

УДК 621.387.424, 533.09.07

С.А. ОГИЕНКО, Я.А. СЕТРАКОВА*Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина***ОСОБЕННОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ЗОНДА
С ПЛАЗМОЙ, ГЕНЕРИРУЕМОЙ УСКОРИТЕЛЕМ**

Анализируется проблема определения параметров плазмы для изучения отдельных процессов и для испытания электрореактивных двигателей. Анализируются ошибки техники, которая традиционно используется для обработки экспериментальной вольт-амперной характеристики зонда. Исследуются особенности взаимодействия плазмы и зонда в области, где электроны дрейфуют в скрещенных электрическом и магнитном полях. Основываясь на предварительных данных о температуре электронов и о плотности плазмы, распределение потенциала в слое вблизи зонда рассчитано по уравнению Пуассона. Специальная математическая модель плазмы создана, чтобы исследовать особенности процессов вблизи зонда. Предполагается, что экспериментальные результаты определения параметров плазмы электрореактивного двигателя могут уточняться на базе результатов математического моделирования.

Ключевые слова: *электрический зонд, параметры плазмы, электрореактивный двигатель, ускоритель плазмы, численный эксперимент.*

Введение

Развитие космических и наземных плазменных технологий расширяет область применения ускорителей плазмы различных типов. Как следствие, требования к эксплуатационным характеристикам ускорителей повышаются. Необходимым этапом в повышении эффективности их работы является диагностика плазмы, генерируемой этими устройствами. В различных областях машиностроения, где применяются плазменные технологии, среди методов определения параметров плазмы широко используется метод электрического зонда Ленгмюра [1]. Основным преимуществом этого метода является возможность определять локальные параметры плазмы, простота конструкции зонда и методики обработки результатов измерений, а также слабое влияние зонда на плазму. Однако, несмотря на длительное применение методики предложенной Ленгмюром, получаемые результаты имеют достаточно большую погрешность – от десятков до сотен процентов.

Это исследование направлено на изучение причин погрешностей методики Ленгмюра и, в конечном итоге, на усовершенствование методики диагностики плазмы электрическим зондом.

**1. Анализ существующих проблем,
определение задач исследования**

Суть метода диагностики плазмы зондом Ленгмюра описана в разных изданиях, например, в [1].

Условия (или допущения), необходимые для использования методики обработки измерений, предложенной Ленгмюром, следующие: – заряженные частицы попадают на всю приёмную поверхность зонда; – между слоем пространственного заряда (где распределён перепад потенциалов) вблизи зонда и плазмой выделяется протяжённая квазинейтральная область, так называемый “предслой”. В этом “предслое” распределён перепад потенциалов $\sim T_e/2$, благодаря которому энергия направленного движения ионов увеличивается на $T_e/2$; – скорость ионов на входе в “предслой” определяется энергией атомов; – магнитное поле не влияет на характер движения частиц; – электрическое поле зонда не искривляет траекторию движения заряженных частиц вблизи зонда; – протяжённость “двойного” слоя (включая слой и “предслой”) много меньше размеров зонда.

Анализ реальных параметров плазменного потока, характерных, например, для двигателя Холла (ДХ), показывает, что не всегда допущения теории Ленгмюра выполняются. Так при больших скоростях ионов может происходить разрыв плазмы без образования “предслоя”. Сильное магнитное и электрическое поле влияет на движение электронов настолько, что размер зонда оказывается одного порядка с характерной длиной пробега электрона – высотой циклоиды его траектории движения. Методики, используемые для обработки результатов измерений зондом современными исследователями, приведенные, например, в [2, 3], в лучшем случае используют поправочные коэффициенты (полученные для зонда определённого размера) для учёта

влияния магнитного поля на результат, либо это влияние вообще игнорируется. Таким образом, требуется уточнение методики обработки зондовых измерений на основе учета особенностей движения заряженных частиц вблизи зонда и в первую очередь – учета особенности движения электронов, что определяет в конечном итоге результат – параметры плазмы.

2. Уточнение методики определения параметров плазмы

Исследуемая область – зона ионизации и ускорения рабочего тела в ДХ, в которой характерные параметры плазмы и магнитного поля следующие. Концентрации заряженных частиц $n_e \approx 10^{17} \dots 10^{18} \text{ м}^{-3}$ и нейтральных - $n_a \approx 10^{20} \dots 10^{18} \text{ м}^{-3}$. Температура электронов в диапазоне $T_e = 5 \dots 60 \text{ эВ}$. Скорость ионов $v_i = 10^3 \dots 10^4 \text{ м/с}$. Магнитное и электрическое поля $B = 1 \dots 15 \text{ мТл}$ и $E \approx 10^3 \dots 10^5 \text{ В/м}$.

2.1. Моделирование процесса формирования функции распределения электронов

Для моделирования процессов взаимодействия зонда с плазмой “формировалась” группа электронов, которые имели некоторую (наперед заданную) температуру T_e при условии, что они дрейфуют в скрещенных электрическом и магнитном полях, а также имеют некоторую плотность (вероятности) функции распределения электронов по энергиям (ПФРЭЭ) (рис. 1).

Оказалось, что при “формировании” группы электронов их ПФРЭЭ соответствует Максвелловскому распределению (что принимается за показатель точности моделирования движения электронов), если учесть процессы обмена энергией между электронами через их взаимодействие с плазменными колебаниями. Для этого система уравнений движения электронов дополнялась слагаемыми – составляющими напряженности электрического поля (локализованного в месте неоднородности плазмы), величина которого оценивалась как

$$E_{\text{heter. x,y,z}}(\tau) = \pm T_e / r_D.$$

Период существования этой неоднородности оценивался как $\tau \approx 2 \cdot r_D / V_e$, где скорость электронов $V_e \sim T_e^{1/2}$ и дебаевский радиус – r_D . Система уравнений движения заряженных частиц массой m и зарядом q , компоненты скорости движения которых – $v_{x,y,z}$ в электрическом и магнитном поле с компонентами $E_{x,y}$ и $B_{x,y}$ соответственно, использовалась в виде

$$\begin{cases} m\dot{v}_x = qE_x - qv_z B_y + qE_{\text{heter x}}(\tau); \\ m\dot{v}_y = qE_y - qv_z B_x + qE_{\text{heter y}}(\tau); \\ m\dot{v}_z = qv_x B_y - qv_y B_x + qE_{\text{heter z}}(\tau). \end{cases}$$

Результат численного эксперимента – ПФРЭЭ $f_{\text{heter}}(\epsilon)$, определённая с учётом взаимодействия электронов с плазменными неоднородностями, приведена на рис. 1 при условиях: $E_x \ll E_y = 300 \text{ В/см}$ и $B_y \ll B_x = 15 \text{ мТл}$. Сравнение этой ПФРЭЭ $f_{\text{heter}}(\epsilon)$ с максвелловской ПФРЭЭ – $f_M(\epsilon)$ показывает их хорошее соответствие, и, следовательно, адекватное моделирование движения электронов.

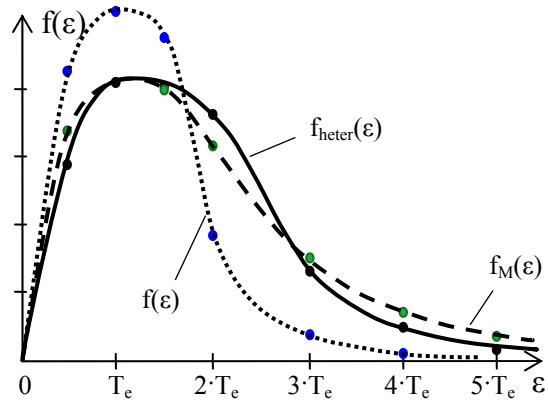


Рис. 1. Зависимости плотности функции распределения электронов по энергиям: $f_M(\epsilon)$ – распределение Максвелла при $T_e = 56 \text{ эВ}$; $f(\epsilon)$ – распределение, определённое в численном эксперименте без учёта плазменных колебаний

2.2. Математическая модель процессов в плазме вблизи зонда

Оценено, что для типичного двигателя Холла с диаметром разрядной камеры 80 мм магнитное поле будет существенно влиять на характер взаимодействия плазмы с зондом на расстоянии до 100 мм от края разрядной камеры. Вблизи зонда на границе плазмы условно выделялась поверхность, которая ограничивает не возмущённую плазму – эмитирующая поверхность, и, начиная с этой поверхности, изучались особенности движения частиц в слое вблизи зонда. Скорость ионов с зарядом q и массой M_i на границе плазмы и “двойного” слоя (далее – слой) определялась предварительно пройденной разностью потенциалов ΔU в электрическом поле ускорителя и тепловой энергией атомов T_a как $v_i = (2 \cdot (q \cdot \Delta U + T_a) / M_i)^{0.5}$. Распределение потенциала $\phi(x)$ в слое вблизи зонда и протяжённость слоя L определялись решением уравнения Пуассона в одномерной области как приближенные, и уточняются в дальнейшем на основе результатов численного эксперимента. При решении уравнения Пуассона делались следующие допущения. Полагалось, что электрическое поле и потенциал плазмы на границе слоя и плазмы близки к нулю, но могут меняться под влиянием плазменных неоднородностей (колебаний) с напряжённостью электрического поля порядка T_e / r_D . По этой же причине воз-

можно относительные отклонения в концентрации зарядов на границе слоя величиной $\varepsilon_n \approx 0,9999$, характерной для типичных в ДХ градиентов напряжённости электрического поля порядка $10^5 \dots 10^6$ В/м². Эти граничные условия, отражающие реальную картину процессов в плазме, использовались для решения уравнения Пуассона.

Распределение Больцмана использовалось как приближённое при решении уравнения Пуассона. Закономерность распределения потенциала в слое, приведенная на рис. 2, определялась следующим дифференциальным уравнением (полученным из уравнения Пуассона), учитывающим значительную скорость (энергию) иона на подлёте к зонду:

$$\frac{d^2\varphi}{dx^2} = -\frac{q}{\varepsilon_0} \left(\frac{I_i}{S_0 q \sqrt{\frac{2q\varphi}{M_i} + v_i^2}} - \frac{\varepsilon_n I_i}{S_0 q v_i} \exp\left(-\frac{\varphi}{T_e}\right) \right), \quad (1)$$

где $\varphi(x)$ – потенциал пространства на удалении x от границы слоя;

ε_0 – электрическая постоянная $8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

v_i – скорость иона перед зондом;

x – координата, где потенциал равен $\varphi(x)$;

I_i – ионный ток в потоке плазмы;

S_0 – площадь сечения плазменного потока;

ε_n – относительное изменение концентраций зарядов;

T_e – температура электронов.

Движение заряженных частиц моделировалось решением системы дифференциальных уравнений движения, приведенной в п. 2.1 при $E_{\text{heter.}x,y,z}(\tau) = 0$.

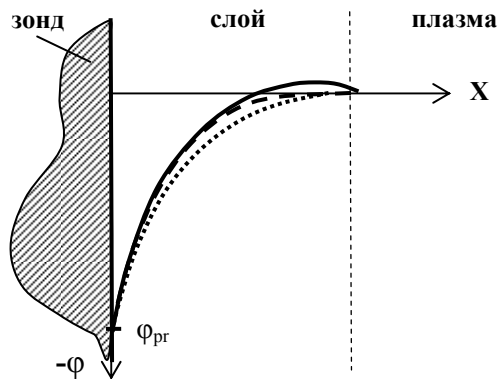


Рис. 2. Кривые $\varphi(x)$ – результат решения уравнения Пуассона. Граничные условия, которые определяются плазменными неоднородностями (колебаниями) были заданы:

⋯ $d\varphi/dx \neq 0$; — $n_e \approx 0,9999 \cdot n_i$

2.3. Численный эксперимент

Чтобы выявить особенности взаимодействия зонда с плазмой, проведен численный эксперимент,

в котором использовались: зонд с плоской приёмной поверхностью радиусом $R_{pr}=0,25$ мм (рис. 3, а), и цилиндрический зонд с радиусом $0,125$ мм (рис. 3, б)) и приёмной поверхностью длиной 1 мм. При этом расчеты выполнялись в следующей последовательности. 1) В качестве начальных условий использовались параметры плазмы, определённые по “классической” методике Ленгмюра. 2) На основе уравнения Пуассона (1) рассчитывалась протяжённость слоя и распределение потенциала вблизи зонда. 3) На основе результатов численного эксперимента определялись: плавающий потенциал φ_n , температура электронов T_e и потенциал плазмы φ_{pl} . Распределение заряженных частиц в слое рассчитывалось при численном эксперименте и использовалось для уточнения протяжённости слоя и распределения потенциала.

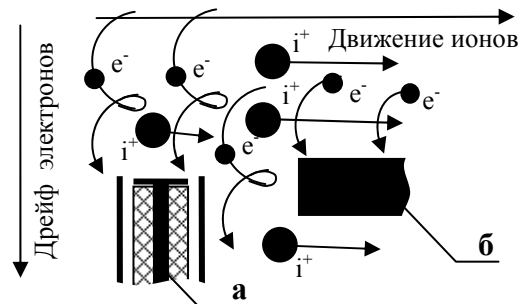


Рис. 3. Ориентация зонда: а – плоского; б – цилиндрического в потоке плазмы

В качестве потенциала плазмы (как точка отсчёта) была принята величина в 250 В, был определён плавающий потенциал $\varphi_f \approx -100$ В для цилиндрического зонда и $\varphi_f \approx 0$ для зонда с плоской приёмной поверхностью (рис. 4 и 5 соответственно).

3. Анализ результатов численного эксперимента

Чтобы определить температуру электронов, из суммарного тока на зонд I_{pr} , определённого в ходе эксперимента, выделен ток электронов I_e и ионов I_i на зонд и рассчитана зависимость $\ln(I_e(\varphi_{pr}))$, а затем и $T_e(\varphi_{pr}) = -d\varphi/d(\ln(I_e(\varphi_{pr})))$. Разница между потенциалом плазмы φ_{pl} и плавающим потенциалом зонда φ_f может быть определена по известной формуле $\varphi_{pl} - \varphi_f = T_e / 2 \cdot \ln(M_i / (2 \cdot \pi \cdot m)) \approx 5,8 \cdot T_e$, где m – масса электрона.

Анализ зависимости $T_e(\varphi_{pr})$ для цилиндрического зонда (см. рис. 4) показывает, что расчётная величина температуры электронов, различна в разных диапазонах φ_{pr} . По известной формуле разница $(\varphi_{pl} - \varphi_f)$ определяется как $\varphi_{pl} - \varphi_f \approx 5,8 \cdot T_e = 754$ В для ксенонной плазмы при температуре электронов, определённой в области плавающего потенциала зонда.

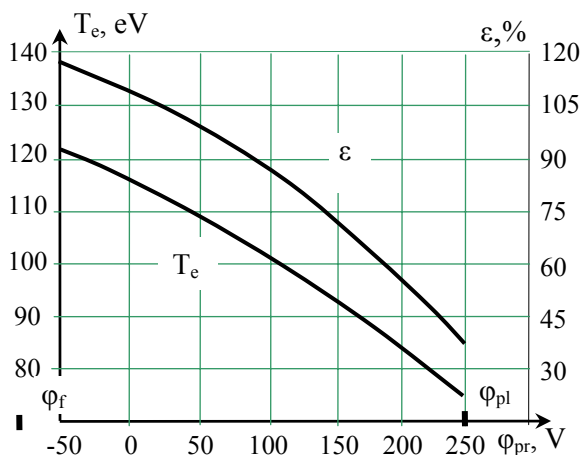


Рис. 4. Зависимость $T_e(\Phi_{пр})$, определённая по методике Ленгмюра, и её погрешность ϵ при использовании в численном эксперименте цилиндрического зонда и заданной $T_{e0}=56$ эВ

По результатам численного эксперимента отличие потенциала плазмы от плавающего потенциала составило ≈ 350 В, а погрешность определения потенциала плазмы по традиционно используемой методике составила 115%. Следует также заметить, что ориентация зонда, выбранная для эксперимента, не оптимальна, так как зонд замыкает слои плазмы, которые имеют существенно различный потенциал, что, как следствие, может влиять на работу ускорителя.

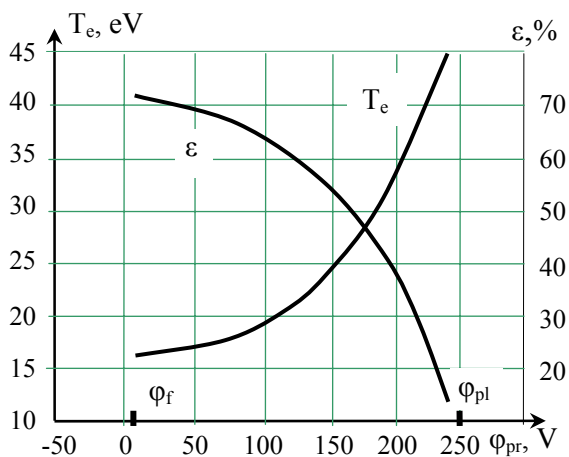


Рис. 5. Зависимость $T_e(\Phi_{пр})$, определённая по традиционной методике, и её погрешность ϵ при использовании в численном эксперименте плоского зонда и заданной $T_{e0}=56$ эВ

Анализ определённых зависимостей $T_e(\Phi_{пр})$ позволяет сделать следующие заключения. Изменение расчётного значения температуры электронов в зависимости от потенциала зонда – это следствие процесса обтекания зонда потоком электроном, ко-

гда зонд находится под отрицательным потенциалом по отношению к плазме. Влияние этого эффекта обтекания может усиливаться, если используется цилиндрический зонд маленького диаметра и особенно если толщина слоя близка к радиусу зонда, что характерно для области больших температур электронов.

К источникам погрешности результатов численного эксперимента следует, в первую очередь, отнести ограниченное количество частиц, используемых для моделирования.

Необходимое количество частиц – 10^6 – было выбрано на основе яркой тенденции к насыщению электронной компоненты тока на зонд (рис. 6) при росте количества частиц.

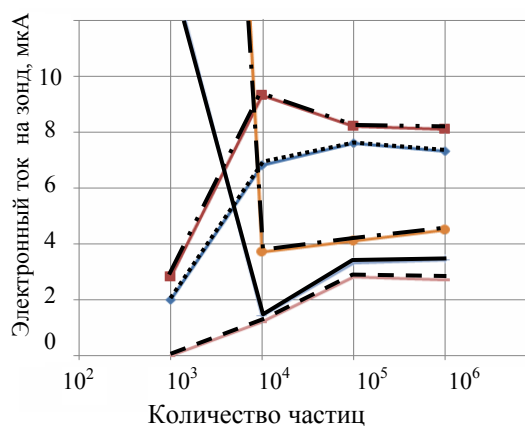


Рис. 6. Зависимость электронного тока на зонд от количества частиц, использованных для расчёта, при различных потенциалах зонда

Заключение

Проведены исследования численным методом закономерностей взаимодействия зонда с плазмой с использованием данных натурального эксперимента. На основе результатов определено следующее. Погрешность определения температуры электронов и потенциала плазмы в области сильного магнитного и электрического полей в случае, когда используется традиционная методика Ленгмюра, может превышать 100%, вследствие использования зонда ограниченных размеров, что приводит к обтеканию потоком электронов приёмной поверхности зонда. Как следствие, концентрация плазмы, определённая по температуре электронов и току электронов на зонд, будет заниженной.

Рекомендуется использовать эти параметры как первоначальные и уточнять их с учётом особенностей взаимодействия зонда с плазмой в конкретных условиях путём численного эксперимента.

Гипотеза о существовании в низкотемпературной неравновесной плазме двух групп электронов

[4], которые имеют различные температуры, может быть опровергнута следующим образом. Особенности взаимодействия зонда с плазмой (обтекание зонда потоком электронов), проявляются в том, что зависимость $T_e(\varphi_{pr}) \neq \text{const}$ и это создаёт видимость присутствия электронов нескольких групп с разными температурами.

В качестве направления дальнейших исследований с целью усовершенствования методики определения параметров плазмы зондом Ленгмюра определено изучение закономерностей распределения электрического поля вблизи зонда, находящегося под положительном потенциалом, и уточнение распределения концентрации электронов в потенциальном электрическом поле вблизи зонда.

Литература

1. Козлов О.В. *Электрический зонд в плазме* / О.В. Козлов. – М.: Наука, 1969. – 218 с.
2. Smirnov A. *Plasma measurements in a 100 W cylindrical Hall thruster* / A. Smirnov, Y. Raitses, N. Fisch // *J. Appl. Phys.* – 2004. – Vol. 95, №5. – P. 235-248.
3. Raitses Y. *Electron-wall interaction in Hall thrusters* / Y. Raitses, D. Staack // *Physics of plasma J.* – 2005. – Vol. 12, №2. – P. 156-161.
4. Бугрова А.И. *Современное состояние исследований процессов в УЗДП // Плазменные ускорители и ионные инжекторы* / под ред. А.И. Бугровой. – М.: Наука, 1984. – С. 111-125.

Поступила в редакцию 20.05.2008

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, зав. кафедрой Г.И. Костюк, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ШЛЯХИ Й МЕОДИ ПІДВИЩЕННЯ ТОЧНОСТІ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПЛАЗМИ ЕЛЕКТРОРЕАКТИВНОГО ДВИГУНА ЕЛЕКТРИЧНИМ ЗОНДОМ

С.А. Огієнко, Я.О. Сетракова

Аналізується проблема визначення параметрів плазми для вивчення окремих процесів та для випробування електрореактивних двигунів. Аналізуються похибки техніки, яка традиційно використовується для обробки експериментальної вольт-амперної характеристики зонду. Досліджуються особливості взаємодії плазми та зонду в області де електрони дрейфують у схрещених магнітному та електричному полях. Базуючись на попередніх даних про температуру електронів та щільність плазми, розподіл потенціалу в шарі поблизу зонду розраховано за рівнянням Пуассона. Спеціальну математичну модель плазми було створено, щоб дослідити особливості процесів поблизу зонда. Було запропоновано, що експериментальні результати визначення параметрів плазми електрореактивного двигуна можуть бути уточнені на основі результатів математичного моделювання.

Ключові слова: електричний зонд, параметри плазми, електрореактивний двигун, прискорювач плазми, чисельний експеримент.

THE WAYS AND METHODS OF ACCURACY INCREASING OF THRUSTER PLASMA PARAMETERS DETERMINING BY AN ELECTRIC PROBE

S.A. Oghienko, Y.A. Setracova

The problem of plasma parameters determining for separate processes studying and for testing of the thrusters is analyzed. Inaccuracies of a technique, which is traditionally used for processing of experimental probe volt-ampere characteristics, are analyzed. Features of probe-plasma interaction in area where electrons drift in the crossed magnetic and electric fields are investigated. Based on a preliminary estimation of electron temperature and plasma density, potential distribution in a layer nearby the probe is calculated from Poisson equation. The special mathematical model of plasma has been created to study features of processes nearby the probe. It was suppose that results of an experimental research of thruster plasma parameters can be specified based on results of mathematical modeling.

Key words: electric probe, plasma parameters, thruster, plasma accelerator, numerical experiment.

Огиенко Сергей Анатольевич – канд. техн. наук, старший научн. сотр. кафедры «Двигателей и энергоустановок летательных аппаратов» Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: thrust@d4.khai.edu.

Сетракова Яна Алексеевна – магистр, специальность «Двигатели и энергоустановки летательных аппаратов», Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: yanaxai@mail.ru.