Smirnov V.A. // 31<sup>st</sup> International Electric Propulsion Conference, Ann Arbor, Michigan, USA IEPC-2009-134.
- [6] Веселовзоров А.Н., Длугач Е.Д., Погорелов А.А., Свирский Э.Б., Смирнов В.А. // Тез. докл. XXXVI Международной (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС. 2009. С. 192.
- [7] Зубков И.П., Кислов А.Я., Морозов А.И. // ЖТФ. 1971. Т. XLI. Вып. 5. С. 880–889.