

УДК 533.9.03

## ЗАВИСИМОСТЬ ПАРАМЕТРОВ ВЫСОКОЧАСТОТНОГО УСКОРИТЕЛЯ С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ ОТ СХЕМЫ ОРГАНИЗАЦИИ ЕМКОСТНОГО ВЫСОКОЧАСТОТНОГО РАЗРЯДА

© 2023 г. И. И. Задириев\*, Г. В. Швыдкий, К. В. Вавилин, Е. А. Кралькина, А. М. Никонов

*Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия**\*E-mail: iizadiriev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 26.04.2022 г.

После доработки 26.04.2022 г.

Принята к публикации 07.06.2022 г.

Экспериментально изучены параметры емкостного высокочастотного разряда, зажигаемого в геометрии ускорителя с замкнутым дрейфом электронов с протяженной зоной ускорения при различных схемах организации разряда, а именно, при разомкнутых и замкнутых по постоянному току электродах, а также при дополнительной подаче постоянного смещения на нагруженный электрод. В разомкнутой схеме реализуется минимальная концентрация плазмы, энергия ионов в струе на выходе из прототипа порядка 25 эВ. Замыкание по постоянному току нагруженного электрода увеличивает как плотность плазмы, так и энергию ионов до 250 эВ. Дальнейшее увеличение или уменьшение этих параметров возможно при подаче соответственно положительного или отрицательного постоянного смещения на нагруженный электрод.

DOI: 10.31857/S0040364423010015

### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время электроракетные двигатели (ЭРД) широко используются в космических технологиях для коррекции орбиты космических аппаратов (КА), компенсации сопротивления остаточной атмосферы, для транспортировки спутников с одной орбиты на другую и т.д. [1–5]. Наиболее распространенными типами ЭРД являются ионные, а также холловские или стационарные плазменные двигатели (СПД) [1–5].

Разработка ускорителя с замкнутым дрейфом электронов с протяженной зоной ускорения (УЗДП) или СПД была начата в СССР в 1962 г. под руководством А.И. Морозова [6–8]. К настоящему времени СПД считаются лучшими двигателями среди своего класса. Одним из основных преимуществ ускорителя с замкнутым дрейфом электронов с протяженной зоной ускорения являются простота и надежность его конструкции [6–8]. Для получения ускоренных ионов используется разряд постоянного тока, который зажигается в диэлектрическом канале между анодом и вынесенным за пределы канала катодом. Катод является источником электронов, которые, в первых, поддерживают горение разряда, а во-вторых, нейтрализуют поток ускоренных ионов на выходе из канала. На срезе канала организовано преимущественно радиальное магнитное поле, величина которого такая, что электроны замагничены, а ионы практически не изменяют свои тра-

ектории под действием поля. Таким образом, в этой области в условиях скрещенных радиального магнитного и продольного электрического полей электроны начинают азимутально дрейфовать, а ионы свободно ускоряются электрическим полем по направлению из канала.

В последние годы возрос интерес к осуществлению космических полетов на низких (~200 км) орбитах [9–12]. Основная проблема таких полетов связана с торможением КА в результате значительного трения, связанного с относительно высокой концентрацией атомов и молекул газа. Для компенсации потерь скорости КА двигатель должен работать практически постоянно, что требует больших запасов топлива. Для решения указанной проблемы было предложено осуществить сбор газов остаточной атмосферы и использовать их в качестве рабочего тела двигателей. Однако здесь появляется еще одна трудность. На высоте 200 км основными компонентами атмосферы являются атомарный кислород и молекулярный азот, присутствие которых негативно сказывается на времени жизни известных двигателей. Минимизация негативного влияния возможна при использовании высокочастотных (ВЧ) двигателей, поддержание разряда в которых не требует катода.

На основании аналогии между разрядом постоянного тока и емкостным ВЧ-разрядом в работе [13] было предложено организовать рабочий процесс в УЗДП на основе ВЧ-разряда. В такой схеме ВЧ-

напряжение прикладывается между электродами, расположенными на месте анода и катода УЗДП. Известно, что в емкостном ВЧ-разряде рядом с электродами формируются слои пространственного заряда, в которых происходит квазистационарное падение потенциала, ускоряющее ионы в направлении электродов. Естественно предположить, что в области падения потенциала при наличии радиального магнитного поля возможно возникновение азимутального дрейфа электронов так же, как это происходит в разряде постоянного тока. Ионы под действием квазистационарного электрического поля должны ускоряться в направлении из канала.

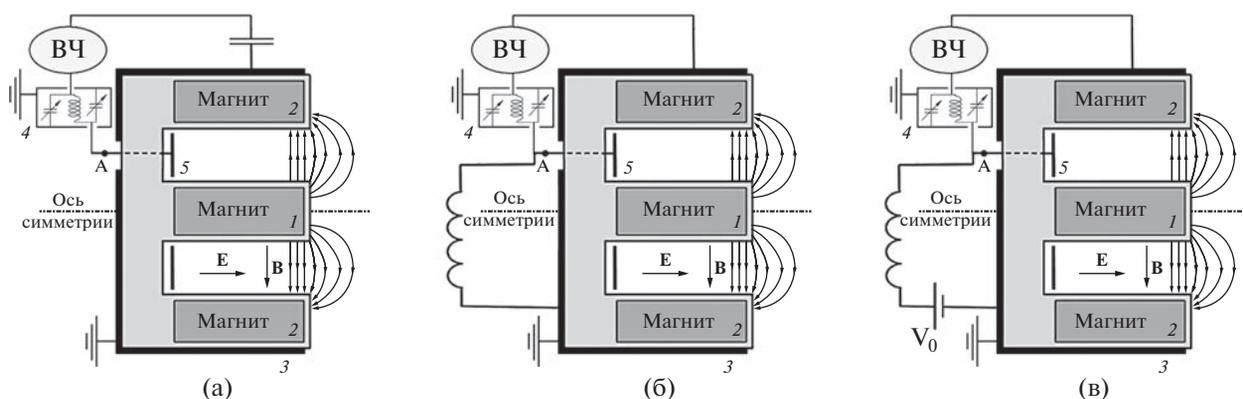
Математическое моделирование [13] по исследованию возможностей использования емкостного ВЧ-разряда для получения потоков ускоренных ионов на срезе показало перспективность такого подхода. Однако при проведении первых экспериментов авторы [13, 14] столкнулись с принципиальной трудностью. Паразитные емкости между плазмой и кожухом прототипа УЗДП, а также стенками вакуумной камеры оказались много больше, чем емкость между плазмой и катодом. При таких условиях емкостной разряд, зажигаемый в канале УЗДП, является сильно асимметричным. Из литературы [15–18] известно, что в этом случае основное падение квазистационарного потенциала сосредоточено у электрода меньшей площади, расположенного внутри канала. В то же время падение потенциала у заземленного электрода, определяющего энергию ускоренных ионов, невелико и по абсолютной величине близко к плавающему потенциалу. Измерения, выполненные в [19], подтвердили это. В работах [19–21] показано, что существенное увеличение падения потенциала у нена-

груженного электрода можно получить, замкнув электроды по постоянному току.

В настоящей работе выполнены систематические исследования вольт-амперных характеристик (ВАХ) разряда, аксиального распределения зондового ионного тока насыщения и энергии потока ионов в струе на выходе из прототипа УЗДП при использовании схем с разомкнутыми и замкнутыми по постоянному току электродами. Дополнительно рассмотрен комбинированный разряд на основе емкостного ВЧ-разряда и разряда постоянного тока. Измерения сделаны при использовании аргона в качестве рабочего тела.

### СХЕМА ЭКСПЕРИМЕНТА

Экспериментальная часть работы выполнялась с помощью лабораторного прототипа УЗДП, созданного на основе модели СПД-70. Схема этого прототипа приведена на рис. 1. Он состоит из керамического разрядного канала, в котором расположены газовод и металлический электрод, магнитной системы и заземленного металлического кожуха. Радиус внутренней стенки керамического разрядного канала составляет 2.5 см, внешней — 3.5 см, а его глубина равна 3.5 см. Магнитная система состоит из четырех соленоидов и магнитопровода. В отличие от СПД, где магнитные катушки включены в цепь последовательно с разрядом, в настоящем эксперименте для пропускания тока через магнитную систему лабораторного источника ионов использовался внешний источник питания, позволявший регулировать ток в диапазоне от 0 до 5 А, что соответствует диапазону изменения магнитного поля 0–350 Гс. Профиль радиальной компоненты магнитного поля вдоль разрядного канала близок к профилю, характерному для СПД-70.



**Рис. 1.** Схема лабораторного источника плазмы: (а) — с разомкнутым по постоянному току электродом, (б) — с замкнутым, (в) — с подачей постоянного напряжения; светло-серым цветом выделены керамические стенки разрядного канала, черным — заземленный металлический корпус 3, темно-серым — элементы магнитопровода; 1 — внутренняя магнитная катушка, 2 — внешняя, 4 — система согласования, 5 — нагруженный электрод; на срезе разрядного канала показано направление силовых линий магнитного поля; газ в канал подается через газораспределитель, расположенный за активным электродом.

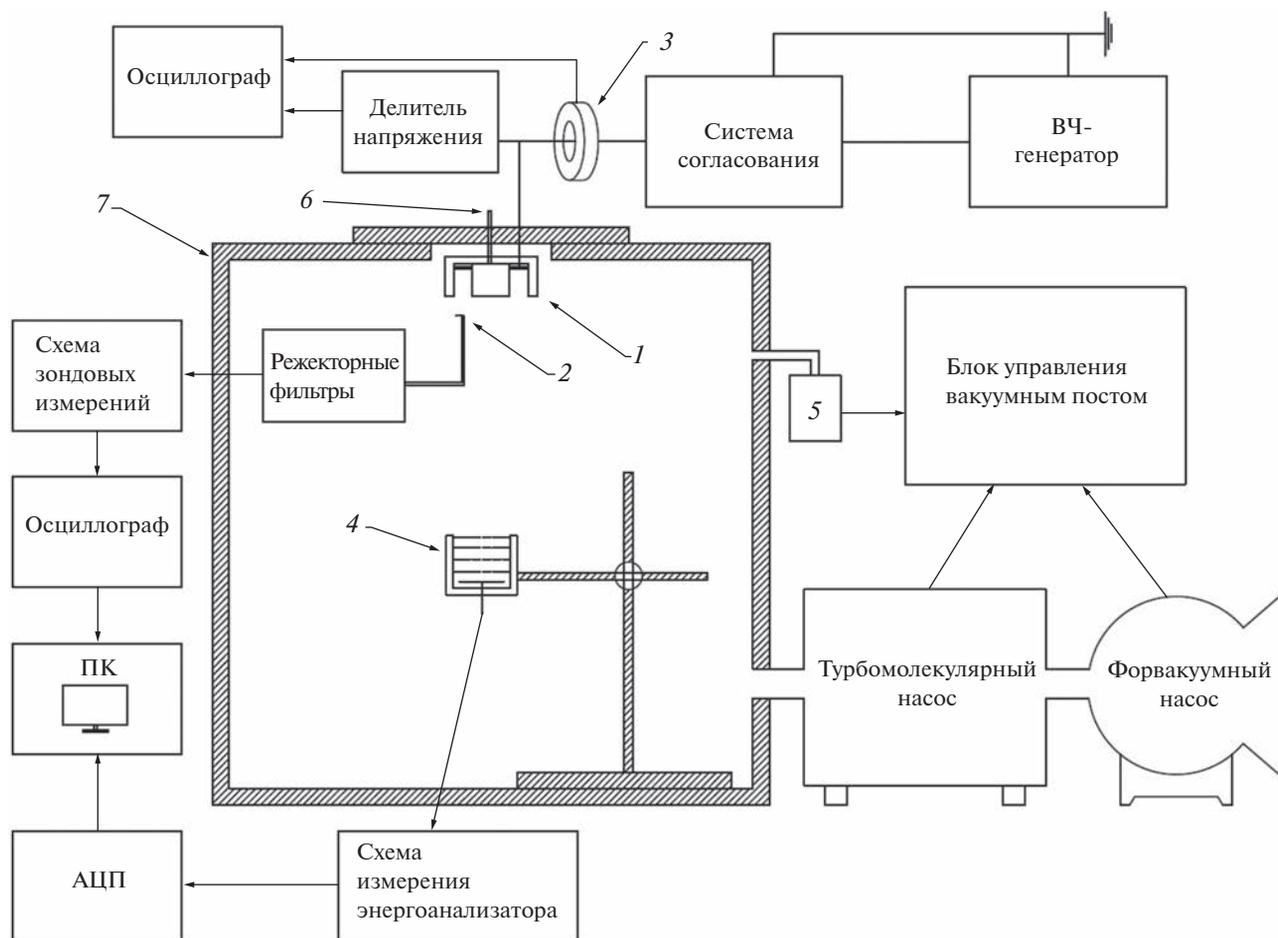


Рис. 2. Схема экспериментальной установки: 1 – источник ионов, 2 – зонд Ленгмюра, 3 – пояс Роговского, 4 – четырехсеточный энергоанализатор, 5 – широкодиапазонный датчик давления, 6 – газопровод, 7 – вакуумная камера.

Схема экспериментальной установки показана на рис. 2. Лабораторный источник плазмы закреплялся на фланце вакуумной камеры объемом  $0.5 \text{ м}^3$ , которая откачивалась форвакуумным насосом DRP-1300 и турбомолекулярным насосом КУКУ FF-250/2000Е. Остаточное давление в камере составляло величину не выше  $1 \times 10^{-5}$  Торр.

В работе использовались три электрические схемы организации разряда (см. рис. 1). В первой рассмотренной схеме (рис. 1а) ВЧ-генератор подключался к системе согласования, выводы которой через разделительную емкость С подключались к электроду, расположенному внутри канала, и к заземленному кожуху источника плазмы. В такой схеме организации разряда электроды были разомкнуты по постоянному току. Во второй схеме организации разряда (рис. 1б) емкость С удалялась, а электрод и кожух источника плазмы замыкались через дроссель с индуктивностью  $150 \text{ мкГн}$ , разрешающий протекание постоянного тока. В третьей схеме на активный электрод подавалось дополнительное напряжение постоянной величины  $U_{dc}$ .

Для этого в цепь последовательно с дросселем включался источник постоянного тока.

Для поджига и поддержания разряда использовался ВЧ-генератор Cesar 1310 с рабочей частотой  $13.56 \text{ МГц}$  и мощностью, изменяемой в диапазоне  $0-1000 \text{ Вт}$ . Система согласования состояла из двух переменных конденсаторов емкостью  $15-1000$  и  $15-250 \text{ пФ}$  и индуктивностью  $2.4 \text{ мкГн}$ .

Вольт-амперные характеристики исследуемого разряда были получены путем измерения высокочастотного тока  $I_{RF}$  в зависимости от амплитуды приложенного высокочастотного напряжения  $V_{RF}$ . Изменение  $V_{RF}$  достигалось изменением мощности ВЧ-генератора. Пояс Роговского, использованный для измерения  $I_{RF}$ , включался в электрическую цепь вблизи нагруженного электрода, так как второй электрод – кожух – был конструктивно подсоединен к земле. Это приводило к искажению ВАХ, так как часть мощности, подводимой к нагруженному электроду, могла замыкаться на заземленные части исследуемого устройства в обход разрядной плазмы. В дальнейшем при интер-

претации экспериментальных данных этот факт учитывался. Для измерения  $V_{RF}$  использовался емкостной делитель с коэффициентом деления 820. Сигнал с делителя поступал на канал двухканального осциллографа Tektronix TDS 1012B. На второй канал осциллографа поступал сигнал с пояса Роговского.

Для исследования энергетических распределений ионов в струе, истекающей из источника плазмы, использовался четырехсеточный энергоанализатор, расположенный в вакуумной камере на подвижной штанге, позволявшей менять расстояние от энергоанализатора до лабораторного прототипа УЗДП в диапазоне 10–40 см, а также угол между осью прототипа и нормалью к сеткам энергоанализатора от  $-60^\circ$  до  $+60^\circ$ . Первая сетка была заземлена, на вторую подавалось небольшое отрицательное напряжение ( $-15$  В) для удаления попавших в межсеточное пространство электронов. Третья сетка находилась под задерживающим ионы положительным напряжением, которое можно было менять в широких пределах (от 0 до 500 В), а на четвертую сетку подавалось малое отрицательное напряжение (в районе  $-15$  В) для компенсации эффекта вторичной ион-электронной эмиссии с коллектора.

В ходе эксперимента снимались зависимости тока на коллектор энергоанализатора от напряжения на третьей сетке – так называемые кривые задержки. Из первой производной этих кривых извлекались данные об энергетическом распределении ионов, исходя из следующих соотношений:

$$I_k = eS\eta \int_{eV}^{\infty} f(\varepsilon) \sqrt{2\varepsilon/M} d\varepsilon,$$

$$f(\varepsilon) = -\frac{\partial I_k}{\partial V} \frac{1}{e^2 S \eta} \sqrt{\frac{M}{2eV}}.$$

Здесь  $e$ ,  $M$  – заряд и масса иона;  $S$  – площадь коллектора энергоанализатора;  $\eta$  – коэффициент прозрачности его сеток;  $\varepsilon$  – энергия иона;  $V$  – задерживающий потенциал;  $f(\varepsilon)$  – функция распределения ионов по энергии, нормированная на их концентрацию;  $I_k$  – коллекторный ток.

Для исследования параметров плазмы в канале измерялось аксиальное распределение зондового ионного тока насыщения. Измерения электронной части зондового тока не проводились, так как разряд был помещен в сильное внешнее магнитное поле. Использовался цилиндрический зонд длиной 4 мм и диаметром 0.5 мм, установленный на выдвигающую каретку, что позволяло перемещать его вдоль канала во время эксперимента. В цепь зонда были включены два резонансных фильтра на частоты 13.56 и 27 МГц. Зондовый ионный ток в каждой точке на оси источника снимался при

напряжении, отстоящем от текущего плавающего потенциала на  $-50$  В.

Измерения проводились в аргоне при расходах 25–60 см<sup>3</sup>/мин (0.75–1.8 мг/с) в диапазоне ВЧ-мощностей 100–300 Вт. Магнитное поле выбиралось из условий стабильного горения разряда и равнялось 280 Гс.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

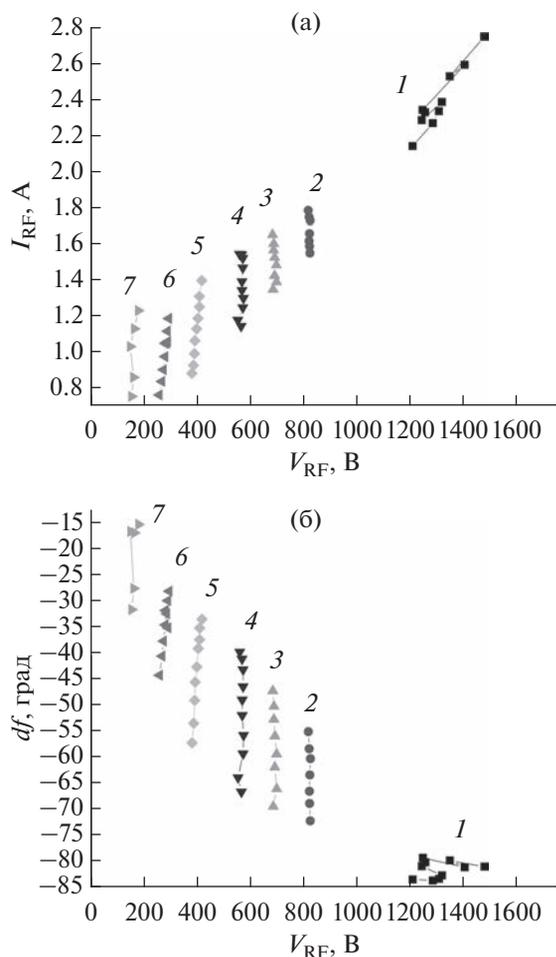
Прежде всего, необходимо отметить, что при всех трех рассмотренных схемах организации разряда в прототипах УЗДП разряд легко поджигался и горел без использования накального или дугового катодов.

Измерения показали, что при организации разряда, когда электроды разомкнуты по постоянному току, временные зависимости ВЧ-напряжения, приложенного к электродам  $V_{RF}(t)$  и ВЧ-тока  $I_{RF}(t)$ , текущего между электродами, с хорошей степенью точности являются гармоническими. В случае, когда электроды замкнуты по постоянному току, гармонический характер зависимостей  $V_{RF}(t)$ ,  $I_{RF}(t)$  нарушается. Фурье-анализ показал, что в спектре  $I_{RF}(t)$  присутствуют первая, вторая и третья гармоники. Качественно зависимости гармоник тока от первой гармоники ВЧ-напряжения близки друг к другу. В дальнейшем для рассмотрения ВАХ используется первая гармоника ВЧ-тока, которая вносит наибольший вклад в поглощение ВЧ-мощности.

На рис. 3 показаны зависимости амплитуды первой гармоники ВЧ-тока  $I_{RF}$  и сдвига фаз  $df$  между ВЧ-током и ВЧ-напряжением от амплитуды ВЧ-напряжения  $V_{RF}$ , приложенного к электродам при различных схемах организации разряда.

В рассмотренном диапазоне мощностей ВЧ-генератора максимальное ВЧ-напряжение на активном электроде достигается, если электроды разомкнуты по постоянному току. В таком случае амплитуда напряжения лежит в диапазоне 1200–1500 В, а тока – 2–2.8 А. Разряд сначала поджигается в  $\alpha$ -моду, где основной вклад в ток вносит емкостная составляющая: сдвиг фаз между током и ВЧ-напряжением близок к  $90^\circ$ . Затем, по мере роста  $V_{RF}$ , происходит переход разряда в  $\gamma$ -моду, при этом напряжение горения разряда падает, а сдвиг фаз несколько растет.

При замыкании разряда по постоянному току напряжение горения разряда, как и ВЧ-ток, уменьшается. Так, амплитудные значения напряжения лежат в диапазоне 550–750 В, а тока – в диапазоне 1.1–1.6 А. Сдвиг фаз между  $V_{RF}(t)$  и  $I_{RF}(t)$  существенно выше, чем в предыдущем случае. Это указывает на уменьшение доли тока смещения и повышение доли тока проводимости в полном токе. Увеличение  $I_{RF}$  при росте мощности ВЧ-гене-



**Рис. 3.** ВАХ разряда (а) и сдвиг фаз между ВЧ-током и напряжением (б) для разных схем подключения разряда: 1 – разомкнут по постоянному току; постоянное напряжение на нагруженном электроде: –200 (2), –100 (3), 0 (4), +100 (5), +200 (6), +300 В (7);  $B = 210$  Гс; рабочая частота – 13.56 МГц.

ратора происходит практически при постоянном напряжении между электродами аналогично тому, как в разряде постоянного тока при нормальном режиме его горения.

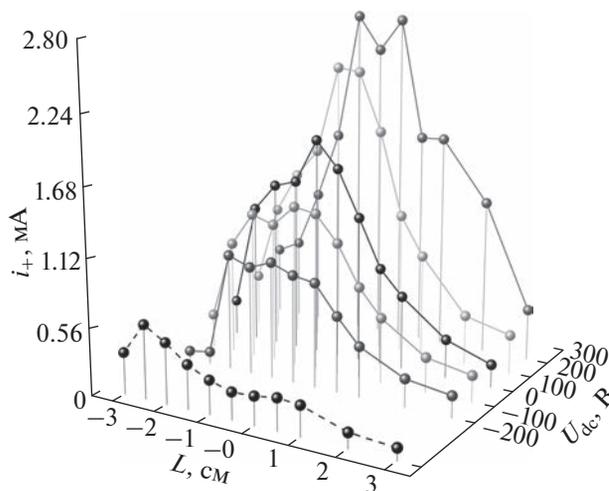
Согласно существующим представлениям о физике емкостного ВЧ-разряда [15–18], основное квазистационарное падение потенциала в асимметричном разряде с разомкнутыми по постоянному току электродами сконцентрировано около нагруженного электрода. При этом рядом с электродом формируется протяженный слой пространственного заряда. Емкость слоя мала, и его импеданс в значительной степени определяет импеданс всего разряда, поэтому разность фаз между ВЧ-током и напряжением незначительно отличается от  $90^\circ$ . В случае замкнутых по постоянному току электродов падение потенциала у нагруженно-

го электрода понижается, импеданс слоя падает и возрастает роль тока проводимости.

Указанные соображения подтверждаются экспериментами с третьей схемой подключения, когда на активный электрод дополнительно подается постоянное смещение потенциала относительно земли. Отрицательное смещение нагруженного электрода сопровождается увеличением падения потенциала в приэлектродном слое, понижением емкости слоя и увеличением емкостной составляющей разряда. При этом межэлектродное ВЧ-напряжение и ВЧ-ток занимают промежуточное положение между ВАХ разряда с разомкнутыми и замкнутыми электродами.

При подаче положительного относительно земли потенциала на нагруженный электрод наблюдаются существенное падение рабочего напряжения и рост ВЧ-тока. Следует отметить, что сдвиг фаз между ВЧ-током и напряжением существенно возрастает и приближается к  $0^\circ$ . Это свидетельствует об уменьшении размера приэлектродного слоя.

Описанную качественную картину перераспределения падения квазистационарных потенциалов в слоях пространственного заряда у нагруженного и заземленного электродов при изменении схемы организации разряда подтверждают результаты измерения аксиального распределения зондового ионного тока насыщения, представленные на рис. 4.



**Рис. 4.** Аксиальные распределения зондового ионного тока насыщения, измеренные при различных значениях постоянного смещения нагруженного электрода: штриховая кривая – аксиальное распределение ионного тока в схеме с разомкнутыми по постоянному току электродами,  $L = 0$  – срез канала,  $L < 0$  – зонд внутри канала,  $L > 0$  – снаружи; нагруженный электрод располагается в глубине канала при  $L = -3.5$  см.

В случае использования схемы с разомкнутыми по постоянному току электродами аксиальное распределение  $i_+(L)$  имеет вид, типичный для  $\gamma$ -режима емкостного ВЧ-разряда, а именно, наблюдаются два максимума ионного тока вблизи локализации квазистационарных скачков потенциала. Основным максимумом ионного тока лежит вблизи нагруженного электрода, где сосредоточено основное падение квазистационарного потенциала. Вблизи среза канала максимум ионного тока существенно меньше. Здесь дополнительным фактором, повышающим концентрацию электронов, а следовательно, и ионный ток вблизи среза канала, является радиальное магнитное поле, которое сопровождается появлением азимутального дрейфа электронов, увеличением их времени жизни в разряде и повышением интенсивности ионизации.

В схеме с разомкнутыми электродами увеличивается падение квазистационарного потенциала у заземленного электрода, и основной максимум ионного тока смещается в область среза канала, где локализовано радиальное магнитное поле. Отметим, что при использовании второй схемы организации разряда значения ионного тока выше, чем при использовании первой схемы. Предполагая, что температура электронов при переходе от первой схемы организации разряда ко второй не претерпевает существенных изменений, можно сделать вывод, что при замыкании электродов по постоянному току концентрация электронов возрастает. При подаче отрицательного смещения на нагруженный электрод распределения  $i_+(L)$  приближаются к измеренным при использовании схемы с разомкнутыми электродами  $i_+^*(L)$ . Чем больше по абсолютной величине отрицательный потенциал, тем ближе  $i_+(L)$  к  $i_+^*(L)$ . При наличии положительного смещения на нагруженный электрод локальный максимум у нагруженного электрода существенно уменьшается, а локальный максимум у среза канала растет. Более того, область основного максимума ионного тока расширяется в область за срез канала. Абсолютные значения ионного тока увеличиваются с ростом  $U_{dc}$ . Это происходит, во-первых, в результате уменьшения падения потенциала в слое у нагруженного электрода, а во-вторых, за счет вложения в разряд дополнительной мощности от источника постоянного тока.

Рост плотности плазмы при использовании третьей схемы организации разряда также подтверждается измерениями постоянного тока  $I_{dc}$ , текущего между электродами. Для ВЧ емкостного разряда с замкнутыми по постоянному току электродами характерен так называемый батарейный эффект [16]. В любом емкостном ВЧ-разряде [16] в пределах периода плазма изменяет свое положение — колеблется, попеременно касаясь одного или обоих электродов. В случае, когда электроды замкнуты, а площадь электродов сильно различа-

ется (асимметричный разряд), плазма никогда не касается электрода большей площади. На него в течение всего периода идет ионный ток, пропорциональный плотности плазмы вблизи электрода. На электрод меньшей площади идет как ионный ток, так и электронный, который с превышением компенсирует ионный ток в момент касания плазмой электрода. При этом во внешней цепи течет ток  $I_{dc}$  от электрода большей площади к электроду меньшей площади. Вблизи электрода большей площади ток переносится ионами, вблизи малого электрода и в плазме — электронами. На рис. 5 приведена зависимость  $I_{dc}$  от мощности ВЧ-генератора для случаев замкнутого по постоянному току активного электрода и с подачей на него постоянного напряжения. Отметим, что по оси абсцисс на рис. 5 для большей наглядности отложена мощность ВЧ-генератора  $P_{gen}$ , а не ВЧ-напряжение, так как изменение  $I_{dc}$  происходит практически при постоянном  $V_{RF}$ . Рис. 5 убедительно показывает, что ток  $I_{dc}$ , пропорциональный плотности плазмы, растет с увеличением не только  $P_{gen}$ , но и  $U_{dc}$ .

Наличие квазистационарного скачка потенциала вблизи среза канала приводит к ускорению ионов в направлении из канала и появлению быстрых ионов в струе. Очевидно, что средняя энергия ускоренных ионов может дать представление о величине скачка потенциала  $\delta U$ . На рис. 6 представлена зависимость средней энергии ионного пучка  $E$  от подаваемой мощности ВЧ-генератора для замкнутых и разомкнутых электродов. Для разомкнутой схемы средняя энергия не зависит от подаваемой мощности генератора и составляет 25 эВ, для замкнутой — 250 эВ. Таким образом, замыкание электродов по постоянному току в соответствии с физической моделью емкостного ВЧ-разряда [15–18] существенно увеличивает квазистационар-

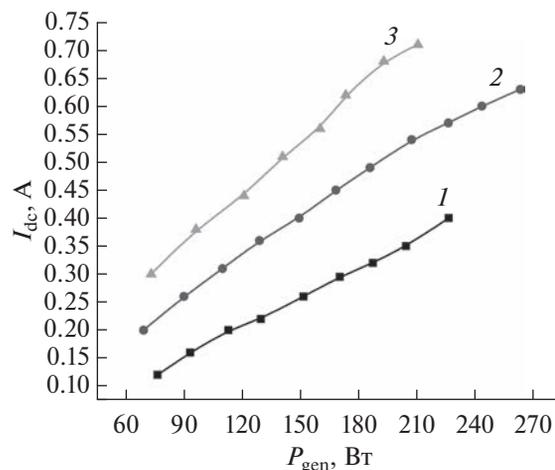
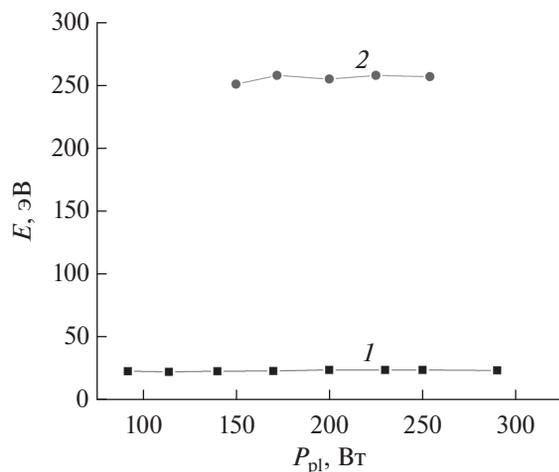


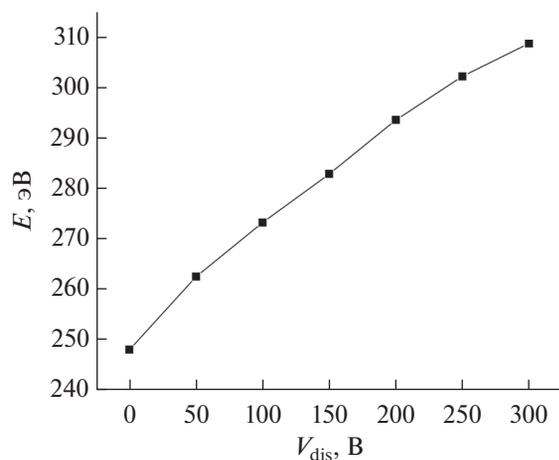
Рис. 5. Зависимость разрядного тока от  $P_{gen}$  при замкнутых электродах (1) и при подаче постоянного напряжения 100 (2) и 200 В (3).



**Рис. 6.** Зависимости средней энергии ионов от подаваемой мощности ВЧ-генератора для замкнутых (1) и разомкнутых (2) электродов; магнитное поле — 280 Гс, рабочая частота — 13.56 МГц.

ный потенциал плазмы относительно заземленного электрода. Напомним, что для ВАХ разряда при увеличении  $P_{gen}$  характерен рост ВЧ-тока при фактически постоянном ВЧ-напряжении. Это является причиной отсутствия в пределах погрешности измерений зависимости  $E$  от  $P_{gen}$ . Необходимо указать, что в работе [16] отмечается, что падение приэлектродного потенциала при замкнутых по постоянному току электродах должно быть близко к ВЧ-амплитуде напряжения, приложенного к электродам. В настоящих экспериментах получено, что  $\delta U \approx (1/2)V_{RF}$ .

Подача положительного постоянного смещения  $U_{dc}$  на нагруженный электрод сопровождается увеличением энергии ионов. Зависимость средней



**Рис. 7.** Зависимость средней энергии ионов от постоянного напряжения; рабочий газ — аргон, магнитное поле — 280 Гс, рабочая частота — 13.56 МГц.

энергии ионов от постоянного напряжения показана на рис. 7. Увеличение напряжения на нагруженном электроде от 0 до 300 В сопровождается ростом средней энергии ионов от 250 до 310 эВ. Прирост энергии ионов ниже, чем увеличение положительного смещения электрода. Это связано с уменьшением ВЧ-напряжения, необходимого для поддержания разряда в заданном диапазоне мощностей ВЧ-генератора.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе рассмотрены две схемы организации емкостного ВЧ-разряда в прототипе УЗДП, а именно, с разомкнутыми и замкнутыми по постоянному току электродами. Дополнительно исследован комбинированный разряд на основе емкостного ВЧ-разряда и разряда постоянного тока. Измерения ВАХ разряда показали, что для рабочих режимов разряда с разомкнутыми электродами характерны наибольшие значения требуемого ВЧ-напряжения между электродами, при этом доминирующей составляющей ВЧ-тока, текущего между электродами, является ток смещения. Основной максимум аксиального распределения зондового ионного тока насыщения лежит вблизи нагруженного электрода, указывая на существование значительного падения потенциала около него. Средняя энергия ионов, ускоренных в слое у среза канала, близка к 25 эВ. Это подтверждает вывод о сильной асимметрии емкостного ВЧ-разряда в прототипе УЗДП.

При замыкании электродов по постоянному току ВЧ-напряжение горения разряда ниже, чем в случае схемы с разомкнутыми электродами. С увеличением мощности ВЧ-генератора растет вклад тока проводимости в полный ток  $I_{RF}$ . Энергия ионов, ускоренных в слое у среза канала, существенно возрастает и достигает 250 эВ. Основной максимум зондового ионного насыщения смещается к срезу канала. Здесь радиальное магнитное поле максимально. Его наличие приводит к появлению азимутального дрейфа электронов, увеличению их времени жизни в разряде и интенсификации процессов ионизации.

Подача постоянного положительного потенциала на нагруженный электрод приводит к дополнительному росту энергии ионов. Однако прирост энергии ионов ниже, чем увеличение положительного смещения электрода. Это связано с уменьшением ВЧ-напряжения, необходимого для поддержания разряда в заданном диапазоне мощностей ВЧ-генератора.

В целом можно сделать вывод, что разряд, основанный на комбинации емкостного ВЧ-разряда, организованного по второй схеме, и разряда постоянного тока, является предпочтительным кандидатом на рабочий процесс в прототипе УЗДП. Во-первых, поддержание разряда не требует катода. Во-

вторых, скачок потенциала у нагруженного электрода в случае комбинированного разряда минимален, что минимизирует скорость его распыления. В-третьих, изменение смещения нагруженного электрода дает возможность управлять энергией ионов, в то время как изменение мощности ВЧ-генератора позволяет управлять током ускоренных ионов. Таким образом, появляется возможность независимого управления основными параметрами УЗДП.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РНФ в рамках научного проекта № 21-72-10090.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Goebel D.M., Katz I.* Fundamentals of Electric Propulsion: Ion and Hall Thrusters. USA: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 2008. 493 p.
2. *Горшков О.А., Муравлев В.А., Шагайда А.А.* Холловские и ионные плазменные двигатели для космических аппаратов. М.: Машиностроение, 2008. 292 с.
3. *Mazouffre S.* Electric Propulsion for Satellites and Spacecraft: Established Technologies and Novel Approaches // *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016. V. 25. 033002.
4. *Goebel D.M., Hofer R.R., Mikellides I.G., Katz I., Polk J.E., Dotson B.N.* Conducting Wall Hall Thrusters // *IEEE Trans. Plasma Sci.* 2015. V. 43. № 1. P. 118.
5. *Zhurin V.V.* Industrial Ion Sources. Broadbeam Gridless Ion Source Technology. Weinheim: John Wiley & Sons Limited, 2012. 312 p.
6. *Морозов А.И.* Введение в плазмодинамику. М.: Физматлит, 2006. 576 с.
7. *Архипов А.С., Ким В.П., Сидоренко Е.К.* Стационарные плазменные двигатели Морозова. М.: Изд-во МАИ, 2012. 292 с.
8. *Ким В.П.* Конструктивные признаки и особенности рабочих процессов в современных стационарных плазменных двигателях Морозова // *ЖТФ.* 2015. Т. 85. № 3. С. 45.
9. *Filat'yev A.S., Yanova O.V.* The Control Optimization of Low-Orbit Spacecraft with Electric Ramjet // *Acta Astronautica.* 2019. V. 158. P. 23.
10. *Zheng P., Wu J., Zhang Yu., Wu B.* A Comprehensive Review of Atmosphere-Breathing Electric Propulsion Systems // *Int. J. Aerospace Eng.* 2020. V. 2020. 8811847.
11. *Гордеев С.В., Канев С.В., Суворов М.О., Хартов С.А.* Оценка параметров прямого высокочастотного ионного двигателя // *Тр. МАИ.* 2017. № 96.
12. *Filat'yev A.S., Golikov A.A., Erofeev A.I., Khartov S.A., Lovtsov A.S., Padalitsa D.I., Skvortsov V.V., Yanova O.V.* Research and Development of Aerospace Vehicles with Air Breathing Electric Propulsion: Yesterday, Today, and Tomorrow // *Progress in Aerospace Sciences.* 2023. V. 136. 100877.
13. *Задирьев И.И., Рухадзе А.А., Кралькина Е.А., Павлов В.Б., Вавилин К.В., Тараканов В.П.* Математическое моделирование емкостного ВЧ-разряда низкого давления, помещенного во внешнее радиальное магнитное поле посредством программы КАРАТ // *ЖТФ.* 2016. Т. 86. № 11. С. 1.
14. *Задирьев И.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Швыдкий Г.В., Александров А.Ф.* Комбинация емкостного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Ч. I. Вольт-амперная характеристика и импеданс разряда // *Прикл. физика.* 2018. № 2. С. 10.
15. *Köhler K., Coburn J.W., Horne D.E., Kay E., Keller J.H.* Plasma Potentials of 13.56 MHz RF Argon Glow Discharges in a Planar System // *J. Appl. Phys.* 1985. V. 57. P. 59.
16. *Райзер Ю.П., Шнейдер М.Н., Яценко Н.А.* Высоко-частотный емкостный разряд. М.: Изд-во МФТИ, Наука—Физматлит, 1995. 320 с.
17. *Savinov V.P.* Physics of Radiofrequency Capacitive Discharge. CRC Press, 2018. 342 p.
18. *Lieberman M.A., Lichtenberg A.J.* Principles of Plasma Discharges and Materials Processing. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, Inc., 2004. 800 p.
19. *Задирьев И.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Швыдкий Г.В., Александров А.Ф.* Комбинация емкостного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Ч. II. Функции распределения ионов по энергиям // *Прикл. физика.* 2018. № 3. С. 5.
20. *Задирьев И.И., Кралькина Е.А., Вавилин К.В., Швыдкий Г.В., Александров А.Ф.* Комбинация емкостного высокочастотного разряда и разряда постоянного тока для использования в плазменном ускорителе с замкнутым дрейфом электронов. Ч. III. Математическое моделирование // *Прикл. физика.* 2018. № 5. С. 33.
21. *Shvydkiy G.V., Zadiriev I.I., Kralkina E.A., Vavilin K.V.* Acceleration of Ions in a Plasma Accelerator with Closed Electron Drift Based on a Capacitive Radiofrequency Discharge // *Vacuum.* 2020. V. 180. 109588.