

УДК 533.59,621.455

ВЫСОКОЧАСТОТНЫЙ ИОННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ С ДОПОЛНИТЕЛЬНОЙ МАГНИТНОЙ СИСТЕМОЙ

© 2019 г. В. В. Кожевников¹, *, А. В. Мельников¹, И. П. Назаренко¹, С. А. Хартов¹¹Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет),
Москва, Россия

*e-mail: k208@mai.ru

Поступила в редакцию 04.04.2019 г.

После доработки 19.04.2019 г.

Принята к публикации 25.04.2019 г.

Представлены результаты экспериментальных исследований интегральных характеристик лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя и локальных параметров плазмы в его разрядной камере при наличии дополнительного внешнего постоянного магнитного поля в области ионизации. Приведен результат численного моделирования распределения постоянного магнитного поля в объеме разрядной камеры. Определены закономерности влияния величины дополнительного магнитного поля на извлекаемый из двигателя ток ионного пучка. Проведено сравнение характеристик двигателя при наличии и при отсутствии дополнительного магнитного поля. Установлены режимы работы двигателя и значения силы постоянного тока в дополнительной обмотке, при которых реализуется максимальное приращение извлекаемого из двигателя ионного тока. С использованием методики диагностики локальных параметров плазмы тройным электростатическим зондом получены распределения концентрации и температуры электронов по радиусу разрядной камеры высокочастотного ионного двигателя при наличии и при отсутствии дополнительного внешнего постоянного магнитного поля в области разряда.

Ключевые слова: высокочастотный ионный двигатель, дополнительное магнитное поле, зондовые измерения, ток ионного пучка

DOI: 10.1134/S0002331019030105

ВВЕДЕНИЕ

Одним из актуальных направлений развития космической техники на сегодняшний день является увеличение срока активного существования малых космических аппаратов. Для решения данной задачи все чаще используются электроракетные двигатели (ЭРД), позволяющие получить более высокий удельный импульс при значительно меньшем потреблении топлива – рабочего тела (РТ). Наилучшие показатели по величине удельного импульса и ресурса работы могут быть достигнуты при использовании разновидности ЭРД – ионных двигателей [1].

В последнее время большой интерес в нашей стране вызывает разработка высокочастотных ионных двигателей (ВЧИД), имеющих ряд преимуществ перед классическими, основанными на ионизации в разряде постоянного тока, ионными двигателями “Кауфмана” (ИДПТ). Так использование высокочастотного (ВЧ) разряда для ионизации РТ в ионном двигателе по сравнению с ИДПТ снимает проблему снижения его ресурса из-за распыления катодных поверхностей в объеме разрядной камеры (РК), а также упрощает регулирование тяги, которое происходит как за счет изменения по-

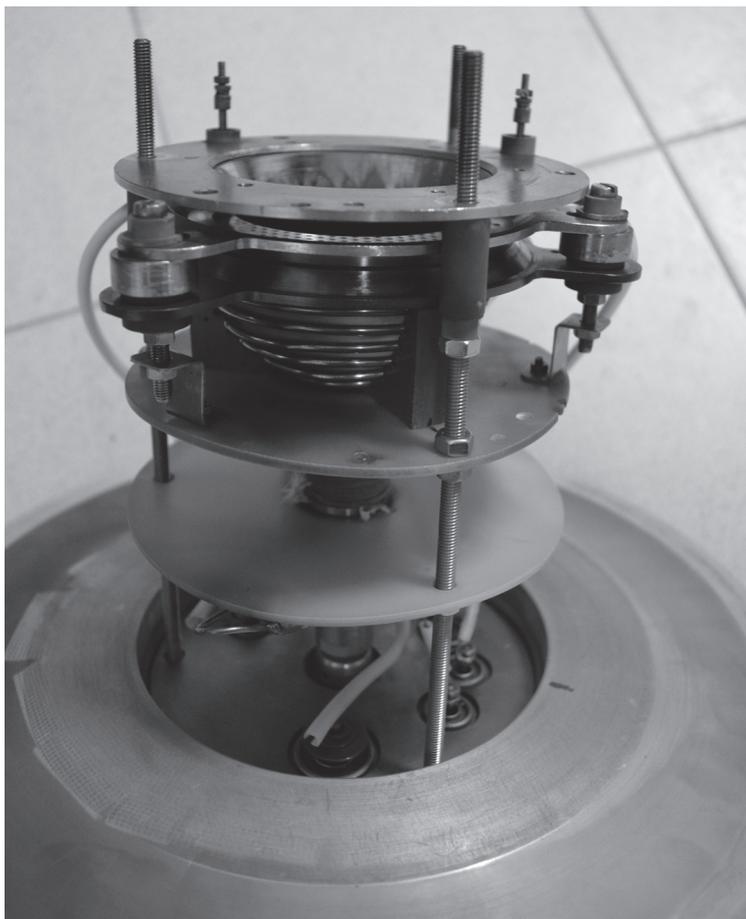


Рис. 1. Лабораторная модель ВЧИД с дополнительным источником магнитного поля.

даваемой ВЧ мощности, так и расхода рабочего тела. Вместе с тем по сравнению с ИДПТ ВЧИД характеризуется более высокими затратами мощности на ионизацию РТ, одной из причин которых являются большие потери заряженных частиц в результате их рекомбинации на стенках РК [2].

Проведенные ранее исследования [3] показали, что в ВЧИД возможно снижение указанных потерь за счет наложения дополнительного внешнего постоянного магнитного поля в области ВЧ разряда. Поскольку в этих исследованиях наибольшее улучшение характеристик двигателя с диаметром пучка 100 мм наблюдалось в области низких мощностей и расходов РТ для дальнейших исследований была использована, работающая при меньших расходах и мощностях, лабораторная модель ВЧИД с полусферической камерой и диаметром ионного пучка 80 мм [4].

ИССЛЕДОВАНИЯ ВЛИЯНИЯ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ИНТЕГРАЛЬНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЧИД

На рисунке 1 представлена фотография исследуемой модифицированной лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя с источником дополнительного магнитного поля (дополнительная обмотка, размещенная под РК).

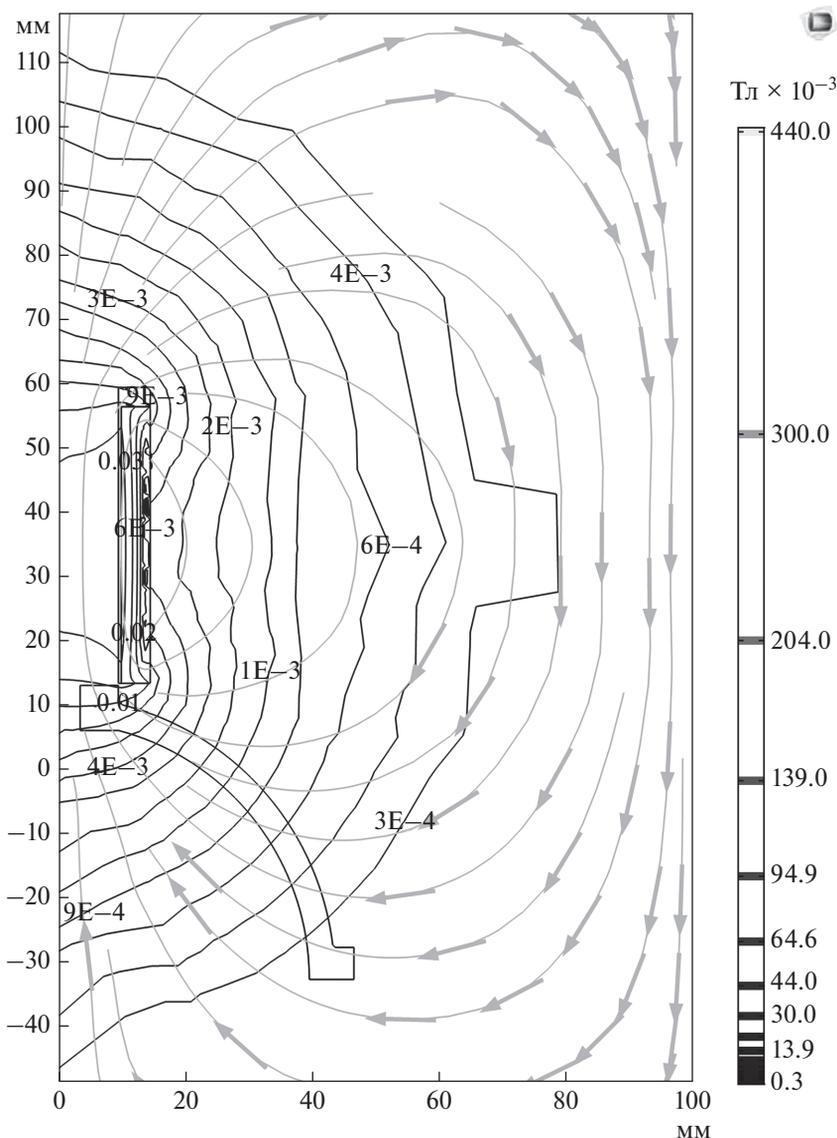


Рис. 2. Результат моделирования дополнительного постоянного магнитного поля в РК ВЧИД (ток в дополнительной обмотке 10 А).

Дополнительная обмотка в конструкции двигателя создавала в объеме РК рупорную конфигурацию магнитного поля, результат расчета распределения которого в программном пакете *COMSOL Multiphysics* представлен на рис. 2.

Средняя величина индукции дополнительного магнитного поля в объеме РК при токе в обмотке 10 А, согласно расчету, находится в районе 1 мТл. Оценки показали, что эта величина, с учетом средней энергии электронов 3–4 эВ в РК ВЧИД (по данным экспериментальных исследований распределения параметров плазмы по радиусу разрядной камеры [4, 5]), должна быть достаточна для снижения потока электронов

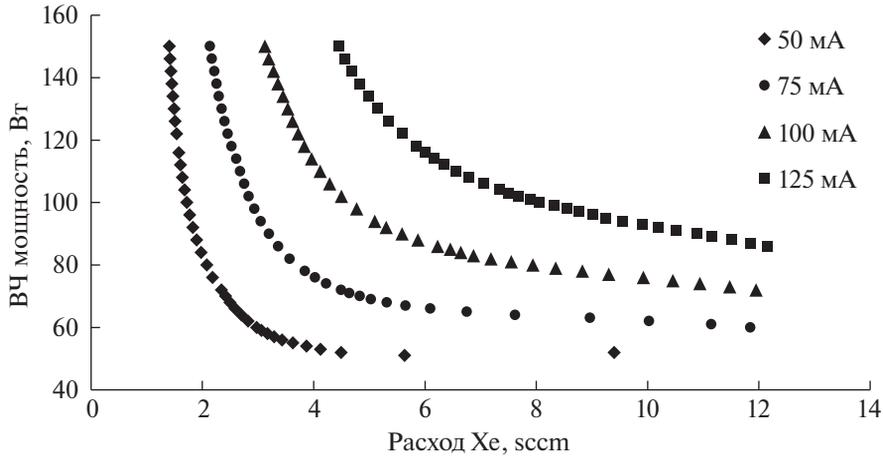


Рис. 3. Зависимости мощности ВЧ генератора от расхода ксенона по постоянному току.

на стенки камеры. Это заключение основано на том, что ожидаемый ларморовский радиус вращения электрона в магнитном поле будет в 5–6 раз меньше радиуса разрядной камеры. Вследствие этого электроны будут удерживаться вблизи оси РК.

На первом этапе исследования регистрировались зависимости подаваемой в РК ВЧ мощности от расхода ксенона при постоянном токе ионного пучка без использования дополнительного магнитного поля. При этом, как и в предыдущем исследовании [3], под величиной ВЧ мощности понималась мощность на выходе генератора без учета потерь в согласующем устройстве, а расход измерялся с использованием внесистемной единицы – стандартный кубический сантиметр в минуту – sccm (массовый расход ксенона 1 мг/с соответствует ~10.18 sccm). Полученные данные для рассматриваемых токов представлены на рис. 3. Характер данных зависимостей хорошо соотносится с результатами исследований ВЧИД других авторов [2, 5].

На втором этапе исследования изучалось влияние дополнительного магнитного поля на интегральные характеристики лабораторной модели ВЧИД. Первоначально, для различных токов в дополнительной обмотке, были получены зависимости извлекаемого тока ионного пучка от расхода РТ при постоянной подаваемой от ВЧ генератора мощности (рис. 4).

Как видно из анализа кривых на рис. 4 наличие дополнительного магнитного поля приводит к увеличению тока пучка во всех рассматриваемых режимах работы. Наибольший эффект проявляется при токе в дополнительной обмотке 6 А. Дальнейшее его увеличение оказывает меньшее положительное влияние на ток ионного пучка.

Для более детального исследования влияния магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД были получены зависимости извлекаемого тока ионного пучка от силы тока в дополнительной обмотке при различных значениях подаваемой ВЧ мощности и расхода РТ, представленные на рис. 5.

Анализ данных кривых рис. 5 показывает, что наибольший прирост ионного тока наблюдается при силе тока в дополнительной обмотке 10 А. Однако при расходах ксенона менее 1.5 sccm или более 10 sccm максимум положительного эффекта от дополнительного магнитного поля смещается в область меньшего тока в обмотке.

Используя указанные значения оптимальной силы тока в дополнительной обмотке была произведена регистрация интегральных характеристик лабораторной модели ВЧИД – тока ионного пучка – при наличии дополнительного магнитного поля в об-

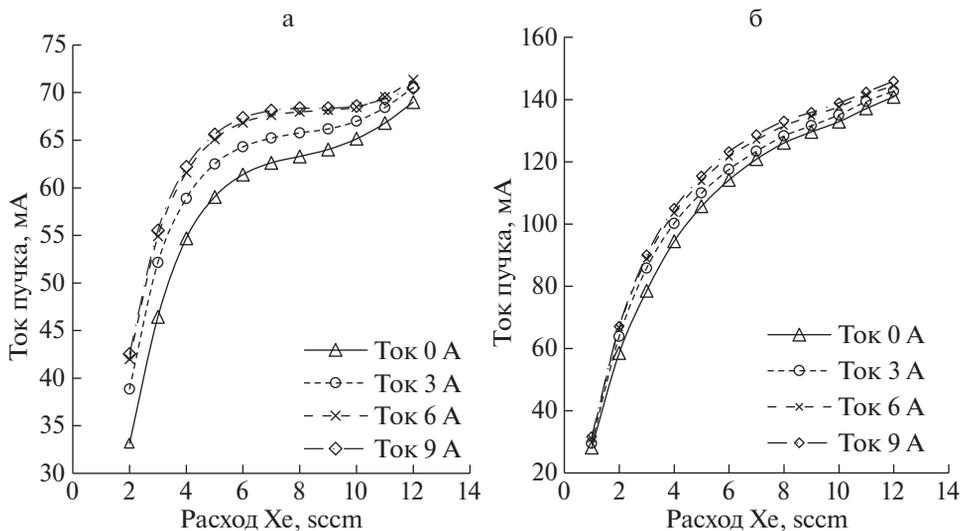


Рис. 4. Зависимости извлекаемого тока пучка от расхода РТ: (а) ВЧ мощность – 60 Вт; (б) ВЧ мощность – 105 Вт.

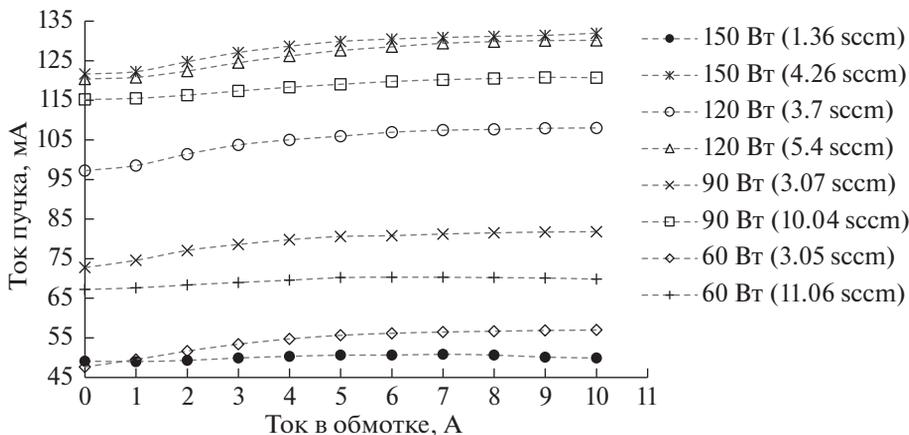


Рис. 5. Зависимости извлекаемого тока ионного пучка от силы тока в дополнительной обмотке.

ласти ВЧ разряда. Сравнение полученных зависимостей с характеристиками без дополнительного постоянного магнитного поля представлены на рис. 6.

Для большей наглядности получаемого эффекта можно провести сравнение коэффициента использования рабочего тела ($K_{иРТ}$), который определяется как:

$$K_{иРТ} = \frac{I_i M_{Xe}}{e \dot{m}_{Xe}} \times 100\%,$$

где I_i – извлекаемый ток ионного пучка, \dot{m}_{Xe} – массовый расход ксенона, e – заряд электрона, M_{Xe} – масса атома ксенона.

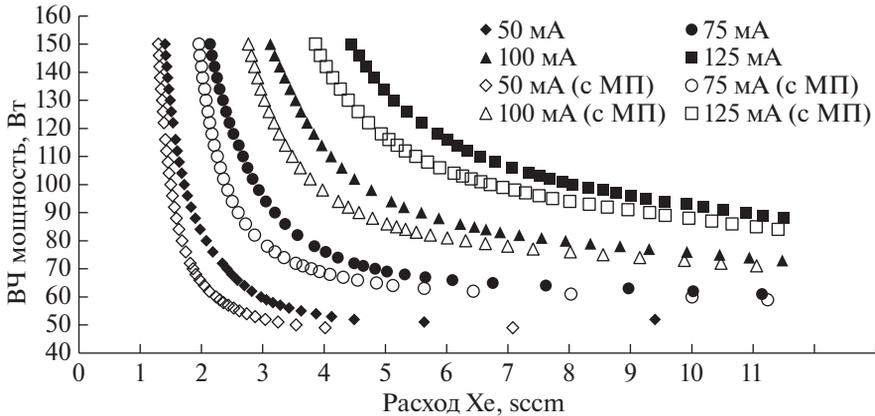


Рис. 6. Сравнение интегральных характеристик лабораторной модели ВЧИД при отсутствии и при наличии дополнительного магнитного поля.

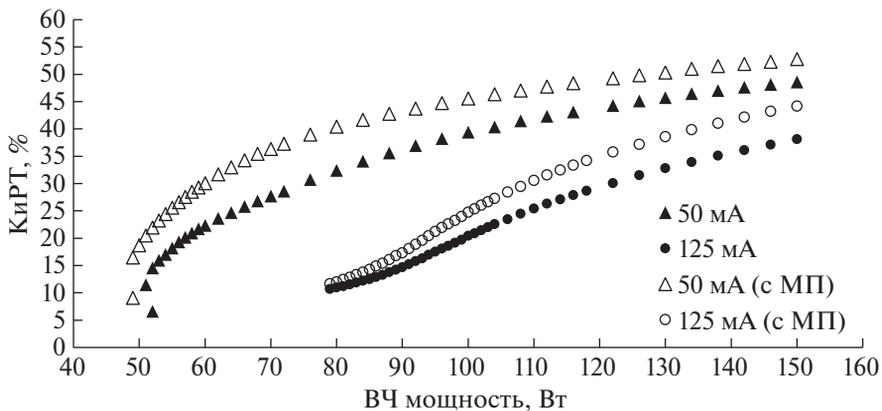


Рис. 7. Сравнение коэффициента использования рабочего тела для токов ионного пучка 50 и 125 мА.

Результат сравнения КиРТ для величин извлекаемых токов ионного пучка 50 и 125 мА представлен на рис. 7.

Анализ кривых рис. 7 показывает, что на некоторых режимах работы использование дополнительного постоянного магнитного поля в области ВЧ разряда приводит к увеличению коэффициента использования рабочего тела до 10%.

Для более детального понимания процессов, приводящих к увеличению извлекаемого ионного тока пучка при наложении дополнительного магнитного поля, было проведено исследование локальных параметров плазмы в одном из сечений РК.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛОКАЛЬНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ

Данное исследование проводилось по методике регистрации параметров плазмы в ВЧ разряде с использованием тройного электростатического зонда [4]. Это позволило обойтись без дополнительных мер компенсации помех в цепях регистрации и существенно упростило обработку данных.

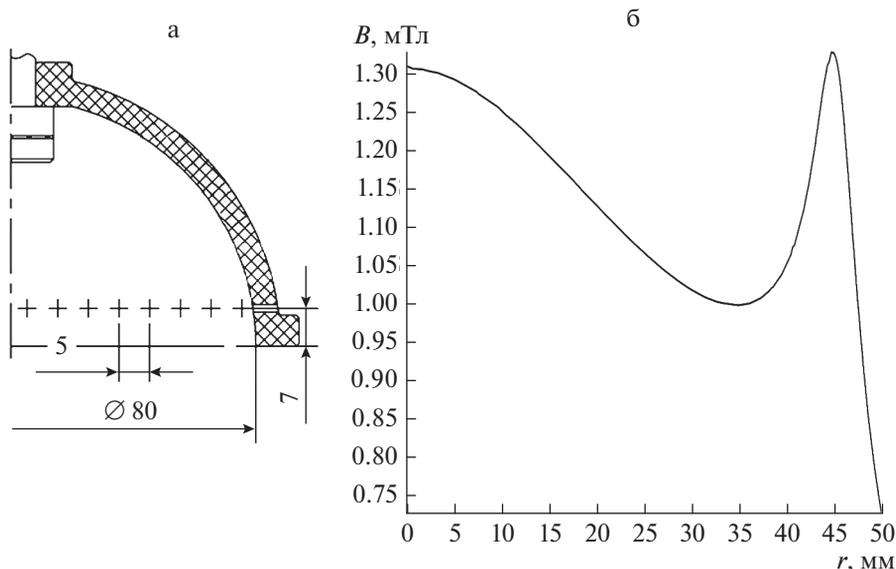


Рис. 8. (а) расположение исследуемого сечения РК и позиции зонда (отмеченные +), в которых производилась регистрация параметров плазмы; (б) результат расчета радиального распределения магнитного поля в исследуемом сечении РК в программном пакете COMSOL Multiphysics при токе в индукторе и в дополнительной обмотке 10 А.

Для минимизации искажений зондовых измерений, связанных с наличием магнитного поля в области ВЧ разряда и выбора длины коллектора цилиндрического зонда, было произведено численное моделирование ожидаемых магнитных полей в исследуемом сечении РК. Это позволило определить минимальный ларморовский радиус электронов с учетом принятой по данным работ [4, 5] средней энергией 3–4 эВ и оценить оптимальную длину коллектора зонда, которая при условиях эксперимента составила 5 мм, при диаметре 0.2 мм. Материалом коллекторов зонда был выбран устойчивый к нагреву и ионному распылению сплав вольфрама с рением ВР20. Схема расположения исследуемого сечения РК с позициями зонда в которых производились измерения параметров плазмы и результаты моделирования магнитного поля представлены на рис. 8.

Для введения зонда в область плазмы, как и в работе [4], использовалась РК со специальным отверстием в стенке (рис. 9).

Схема подключения тройного электростатического зонда изображена на рис. 10. Коллекторы P_1 и P_3 подключались к блоку питания и измерения (БПИ), который подавал необходимое положительное смещение потенциала U_{1-3} и регистрировал проходящую на зонд во время измерения силу тока. Коллектор P_2 находился под плавающим потенциалом плазмы и совместно с коллектором P_1 подключался к цифровому осциллографу, который фиксировал смещение потенциала U_{1-2} между ними. Синхронизация измерений производилась за счет использования компьютерного управления. При этом вся эта измерительная система была изолирована от земли установки через разделительный трансформатор.

Для определения необходимого для измерения потенциала U_{1-3} в каждой исследуемой точке снималась калибровочная зондовая вольтамперная характеристика (ВАХ), типичный вид которой представлена на рис. 11.

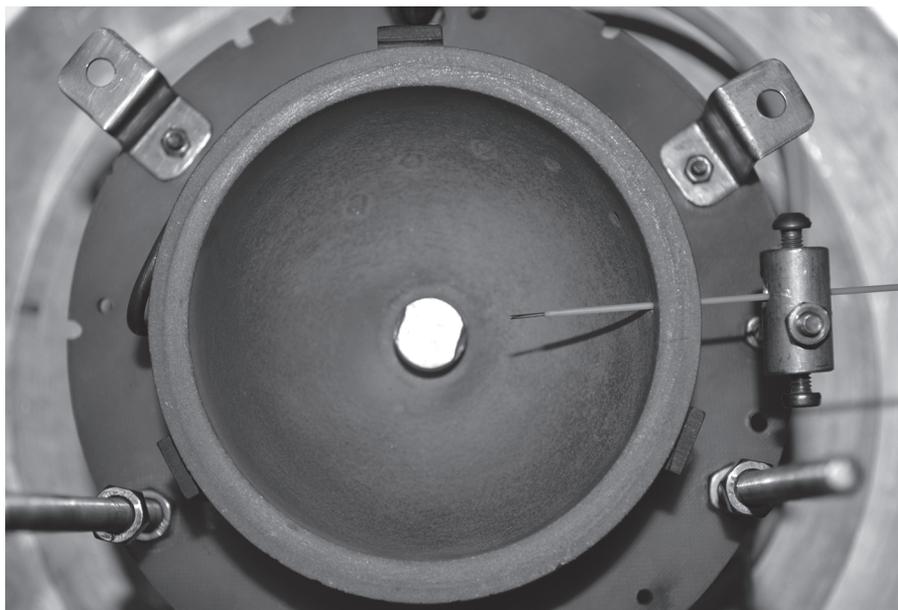


Рис. 9. РК с зафиксированным в ее стенке тройным зондом.

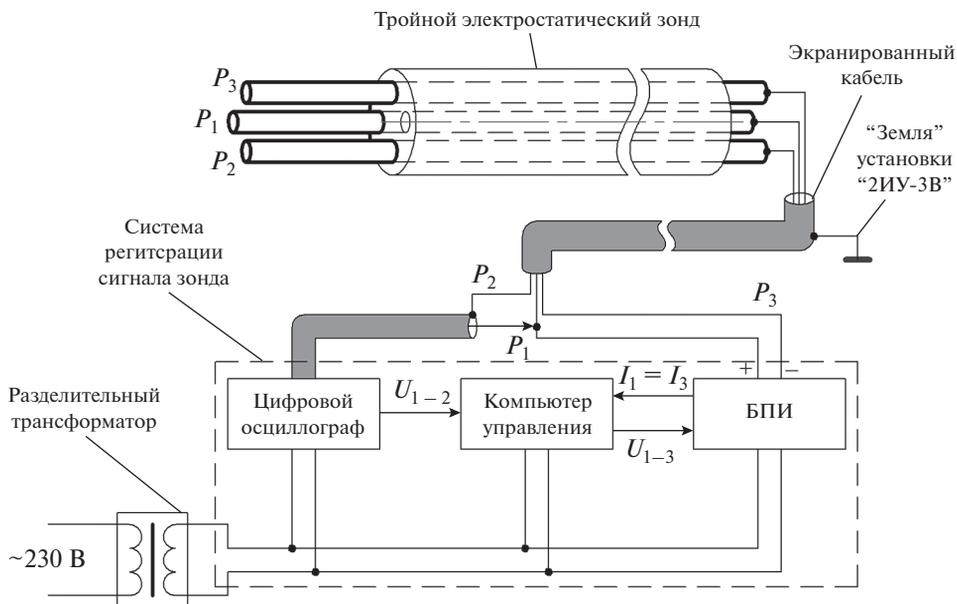


Рис. 10. Схема подключения тройного электростатического зонда.

В соответствии с методикой обработки [4] измерения производились в точке перегиба вольтамперной характеристики (ВАХ) зонда, которая для нашего исследования имела значение потенциала $U_{1-3} = 10$ В. И с учетом того, что во всех рассмотренных

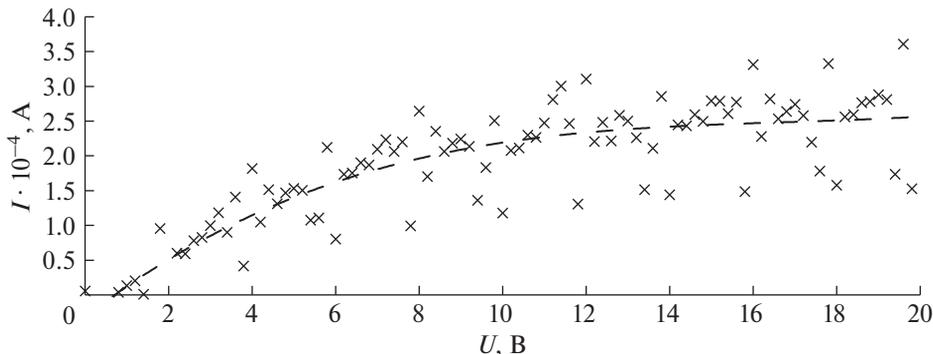


Рис. 11. Калибровочная зондовая вольтамперная характеристика.

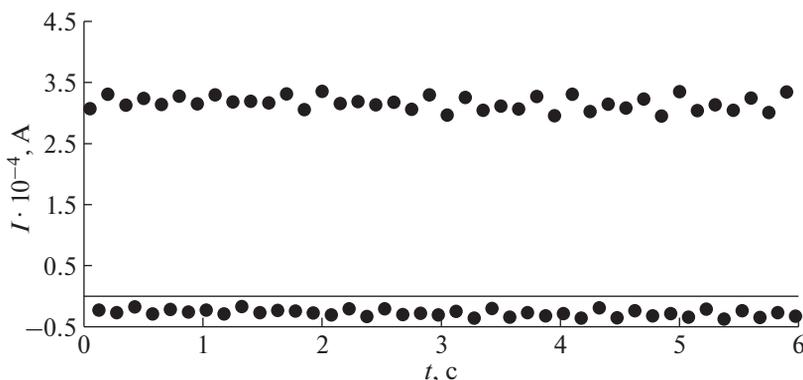


Рис. 12. Временная развертка собираемых зондом токов.

позициях зонда характер ВАХ и расположение точки перегиба практически не менялись, то все исследования производилось при данном потенциале.

Каждое измерение включало в себя 40 пульсаций продолжительностью 100 мс. Скважность импульсов составляла 1.5. Пример полученных данных с БПИ и осциллографа представлены на рис. 12 и рис. 13.

Полученные данные усреднялись. Далее с учетом значения смещения потенциала U_{1-2} и приходящего на зонд тока I , используя соотношения, предложенные в работе [6], определялись температура T_e , и концентрация n_e электронов в исследуемой точке.

$$\frac{1 - \exp\left(\frac{-eU_{1-2}}{kT_e}\right)}{1 - \exp\left(\frac{-eU_{1-3}}{kT_e}\right)} = \frac{1}{2}, \quad (1)$$

$$n_e = \sqrt{\frac{m_i}{kT_e}} \frac{I \exp\left(\frac{1}{2}\right)}{eS \left(\exp\left(\frac{eU_{1-2}}{kT_e}\right) - 1 \right)}. \quad (2)$$

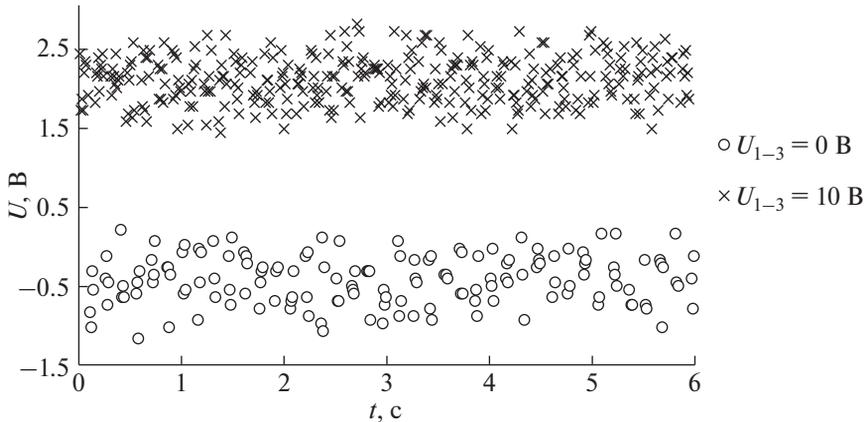


Рис. 13. Временная развертка собираемых зондом величин напряжения.

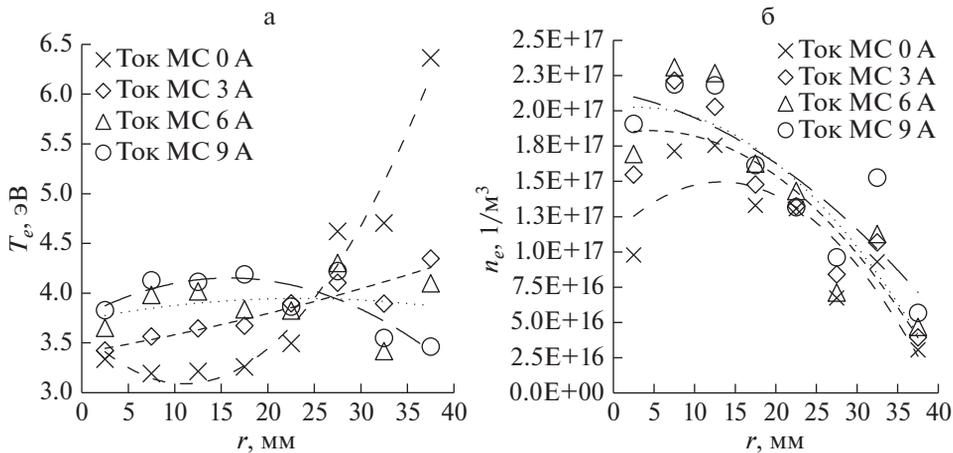


Рис. 14. Распределение параметров плазмы по радиусу РК: (а) распределение температуры электронов; (б) распределение концентрации электронов (ВЧ мощность 60 Вт, расход 2.24 сссм).

В ходе исследования было рассмотрено три режима работы двигателя:

- при ВЧ мощности 60 Вт, расходе РТ 2.24 сссм, и потенциалах эмиссионного и ускоряющего электродов 550 В и 80 В;
- при ВЧ мощности 82 Вт, расходе РТ 2.87 сссм, и потенциалах эмиссионного и ускоряющего электродов 650 В и 200 В;
- и при ВЧ мощности 98 Вт, расходе 3.98 сссм, и потенциалах эмиссионного и ускоряющего электродов 750 В и 200 В.

Параметры зонда для каждого из этих режимов снимались при различных токах в дополнительной обмотке (ток МС). Результаты измерений локальных параметров плазмы по радиусу РК представлены на рис. 14, 15 и 16.

Как видно из представленных результатов, дополнительное магнитное поле в области ВЧ разряда приводит к заметному увеличению концентрации электронов, особенно в центре РК, где индукция дополнительного постоянного магнитного поля максимальна. При этом также наблюдается выравнивание профиля температуры электронов по

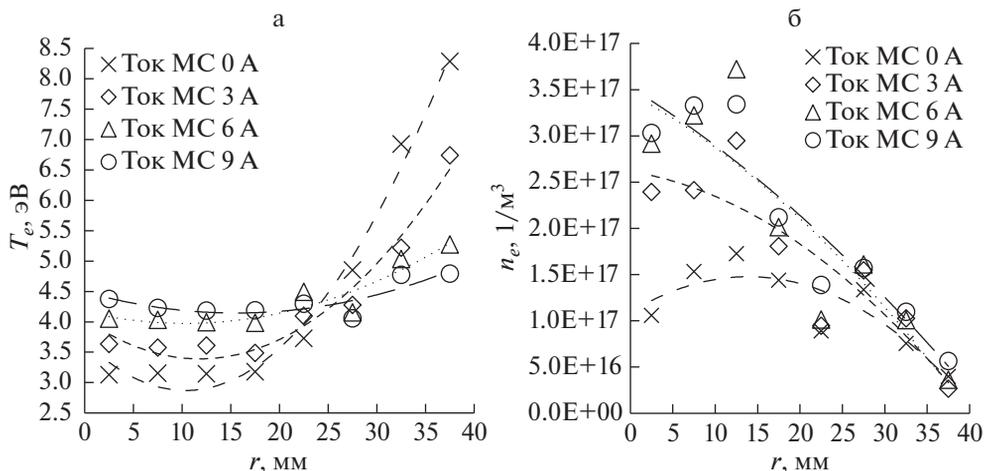


Рис. 15. Распределение параметров плазмы по радиусу РК: (а) распределение температуры электронов; (б) распределение концентрации электронов (ВЧ мощность 82 Вт, расход 2.87 sccm).

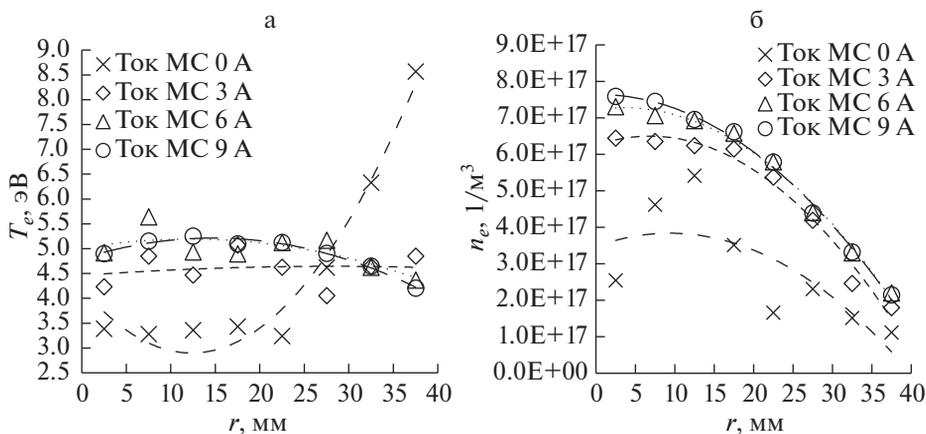


Рис. 16. Распределение параметров плазмы по радиусу РК: (а) распределение температуры электронов; (б) распределение концентрации электронов (ВЧ мощность 98 Вт, расход 3.98 sccm).

радиусу разрядной камеры, что может быть связано со снижением подвижности электронов в радиальном направлении из-за наличия дополнительного магнитного поля.

Полученные распределения локальных параметров плазмы хорошо согласуются с представленными ранее результатами исследования влияния дополнительного магнитного поля на интегральные характеристики ВЧИД (рис. 4). Наибольшее положительное влияние в обоих случаях наблюдается при повышении силы тока в обмотке до 6 А. При переходе на 9 А тока положительный эффект становится слабее.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных экспериментальных исследований были выявлены закономерности влияния дополнительного внешнего постоянного магнитного поля в об-

ласти РК, на интегральные характеристики лабораторной модели высокочастотного ионного двигателя. Установлены режимы работы двигателя и значения силы тока в дополнительной обмотке, при которых реализуется максимальный положительный эффект: увеличение извлекаемого ионного тока и коэффициента использования рабочего тела.

Исследование локальных параметров плазмы позволило получить радиальные распределения концентрации и температуры электронов поперек РК при различных значениях тока в дополнительной обмотке. Как и ожидалось, наличие дополнительного постоянного магнитного поля приводило к увеличению концентрации электронов в плазме. Наибольший эффект наблюдался в центре РК, где находится максимум индукции дополнительного магнитного поля. Помимо изменения концентрации заряженных частиц дополнительное поле приводит к выравниванию температурного профиля электронов по радиусу РК. Это подтверждает высказанные предположения об удержании электронов от выпадения на стенки РК и связанные с этим улучшения интегральных характеристик двигателя.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Важенин Н.А., Обухов В.А., Плохих А.П., Попов Г.А.* Электрические ракетные двигатели космических аппаратов и их влияние на радиосистемы космической связи. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2012.
2. *Groh K.H., Loeb H.W.* State-of-Art of Radio-Frequency Ion Thrusters // *J. Propulsion and Power*. 1991. V. 7. № 4. P. 573–579.
3. *Мельников А.В., Хартов С.А.* Экспериментальное исследование высокочастотного ионного двигателя с дополнительным магнитным полем // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2018. № 3. С. 4–11.
4. *Кожевников В.В., Хартов С.А.* Исследование локальных параметров плазмы в разрядной камере высокочастотного ионного двигателя малой мощности // *Известия Российской академии наук. Энергетика*. 2017. № 3. С. 13–20.
5. *Loeb H.W.* Principle of Radio-Frequency Ion Thrusters RIT // *RIT-22 Demonstrator Test of Astrium ST at University of Giessen*, Sept. 6–11, 2010.
6. *Chen S.L., Sekiguchi T.* Instantaneous Direct-Display System of Plasma Parameters by Means of Triple Probe // *J. Appl. Phys.* August 1965. V. 36. № 8. P. 2363–2375.

Radio Frequency Ion Thruster with Additional Magnetic System

V. V. Kozhevnikov^{a, *}, A. V. Melnikov^a, I. P. Nasarenko^a, and S. A. Khartov^a

^a*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

^{*}*e-mail: k208@mai.ru*

We investigate experimentally the integral performances of radio-frequency ion thruster laboratory model and local parameters in its discharge chamber, if additional external magnetic field is in the ionization area, and the experimental results are presented in the paper. We also numerically simulate constant magnetic field distribution in the discharge chamber and the results of simulation are given. We determine how additional magnetic field influences onto extracted ion beam current. We compare thruster's performances for the cases with and without additional magnetic field. We reveal the modes of thruster operation and dc value in the additional coil under which we have maximal value of extracted ion current. With the help of the procedure for diagnosing plasma local parameters by triple electrostatic probe, we obtain electrons concentration and temperature distribution along the discharge chamber's radius of high-frequency ion thruster with and without additional magnetic field presence in the discharge area.

Keywords: high frequency ion thruster, additional magnetic field, plasma local parameters diagnostic, ion beam current