

УДК 533.9.07

С. А. ОГИЕНКО

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Украина

ВЛИЯНИЕ АЗИМУТАЛЬНОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПЛАЗМООБРАЗУЮЩЕГО ГАЗА НА ТРАНСПОРТИРОВКУ ЭЛЕКТРОНОВ И РАЗРЯДНЫЙ ТОК В УСКОРИТЕЛЕ С ЗАМКНУТЫМ ДРЕЙФОМ ЭЛЕКТРОНОВ

Исследования проведены, чтобы определить влияние азимутальной неоднородности плазмы на скорость транспортировки электронов (проводимость плазмы) в стационарном разряде в скрещенных электрическом и магнитном полях ускорителя. Для этого в эксперименте впервые специально создавалась азимутальная неоднородность газа в разрядной камере ускорителя на номинальном режиме работы, а как следствие, создавалась соответствующая неоднородность плазмы и измерялся разрядный ток. По изменению разрядного тока определялось изменение потока электронов с катода на анод, который в свою очередь зависит от скорости транспортировки электронов. Эксперимент проведен варьируя напряжением разряда и магнитным полем. Впервые показано, что увеличение азимутальной неоднородности газа на $\approx 8\%$ в разрядном промежутке может привести к росту разрядного тока ускорителя до $\approx 200\%$ из-за роста его электронной компоненты.

Ключевые слова: плазма, двигатель с замкнутым дрейфом электронов, скорость транспортировки электронов, аномальная проводимость плазмы.

Введение

Ускорители с замкнутым дрейфом электронов стационарного типа, которые изначально были разработаны для проведения реакций ядерного синтеза, в настоящее время широко используются в разнообразных космических и наземных технологиях в качестве двигателя либо как источник ионов с высокими энергиями для модификации свойств поверхности изделий. Притом, что со времён первых моделей достигнут значительный прогресс в улучшении их рабочих характеристик, во многих странах продолжают интенсивно проводиться научно-технические работы по совершенствованию ускорителей с замкнутым дрейфом электронов. Среди таких исследований работы по модернизации т.н. стационарного плазменного двигателя (СПД) считаются наиболее перспективными и занимают лидирующее место. При этом требует своего решения одна из основных научных проблем – неопределённость механизма аномальной проводимости плазмы в скрещенных электрическом и магнитном полях, от которой зависят разрядный ток, мощность и КПД ускорителя, и которая является базой для его технического совершенствования.

1. Анализ существующих проблем, определение задач исследования

Для проведения технической модернизации ускорителя с замкнутым дрейфом электронов с целью

расширения диапазона его рабочих характеристик (мощности, энергии ионов, расхода газа) необходимо понимание базовых физических процессов, среди которых – транспортировка электронов через разрядный промежуток с аномально высокой скоростью, механизм которой до сих пор не определён. В настоящее время при моделировании процессов в плазме в скрещенных магнитном B и электрическом E полях для получения количественно точных результатов формально используют т.н. проводимость Бома в виде коэффициента $\mu = 1/(16 \cdot B)$, так что скорость транспортировки электронов $V_{tr} = E \cdot \mu$, при этом не оговаривая физических процессов, лежащих в её основе. Так как скорость транспортировки V_{tr} определяет разрядный ток, электрическую мощность и тяговый КПД ускорителя, то возможность управлять скоростью V_{tr} позволит расширить диапазон рабочих характеристик ускорителя путём его технической модернизации. На основе анализа результатов исследований в России и Израиле [1, 2] автором была выдвинута гипотеза об определяющей роли азимутальной неоднородности плазмы и о её причине – азимутальной неоднородности плазмообразующего газа в разрядном промежутке на скорость переноса электронов и, т.о., на разрядный ток. Чтобы проверить это предположение, в настоящих исследованиях поставлена задача – определить влияние азимутальной неоднородности распределения газа в разрядном промежутке ускорителя типа СПД на величину разрядного тока, варьируя магнитным полем и напряжением разряда.

2. Подготовка оборудования к проведению эксперимента

Эксперимент был проведен, чтобы подтвердить предположение о значительном влиянии азимутальной неоднородности распределения концентрации ионов в потоке плазмы двигателя на проводимость электронов и величину разрядного тока СПД.

Чтобы создать азимутальную неоднородность концентрации ионов в плазме в ходе эксперимента искусственно создавалась азимутальная неоднородность концентрации газа вблизи поверхности анода-газораспределителя (далее - анод). При этом полагалось, что при условии эффективной ионизации газа в узкой зоне ионизации (более 95 %, что характерно для СПД) относительная неоднородность концентрации ионов будет соответствовать относительной неоднородности газа в этой зоне, с учётом выравнивания неоднородности газа по мере его течения от места ввода (из анода) к зоне ионизации в разрядной камере (РК). На этом этапе исследований полагалось, что при поступлении газа в РК через анод не создаётся азимутальной неоднородности в его распределении в РК. Полагалось также, что после зажигания разряда соотношение потоков газа через анод и дополнительные подводы не изменяется, поскольку оба газопровода нагреваются до одинаковой температуры и режим течения газа в них не меняется, а перепад давления - постоянный.

Для создания контролируемой неоднородности газа предусмотрены два дополнительных подвода газа через трубопроводы с внутренним диаметром $\varnothing_{\text{вн}}=3$ мм (см. рис. 1) в РК, а также система капилляров ($\varnothing_{\text{вн}}=0,3$ мм) для распределения общего расхода газа между анодом и дополнительными подводами. Полагалось, что сопротивление течению газа пропорционально 4 степени диаметра трубопровода и поэтому основное сопротивление течению газа создают капилляры (K0, K1, K2 и K3), диаметр которых примерно в 10 раз меньше диаметра трубопроводов. Варьируя (дискретно, клапанами КЛ0...КЛ3) соотношение длин капилляров (L_0, L_1, L_2, L_3 см. табл. 1) в двух трубопроводах, будем перераспределять расход газа обратно пропорционально суммарной длине капилляров - $L_0/L_1 \sim \dot{m}_1/\dot{m}_0$, $L_0/(L_1+L_2) \sim \dot{m}_{12}/\dot{m}_0$, $L_0/(L_1+L_2+L_3) \sim \dot{m}_{123}/\dot{m}_0$, где \dot{m}_{123} - расход газа через подключённые последовательно капилляры K1, K2 и K3, \dot{m}_0 - расход через капилляр K0 и т.п.

Определим распределение потока газа $\dot{m}_{\text{рк}}$ поступающего из ресивера в РК на два потока в эксперименте 2 (табл. 1): поток \dot{m}_0 через газопровод, подводящий газ в РК через анод и поток \dot{m}_1 через газопровод, предназначенный для дополнительного подвода газа в РК - для создания неоднородности. Тогда $\dot{m}_{\text{рк}} = \dot{m}_0 + \dot{m}_1$. Обозначим постоянный перепад

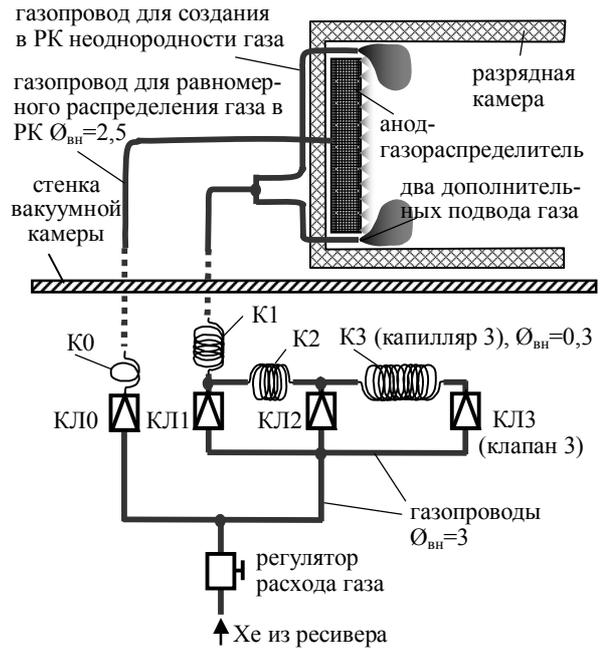


Рис. 1. Схема подвода и распределения газа в разрядную камеру СПД

давлений на входе и выходе капилляров 0 и 1 как $\Delta P = P_{\text{вх}} - P_{\text{вых}}$ при открытых клапанах КЛ0, КЛ1 и закрытых КЛ2 и КЛ3. Сопротивление течению газа через капилляры 0 и 1 обозначим R_0 и R_1 соответственно и учтём, что $R_0 \sim L_0 \sim 5$, $R_1 \sim L_1 \sim 25$ и $R_1 = R_0 \cdot 5$. Тогда расходы $\dot{m}_0 = \Delta P / R_0$ и $\dot{m}_1 = \Delta P / R_1$ и суммарный расход $\dot{m}_{\text{рк}} = \Delta P / R_0 + \Delta P / R_1 = \Delta P / R_0 \cdot (1 + 1/5)$. Отсюда сопротивление течению $R_0 = \Delta P / \dot{m}_{\text{рк}} \cdot 1,2$, а расход $\dot{m}_0 = \Delta P / R_0 = \dot{m}_{\text{рк}} / 1,2$ и $\dot{m}_1 = \Delta P / R_1 = \dot{m}_{\text{рк}} / 6$ (табл. 1). Аналогично рассчитаны расходы в экспериментах 3, 4.

Результаты замеров суммарного расхода газа через РК ($\dot{m}_{\text{рк}}$) - через анод и два дополнительных подвода (через набор капилляров) приведены в табл. 1, где: абсолютные и относительные значения соответствуют расходу газа, когда разряд не горит; относительные - см. эксперименты 1, 2, 3, 4, где $\dot{m}_{\text{рк}} = \dot{m}_{\text{ркА}}$, $\dot{m}_{\text{рк}}/1,2$ и $\dot{m}_{\text{рк}} = \dot{m}_{\text{ркА}} \cdot 1,04 \dots \dot{m}_{\text{рк}}/21$ и $\dot{m}_{\text{рк}} = \dot{m}_{\text{ркА}} \cdot 1,01$ соответствуют расходам, принятым для анализа результатов эксперимента с работающим двигателем.

Используя результаты экспериментов 1, 4, 5 и 6 проведен следующий анализ. На основе сравнения результатов 1 и 5 экспериментов, сделан вывод о том, что „подсоединение„ дополнительных $\Delta L = L_1 - L_0 = 25 - 5 = 20$ мм капилляра в 5 эксперименте, где $L_1 = 25$ мм (по сравнению с 1 экспериментом, где $L_0 = 5$ мм) привело к снижению расхода на $\Delta \dot{m}_{\text{рк}} = \dot{m}_{\text{рк}} - 1,14 = 1,31 - 1,14 = 0,17$ (мг/с). Полагается, что каждый миллиметр капилляра снижает расход на величину $\Delta \dot{m}_{\text{рк}} / \Delta L = 0,17 / 20$ (мг/с/мм), а каждые 5 мм - на величину $\Delta \dot{m}_{\text{рк}} / \Delta L \cdot 5 = 0,17 / 20 \cdot 5 \approx 0,04$ (мг/с). Тогда при отсутствии дросселирующего капилляра K0 расход

Таблица 1

Создание азимутальной неоднородности ϵ_{na} распределения газа в РК ускорителя

| N эксперимента | Расходы газа через анод-газораспределитель (анод) и два дополнительных ввода в РК, мг/с | | | | Измеренный полный расход газа через РК, \dot{m}_{PK} , мг/с | Неоднородность газа в РК $\epsilon_{na} = \Delta n_a / n_a \cdot 100\%$ |
|----------------|---|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|---|---|
| | через анод, капилляр 0 ($L_0=5$ мм) | через капилляр 1 ($L_1=25$ мм) | через капилляр 2 ($L_2=25$ мм) | через капилляр 3 ($L_3=50$ мм) | | |
| 1 | \dot{m}_{PK} | 0 | 0 | 0 | $\dot{m}_{PKA}=1,31$ | 0 |
| 2 | $\dot{m}_{PK}/1,2$ | $\dot{m}_{PK}/6$ | 0 | 0 | $\dot{m}_{PKA} \cdot 1,04$ | 8,5 |
| 3 | $\dot{m}_{PK}/1,1$ | $\dot{m}_{PK}/11$ | $\dot{m}_{PK}/11$ | 0 | $\dot{m}_{PKA} \cdot 1,03$ | 4,5 |
| 4 | $\dot{m}_{PK}/1,05$ | $\dot{m}_{PK}/21$ | $\dot{m}_{PK}/21$ | $\dot{m}_{PK}/21$ | $\dot{m}_{PKA} \cdot 1,01$ | 2,4 |
| 5 | 0 | 1,14 | 0 | 0 | 1,14 | Разряд не зажигался |
| 6 | 0 | 0,97 | 0,97 | 0 | 0,97 | |
| 7 | 0 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | 0,56 | |

газа через регулятор расхода был бы $\dot{m}_{PP} = \dot{m}_{PK} + \Delta \dot{m}_{PK} / \Delta L \cdot 5 = 1,35$ (мг/с), а расход в 6 и 4 экспериментах был бы $\dot{m}_{PP} = (25+25)/5 \cdot 0,04 = 0,95$ (мг/с), тогда как определено в эксперименте – 0,97 мг/с, ожидаемый расход в 7 и 5 экспериментах $\dot{m}_{PP} = (25+25+50)/5 \cdot 0,04 = 0,55$ (мг/с), тогда как расход, определённый в эксперименте – 0,56 мг/с. Т.о., величина относительная погрешности задания расхода $(0,97-0,95)/0,95 \cdot 100\% \approx 2\%$, что в целом указывает на удовлетворительную степень точности замеров расхода газа и распределения газа между двумя газопроводами при вводе его в РК.

Относительная азимутальная неоднородность концентрации газа $\Delta n_a / n_a$ вблизи поверхности анода-газораспределителя (анода) в месте дополнительного подвода газа в РК (через один из двух дополнительных подводов газа) определяется как $\epsilon_{na} = \Delta n_a / n_a = (\dot{m}_{PK}/6 \cdot 1/2) / (\dot{m}_{PK}) = 0,085$ в эксперименте 2 и, аналогично, в 3 и 4 экспериментах (см. табл. 1).

3. Проведение эксперимента, результаты

Чтобы подтвердить предположение о значительном влиянии азимутальной неоднородности распределения концентрации ионов в потоке плазмы СПД на проводимость электронов и величину разрядного тока проведен эксперимент с использованием двигателя типоразмера М-70 (производитель – один из мировых лидеров – фирма „Факел“, Россия) в следующих условиях и последовательности.

Вакуумная камера откачивалась до остаточного давления $3 \cdot 10^{-5}$ тор, зажигался разряд, двигатель выводился на режим работы близкий к номинальному (расход газа через РК $\dot{m}_{PKH} = 2,16$ мг/с и 0,42 мг/с через катод, напряжение $U_d = 300$ В, ток разряда $I_d = 2,3 \dots 2,4$ А, магнитная индукция $B_r = 15$ мТл при токе через соленоид $I_c = 2,2$ А, ток через кипер катода

$\approx 0,1$ А) и прогревался в течение 15 минут для стабилизации разрядного тока при давлении $2,2 \cdot 10^{-4}$ тор. Далее эксперимент проводился при давлении в диапазоне $2,2 \cdot 10^{-4} \dots 1,5 \cdot 10^{-4}$ тор.

Измерения проводились при постоянном массовом расходе газа через катод 0,42 мг/с и постоянном расходе через РК – $\dot{m}_{PK} = \dot{m}_{PKH} = 2,16$ мг/с при различных дискретных значениях: разрядного напряжения, тока соленоида, расхода Хе через дополнительные подводы в РК в следующей последовательности. 1. Задавался расход Хе через РК $\dot{m}_{PK} = \dot{m}_{PKH} = 2,16$ мг/с. 2. Задавался расход Хе через дополнительные подводы в РК – один из трёх – $\dot{m}_{PK}/6$, $\dot{m}_{PK}/11$ и $\dot{m}_{PK}/21$ (табл. 1, эксперименты 2, 3 и 4). 3. Устанавливался ток соленоида (от 3,0 до 1,5 А), чтобы создать индукцию магнитного поля на срединной поверхности РК двигателя величиной 20, 15 и 10 мТл. 4. Менялось разрядное напряжение последовательно от 320 В до 160 В при одном значении тока соленоида и определялся разрядный ток. Измерения повторялись при следующем значении тока соленоида, и т.д. до конца диапазон. После этого менялся расход Хе через дополнительные подводы (при постоянном расходе газа через РК) и цикл измерений повторялся. Результаты измерений представлены на рис. 2, 3 и 4.

В эксперименте автором использованы системы электропитания, подвода и измерения расхода газа к ускорителю стенда СВ-10К, разработанные ранее с.н.с. каф.401 ХАИ В.И. Белоконов.

Заключение

На основе анализа результатов эксперимента сделаны следующие выводы.

1. Увеличение азимутальной неоднородности распределения газа ϵ_{na} приводит к неоднородности

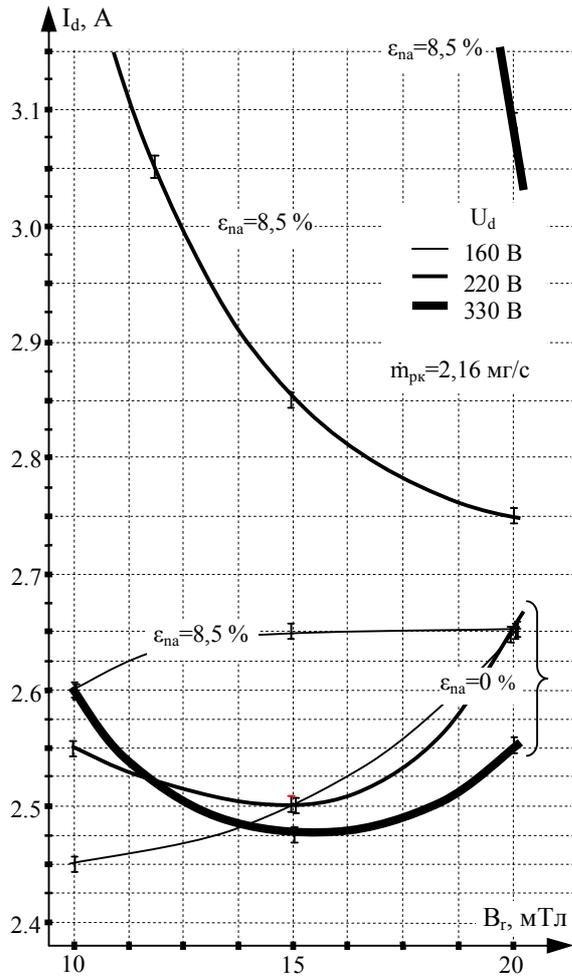


Рис. 2. Зависимость тока разряда I_d от магнитного поля B_t при различных напряжениях разряда U_d и неоднородностях ϵ_{na} газа в РК

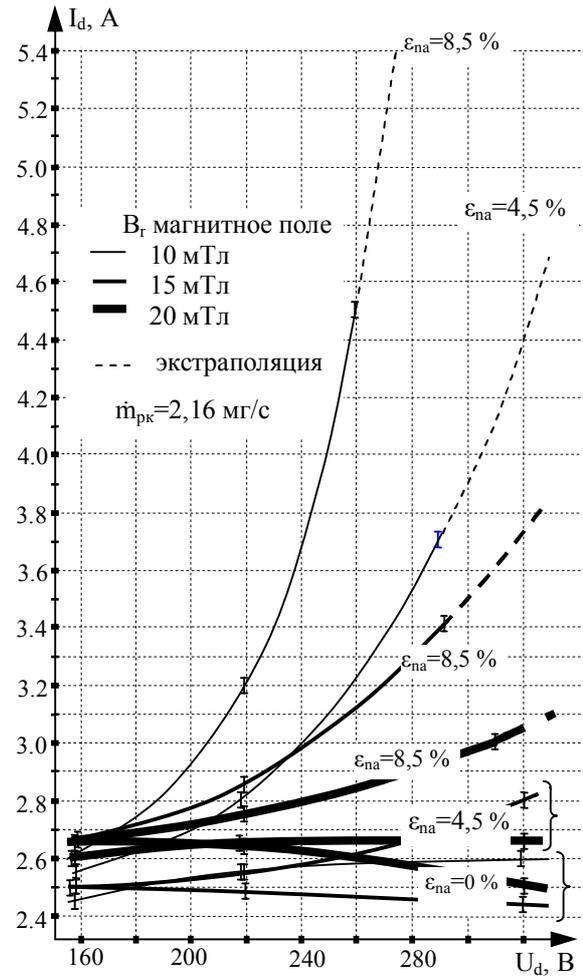


Рис. 3. Вольт-амперная характеристика ХД при различных созданных азимутальных неоднородностях ϵ_{na} в распределении газа в РК

ионов в потоке плазмы, что в свою очередь ведёт к росту проводимости плазмы и к увеличению разрядного тока I_d (рис. 3) во всём диапазоне значений напряжения разряда U_d и магнитного поля B_t .

2. Зависимости разрядного тока $I_d(B_t)$ имеют характерный минимум, который при увеличении неоднородности ϵ_{na} смещается в сторону больших напряжений разряда U_d и индукции магнитного поля B_t (рис. 2).

3. В разрядном токе I_d доли электронного тока с катода I_{e0} в разрядную камеру и ионного тока I_I из разрядной камеры, показанные на рис. 4, определены при условии, что на режимах работы двигателя, близких к расчётному по напряжению и расходу газа, когда максимум $\approx 95\%$ атомов Хе в разрядной камере однократно ионизируются и покидают её в виде компенсированного по заряду тока ионов I_I . Поэтому регистрируемое в эксперименте увеличение разрядного тока I_d при этих условиях определяется, преимущественно, ростом электронного тока I_{e0} с катода в разрядную камеру.

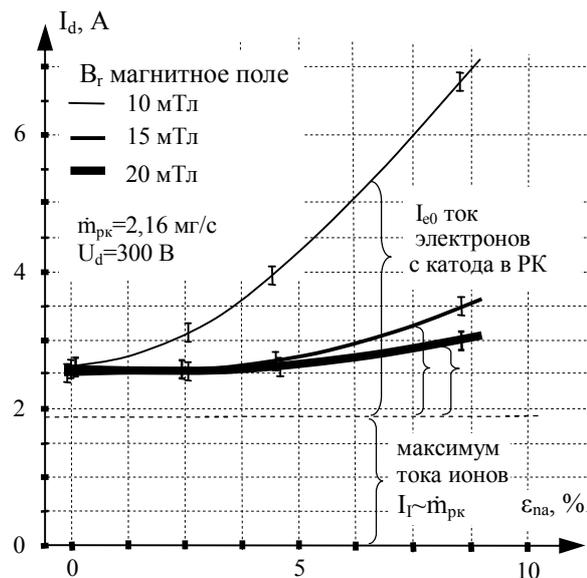


Рис. 4. Зависимость тока разряда I_d от специально созданной неоднородности ϵ_{na} газа в РК при различной индукции поля B_t

4. Следует заметить, что даже при нулевом значении специально созданной неоднородности газа $\epsilon_{na}=0$ (рис. 4), вследствие неоднородности подачи газа через анод, а также неточности изготовления и сборки элементов конструкции двигателя газ распределяется в азимутальном направлении разрядной камеры неоднородно – 3...3,5 % у анода – как было рассчитано ранее.

В дальнейшем предполагается провести аналогичные экспериментальные исследования на режиме работы двигателя с пониженным расходом плазмообразующего газа через разрядную камеру и, используя экспериментальные результаты, определить аналитическую зависимость для аномальной скорости транспортировки электронов от параметров разряда в электрическом и магнитном полях.

Поступила в редакцию 26.09.2013, рассмотрена на редколлегии 11.12.2013

Рецензент: д-р техн. наук, профессор, главный научн. сотр. кафедры “Ракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов” А. И. Оранский, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.

ВПЛИВ АЗИМУТАЛЬНОЇ НЕОДНОРІДНОСТІ ПЛАЗМОУТВОРЮЮЧОГО ГАЗУ НА ТРАНСПОРТУВАННЯ ЕЛЕКТРОНІВ ТА РОЗРЯДНИЙ СТРУМ У ПРИСКОРЮВАЧІ ІЗ ЗАМКНЕНИМ ДРЕЙФОМ ЕЛЕКТРОНІВ

С. А. Огієнко

Дослідження проведено, щоб визначити вплив азимутальної неоднорідності плазми на швидкість транспортування електронів (провідність плазми) у стаціонарному розряді у схрещених електричному та магнітному полях прискорювача. Для цього в експерименті вперше навмисно створювалась азимутальна неоднорідність газу у розрядній камері прискорювача на номінальному режимі роботи, а як наслідок, створювалась відповідна неоднорідність плазми та вимірювався розрядний струм. За зміною розрядного струму визначалась зміна потоку електронів з катоду на анод, який у свою чергу залежить від швидкості транспортування електронів. Експеримент проведено при варіюванні напругою розряду та магнітним полем. Вперше показано, що зростання азимутальної неоднорідності газу на $\approx 8\%$ у розрядному проширці може призвести до росту розрядного струму до $\approx 200\%$ внаслідок росту його електронної компоненти.

Ключові слова: плазма, двигун із замкненим дрейфом електронів, швидкість транспортування електронів, аномальна провідність плазми.

INFLUENCE OF AZIMUTHAL HETEROGENEITY OF PLASMA MAKING GAS TO THE ELECTRON TRANSPORTATION AND DISCHARGE CURRENT IN THE ACCELERATOR WITH CIRCULAR ELECTRON DRIFT

S. A. Oghienko

Researches are carried out to determine influence of azimuthal plasma heterogeneity to the electron transportation velocity (plasma conductivity) in the stationary discharge in crossed electric and magnetic fields of the accelerator. For this purpose for the first time azimuthal gas heterogeneity in the discharge chamber of the accelerator operating in a nominal mode and, as consequence, corresponding plasma heterogeneity was specially created in experiment and the discharge current was measured. Basing on the discharge current changing it was determined the changing of electron flow from the cathode to the anode, which in turn depends on electron transportation velocity. Experiment is carried out by varying a discharge voltage and a magnetic field. For the first time it was shown that the increasing of azimuthal gas heterogeneity $\approx 8\%$ in a discharge interval can lead to the increasing of accelerator discharge current up to $\approx 200\%$ because of its electronic component increasing.

Key words: plasma, thruster with circular drift of electron, velocity of electron transportation, anomalous plasma conductivity

Огієнко Серей Анатольевич – канд. техн. наук, старший научн. сотр. кафедры “Ракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов”, Национальный аэрокосмический университет им. Н. Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: oghienko@yahoo.com.

Литература

1. Jacupov, A. The possibility of near anode process controlling for perspective SPT models [Text] / A. Jacupov, S. Khartov, L. Latyshev // Proc. of the Int. Electric Propulsion Conf., - Moscow (Russia). 1995. – 12 p. (Paper № 1995-48).

2. Study and diagnostics of the effect of length variation in Hall Thrusters [Text] / J. Ashkenasy, Y. Raitsws, G. Appelbaum, M. Guelman // Proc. of the Int. Electric Propulsion Conf., - Moscow (Russia). 1995. – 8 p. (Paper № 1995-29).