

УДК 533.9.07, 533.9.082.74, 621.3.095.21

С.А. ОГИЕНКО

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

## ГЕНЕРИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ СВЧ ДИАПАЗОНА В ПЛАЗМЕ ДВИГАТЕЛЯ ХОЛЛА

Изучаются механизмы непосредственного генерирования электромагнитного излучения СВЧ диапазона в плазме двигателя Холла, которое является помехой радиосигналу связи космического аппарата через ионосферу Земли. Для анализа использованы результаты экспериментов по определению спектральной плотности мощности СВЧ излучения исследователей США ( $10^{-63}$  Вт/МГц) и России ( $10^{-10}$  Вт/МГц). В дипольном приближении выполнен расчёт мощности электромагнитного излучения в характерном диапазоне  $f=1,5...10$  ГГц. На основе этого расчёта проанализированы возможные механизмы генерирования СВЧ излучения - тормозной и циклотронный, а также излучение электронов при ускоренном движении через локальные области с перепадом потенциала – в радиальном направлении на границе и в азимутальном направлении в объёме осесимметричного потока плазмы – наиболее вероятные причины генерирования электромагнитного СВЧ излучения непосредственно в результате движения зарядов в плазме двигателя.

**Ключевые слова:** плазма, двигатель Холла, расчёт мощности электромагнитного излучения, СВЧ диапазон.

### Введение

Базовая конструкция двигателя Холла (ХД) (рис. 1) используется в составе двигательных установок космических аппаратов уже десятки лет благодаря хорошему сочетанию эксплуатационных характеристик - приемлемый тяговый КПД и надёжность - первых моделей двигателя. Дальнейшее развитие ХД предполагает поиск решения проблем, которые ограничивают использование преимуществ двигателя - одна из которых – радиопомехи работе приёмопередающим устройствам аппарата из-за СВЧ излучения из плазмы ХД. Базой для соответствующей технической модернизации двигателя является понимание роли основных процессов (факторов) в плазме, которые определяют выходящее электромагнитное излучение (ЭМИ). Это исследование проведено для выявления наиболее значимых процессов движения зарядов, в результате которых непосредственно происходит генерирование выходящего из плазмы ЭМИ в СВЧ диапазоне.

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

Известно, что частотный диапазон электромагнитных (ЭМ) волн, генерируемых в плазме ХД, пересекается с диапазоном радиосигнала, который используется для связи через ионосферу Земли [1 – 4]  $\approx 2...10$  ГГц. При этом мощность ЭМИ плазмы

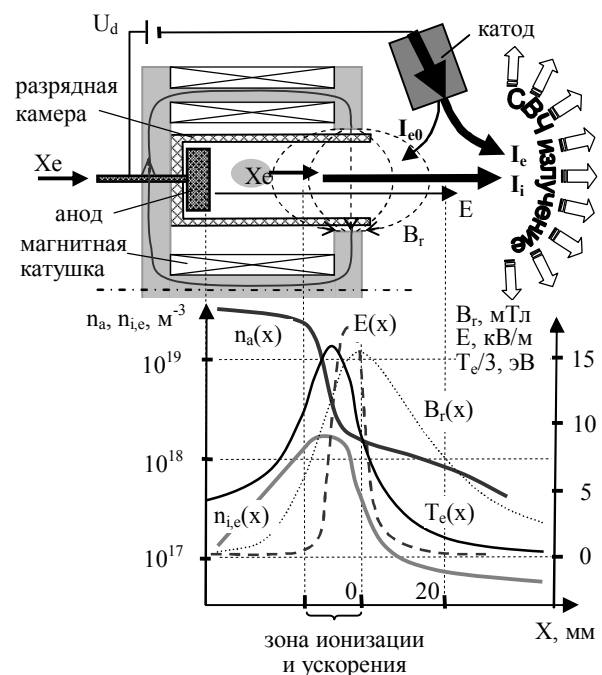


Рис. 1. Распределение параметров потока плазмы, полей в разрядном интервале ХД.  $n_{i,e}(x)$ ,  $T_e(x)$  взяты вблизи поверхности потока

ХД во много раз превосходит мощность радиосигнала связи, что делает невозможным бесперебойную передачу информации. Общая мощность ЭМИ  $W_{\text{экс}}$ , рассчитанная на основе известных экспериментальных данных о плотности мощности излучения в диапазоне частот  $f=1,5...10$  ГГц, составляет  $W_{\text{экс}} \sim$

$10^{-3}$  Вт (данные о плотности мощности из США [1]), а также  $W_{\text{экс}} \sim 10^{-7}$  Вт (по данным из России [2 – 4]) на близких режимах работы двигателя типа СПД М-100.

К настоящему времени известны несколько публикаций результатов работ (например [2 – 4]), выполненных лишь в одной организации России, в которых проводится анализ двух механизмов генерирования такого ЭМИ – трансформация плазменных волн в ЭМ волны и генерирование ЭМИ шумовыми колебаниями в плазме, усиленными плазменными волнами. Этот анализ подтверждён расчётом лишь в ограниченном диапазоне мощности ЭМИ  $\approx 10^{-7} \dots 10^{-8}$  Вт и частоты  $\omega_{\text{расч}} \approx 12$  ГГц, тогда как экспериментальные результаты показывают мощность  $10^{-3}$  Вт и  $\omega_{\text{экс}} \approx 9 \dots 60$  ГГц и более.

На основе проведенного анализа сделано заключение о необходимости, в первую очередь, проанализировать возможные причины генерирования СВЧ излучения вблизи мощности  $10^{-3}$  и  $10^{-7}$  Вт и частот  $\omega_{\text{экс}} \approx 9 \dots 60$  ГГц непосредственно в результате движения зарядов в плазме, когда ожидается более высокая точность результатов, чем при расчёте трансформации волн.

Задачи выполнялись в следующей последовательности. С учётом характерных параметров плазмы в ХД (см. рис. 1) [5, 6] проведен расчёт мощности и частоты тормозного и циклотронного СВЧ излучения, затем - излучения электронов при их ускорении в пограничном слое потока плазмы и в локальных областях азимутальной неоднородности потенциала в потоке плазмы.

## 2. Тормозное излучение

Оценочный расчёт мощности тормозного излучения электронов проведен в дипольном приближении, следуя [7]. При этом предполагалось, как упрощение, что распределение электронов в пространстве скоростей является  $\delta$ -функцией и все электроны имеют скорость, соответствующую наиболее вероятной из распределения Максвелла  $V = V_{\text{вер}} = (T_e \cdot e \cdot 2/m)^{1/2}$  при температуре  $T_e$  (в эВ), массе  $m$  и величине единичного заряда  $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$ . Введя обозначения и характерные величины: диапазона частот излучения  $\Delta\omega \approx 2 \cdot 10^9$  ГГц; характерной концентрации плазмы  $n_e \approx 5 \cdot 10^{17}$  м<sup>-3</sup>; температуры электронов  $T_e \approx 30$  эВ; излучаемого объёма  $V_{\text{пл}}$  плазмы - область, в которой преимущественно генерируется излучение – участок потока плазмы в разрядном промежутке (где магнитная индукция и электрическое поле значительны) с площадью сечения  $S \approx 50 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> и протяжённостью  $L \approx 4 \cdot 10^{-2}$  м так, что величина  $V_{\text{пл}} \approx S \cdot L \approx 2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>, диэлектрической проницаемости плазмы  $\epsilon \approx 1 - \omega_L^2/\omega^2 \approx 0,5$ , скорости света

$c = 3 \cdot 10^8$  м/с, постоянной Эйлера  $\gamma = 1,78$ , мощность  $W_T$  тормозного излучения электронов рассчитывается, следуя [7], как

$$W_T = \sqrt{\epsilon} \cdot \frac{16 \cdot e^6 \cdot n_i}{3 \cdot V \cdot c^3 \cdot m^2} \cdot \ln \left( \frac{2 \cdot m \cdot V^3}{\gamma \cdot \omega \cdot 2 \cdot e^2} \right) \cdot \Delta\omega \cdot n_e \cdot V_{\text{пл}}$$

Используя определённые ранее величины, рассчитана величина  $W_T \approx 10^{-21}$  Вт.

При этом частота излучения

$$\omega \leq (m \cdot V^3 \cdot 4 \cdot \pi \cdot \epsilon_0) / e^2 \approx 7,5 \cdot 10^{16} \text{ (Гц)}$$

Для расчёта мощности излучения вблизи частоты  $\omega_{\text{экс}} \approx 15$  ГГц следует учитывать вклад электронов со скоростями  $V \leq 1,8 \cdot 10^4$  м/с. Доля таких электронов – в пределах процента и, следовательно,  $W_T \ll W_{\text{экс}}$ .

Т.о., тормозным излучением невозможно объяснить, наблюдаемое в эксперименте, ЭМИ из плазмы ХД мощностью  $10^{-3}$  Вт или  $10^{-7}$  Вт на круговых частотах  $\omega_{\text{экс}} \approx 9 \dots 60$  ГГц.

## 3. Циклотронное СВЧ излучение

Определены гармоники частоты циклотронного излучения, соответствующие известным экспериментальным результатам ( $\omega_{\text{экс}} \approx 9 \dots 60$  ГГц) и соответствующая этим гармоникам мощность ЭМИ из плазмы ХД, где характерные величины:  $T_e \approx 30$  эВ,  $n_e \approx 5 \cdot 10^{17}$  м<sup>-3</sup>, напряжённость электрического поля  $E \approx 10^4$  В/м, индукция магнитного поля  $B \approx 15$  мТл в области излучения – в объёме  $V_{\text{пл}} \approx 2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup> потока плазмы.

При том, что частота первой гармоники  $\omega_{\text{Ц1}} = e \cdot B/m \approx 2,7$  ГГц, лишь 5-я гармоника частоты циклотронного излучения электрона в магнитном поле соответствует экспериментальным результатам ( $\omega_{\text{экс}}/\omega_{\text{Ц1}} \geq 5$ ) т.е.  $5 \cdot \omega_{\text{Ц1}} \geq \omega_{\text{экс-мин}} = 12$  ГГц. Мощность ЭМИ на  $m$ -й гармонике из объёма плазмы  $V_{\text{пл}}$  с концентрацией  $n_e$  определена с использованием зависимостей [7, 8], как

$$W_{\text{Ц}m} = \frac{e^2 \cdot \omega_{\text{Ц1}}^2}{2 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot c} \cdot \frac{(m+1) \cdot m^{2m+1}}{(2 \cdot m+1)!} \cdot \beta_{\perp}^{2m} \cdot V_{\text{пл}} \cdot n_e,$$

а на 5-й гармонике ( $m=5$ ), при  $\beta_{\perp} = V_{\perp}/c \approx 6,3 \cdot 10^{-3}$ , когда составляющая скорости электрона перпендикулярная вектору магнитной индукции оценена как  $V_{\perp} \approx (T_e \cdot e \cdot 2/3 \cdot m)^{1/2}$ , расчетная величина мощности  $W_{\text{Ц}m=5} \approx 10^{-24}$  Вт  $\ll W_{\text{экс}}$  ( $10^{-3}$  Вт или  $10^{-7}$  Вт). На последующих гармониках величина мощности излучения снижается  $\sim \beta_{\perp}^{2m}$ , где  $\beta_{\perp} \ll 1$ .

#### 4. СВЧ излучение электронов при их ускорении в пограничном слое плазмы

Рассчитаны: частота, мощность в дипольном приближении, следуя [8], энергия ЭМ излучения электрона за время его периодического движения через пограничный слой плазма-диэлектрик, где сосредоточен запирающий электроны перепад потенциалов, а также - полная мощность ЭМ излучения из пограничного слоя плазмы, с учётом потока электронов на этот слой плазмы.

На основе анализа результатов экспериментальных исследований [5] для оценочного расчёта выбраны характерные параметры слоя на границе плазма - стенка диэлектрика в условиях характерных для плазмы разрядного промежутка ХД. Толщина слоя, запирающего электроны в плазме, составляет  $\delta \approx 4 \cdot 10^{-4}$  м (рис. 2), а запирающий перепад потенциалов  $\Delta\varphi_{nc} \approx 2,5 \cdot T_e$  (с учётом вторичной эмиссии электронов). Тогда период  $\tau_{nc}$  движения электронов через слой  $\delta$  со скоростью на границе  $V_{eT} \approx (T_e \cdot e \cdot 2/m)^{1/2} \approx 2 \cdot 10^6$  м/с (при температуре  $T_e \approx 30$  эВ) оценивается как  $\tau_{nc} \approx 2 \cdot \delta / V_{eT}$ . Круговая частота ЭМ излучения, соответствующая этому периодическому движению с ускорением составит  $\omega_{nc} \approx 2 \cdot \pi / \tau_{nc} = \pi \cdot V_{eT} / \delta \approx 15 \cdot 10^9$  Гц.

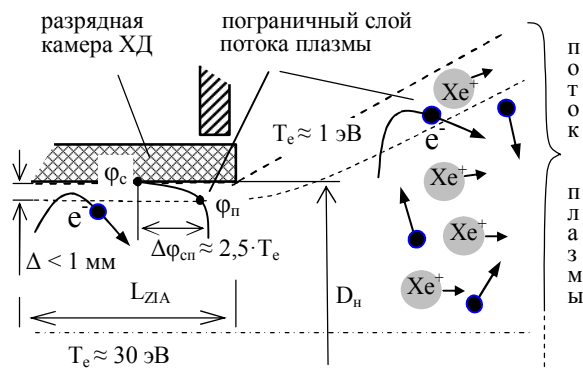


Рис. 2. Периодическое движение электронов через пограничный слой потока плазмы при обратном отражении

Следуя [8], в дипольном приближении мощность ЭМ излучения электрона, движущегося с ускорением  $a \approx \Delta\varphi_{nc} / \delta \cdot e/m$  через слой с перепадом потенциалов  $\Delta\varphi_{nc}$ , определена как  $w_e = (a \cdot e)^2 / (6 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^3)$ . Тогда энергия  $E_\tau$ , излучаемая за период  $\tau_{nc}$  движения электрона через слой  $\delta$ , составит  $E_\tau = w_e \cdot \tau_{nc}$ .

Полная мощность ЭМ излучения  $W_{nc}$  из пограничного слоя плазмы в разрядной камере, площадь которого  $S \approx \pi \cdot (D_n + D_{вн}) \cdot L_{ZIA}$  при диаметре наружной стенки  $D_n = 100$  мм внутренней -  $D_{вн} = 70$  мм и осевой протяжённости  $L_{ZIA} = 10$  мм, с учётом плотности потока электронов на поверхность слоя порядка

$n_e \cdot V_{eT} \approx 5 \cdot 10^{17} \cdot 2 \cdot 10^6 \approx 10^{24}$  1/(с·м<sup>2</sup>), определена как  $W_{nc} = E_\tau \cdot S \cdot n_e \cdot V_{eT} \approx 10^{-8}$  Вт.

На основе анализа распределения параметров плазмы, приведенных на рис. 1, 2 (размытая граница потока и малая температура электронов), сделан вывод о том, что толщина пограничного слоя плазма-вакуум превосходит толщину слоя плазма-диэлектрик (см. рис. 2), а перепад потенциалов в слое плазма-вакуум существенно ниже, что в результате обуславливает меньшую мощность ЭМИ из слоя плазма-вакуум, чем из слоя плазма-диэлектрик, конкретная величина которого не рассчитывалась.

Т.о., генерированное вследствие периодического ускорения электронов в пограничном слое плазмы ЭМИ мощностью  $W_{nc} \approx 10^{-8}$  Вт по мощности и частоте близко к экспериментально определённому нижнему порогу ( $10^{-7}$  Вт – данные из России) мощности ЭМИ. Излучение на частотах больших, чем  $\omega_{nc} \approx 5 \cdot 10^9$  Гц может генерироваться электронами, которые проникают на глубину меньше  $\delta$  в пристеночный слой.

#### 5. СВЧ излучение электронов при их ускорении на азимутальных неоднородностях потенциала

Вследствие азимутальной неоднородности плотности потока ионов и азимутального дрейфа электронов в скрещенных электрическом и магнитном полях в плазме возникают локальные области протяжённостью  $l_h \sim (0,1 \dots 1) \cdot R_{ic} \approx R_{ic}/2$  с перепадом потенциала  $\Delta\varphi_h \sim 1$  В в азимутальном направлении (рис. 3), благодаря которым происходит компенсация неоднородностей плотности потока ионов дрейфующими электронами. При этом электроны, дрейфующие с постоянной скоростью  $V_{edr} = E/B$  в азимутальном направлении, проходя через перепады потенциала  $\Delta\varphi_h$  ускоряются/замедляются и генерируют в результате электромагнитное излучение, выходящее из плазмы без существенного ослабления. Частота такого излучения определяется соотношением  $\omega_h \geq V_{edr} / l_h \approx 10^{10 \dots 11}$  Гц, при характерной для ХД скорости  $V_{edr} \approx 2 \cdot 10^6$  м/с.

Следуя [8], в дипольном приближении мощность ЭМИ электрона движущегося с ускорением  $a \approx \Delta\varphi_h / l_h \cdot e/m \approx 1,6 \cdot 10^{14}$  (м/с<sup>2</sup>) через перепад потенциалов  $\Delta\varphi_h$  в локальной области определена как  $w_h = (a \cdot e)^2 / (6 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^3) \approx 2 \cdot 10^{-25}$  Вт.

Область, в которой преимущественно генерируется излучение – участок потока плазмы в разрядном промежутке (где магнитная индукция и электрическое поле значительны) с площадью сечения  $S \approx b_k \cdot D_{cp} \cdot \pi \approx 50 \cdot 10^{-4}$  м<sup>2</sup> и протяжённостью  $L \approx 4 \cdot 10^{-2}$  м, с объёмом  $V_{пл} \approx S \cdot L \approx 2 \cdot 10^{-4}$  м<sup>3</sup>.

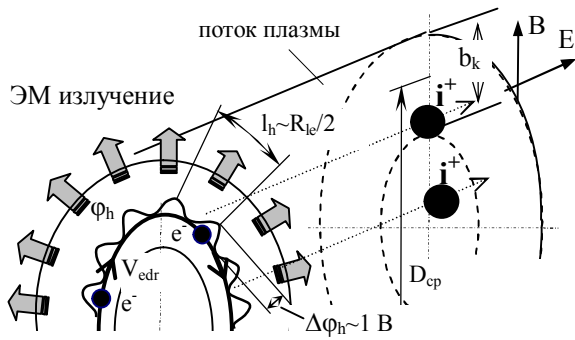


Рис. 3. ЭМ излучение, вызванное ускорением электронов в областях с локализованным перепадом потенциала  $\Delta\phi_h$  в азимутальном направлении потока плазмы

Полная мощность ЭМИ  $W_h$  из ХД, с учётом характерной величины концентрации электронов  $n_e \approx 5 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$ , определена как  $W_h = w_h \cdot V_{пл} \cdot n_e \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$ .

Т.о., электромагнитным излучением мощностью  $W_h \approx 2 \cdot 10^{-11} \text{ Вт}$  на частоте  $\omega_h \geq 10 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ , генерируемым отдельными электронами при их ускорении на перепадах потенциала в азимутальном направлении потока плазмы, невозможно объяснить наблюдаемое в эксперименте ЭМИ из плазмы ХД мощностью  $10^{-3} \text{ Вт}$  или  $10^{-7} \text{ Вт}$  на круговых частотах  $\omega_{\text{эксп}} \approx 9 \dots 60 \text{ ГГц}$ .

Однако следует учесть, что периодическое воздействие (со сменой знака) на поток дрейфующих в азимутальном направлении электронов со стороны локального слабого азимутального электрического поля (с малым перепадом потенциалов  $\sim 1 \text{ В}$ ) может играть роль предварительной фазировки электронов и, как следствие, привести к когерентному механизму излучения из каждой области протяжённостью порядка  $l_h \approx R_{le}/2 \approx 0,5 \text{ мм}$ . Тогда бы мощность  $w_{hc}$  когерентного ЭМИ электронов, движущихся как единый заряд  $q = l_h^3 \cdot n_e \cdot e \approx 10^{-10} \text{ (Кл)}$  с ускорением  $a \approx \Delta\phi_h/l_h \cdot e/m \approx 1,6 \cdot 10^{14} \text{ (м/с}^2\text{)}$  через область  $l_h$ , определённая в дипольном приближении, следуя [8], составила бы  $w_h = (a \cdot q)^2 / (6 \cdot \pi \cdot \epsilon_0 \cdot c^3) \approx 1,5 \cdot 10^{-7} \text{ Вт}$ . При этом полная мощность ЭМИ  $W_{hc}$  из ХД, с учётом мощности когерентного ЭМ излучения  $w_{hc}$  из единичной области размером  $l_h$  и количества таких излучающих областей

$$N_{\text{cell}} = b_k/l_h \cdot L/l_h \cdot \pi \cdot D_{cp}/l_h = V_{пл}/l_h^3 \approx 10^6,$$

условно выделенных в объёме  $V_{пл}$  потока плазмы, составила бы в пределе  $W_{hc} = w_{hc} \cdot N_{\text{cell}} \approx 10^{-1} \text{ Вт}$ . Необходимо заметить, что даже для оценочного расчёта  $W_{hc}$  требуется решать задачу о возможной авто-

фазировке электронов при их движении через области азимутальной неоднородности потенциала.

Предполагаемый «механизм» когерентного излучения на частоте  $\omega_h \geq 10 \cdot 10^9 \text{ Гц}$  и предельной мощности  $W_{hc} \approx 10^{-1} \text{ Вт}$  перекрывал бы диапазон мощности излучения, наблюдаемый в эксперименте –  $10^{-3} \text{ Вт}$  и  $10^{-7} \text{ Вт}$ . Необходимо заметить, что протяжённость  $l_h$  локальных областей, где сосредоточен перепад потенциалов  $\Delta\phi_h$ , варьируется в диапазоне  $(0,1 \dots 1) \cdot R_{le}$ . Это определяет возможные частоты  $\sim 1/R_{le} \cdot (1 \dots 10) \cdot \omega$  генерируемых ЭМ волн, что соответствует экспериментально определенному диапазону частот ЭМИ, распространяющемуся до  $\approx 120 \text{ ГГц}$ .

### Заключение

Наиболее вероятными причинами электромагнитного излучения из плазмы ХД (в диапазоне частот  $f \approx 1,5 \dots 10 \text{ ГГц}$  круговой  $\omega_{\text{эксп}} \approx 2 \cdot \pi \cdot f \approx 9 \dots 60 \text{ ГГц}$ , мощностью  $10^{-7}$  и  $10^{-3} \text{ Вт}$ ), непосредственно вследствие движения зарядов, являются:

1) ускоренное движение электронов в пограничном слое плазмы в разрядной камере ХД, что может привести к излучению мощностью  $W_{hc} \approx 10^{-8} \text{ Вт}$ ;

2) возможное квазисинфазное ускоренное движение электронов в азимутальном направлении через локальные области протяжённостью менее ларморовского радиуса электрона с перепадом потенциала в азимутальном направлении порядка  $1 \text{ В}$ , что может привести к когерентному излучению из такой области в пределе суммарной излучаемой мощности  $W_{hc} \leq 0,1 \text{ Вт}$  на частотах  $\omega \leq 120 \text{ ГГц}$ .

Дальнейший поиск возможных причин генерирования СВЧ излучения запланирован по пути изучения трансформации плазменных волн в СВЧ волны в ХД.

### Литература

1. Beiting, E.J. Spectral Characteristics of Radiated Emission from SPT-100 Hall Thrusters [Text] / E.J. Beiting // Proc. of the 29<sup>th</sup> In. Electric Propulsion Conf. - Princeton (USA). - 2005. - 9 p. (Paper № 2005-221).
2. Кирдяшев, К.П. Высокочастотные волновые процессы в плазодинамических системах [Текст] / К.П. Кирдяшев. - М.: Энергоатомиздат, 1982. - 142 с.
3. Кирдяшев, К.П. Спектры СВЧ-колебаний в стационарном плазменном двигателе СПД-АТОН [Текст] / К.П. Кирдяшев, А.И. Бугрова, А.И. Морозов // Письма в ЖТФ. - 2008. - Т. 34, № 7. - С. 24-31.

4. Брухтий, В.И. Нестационарность электронных волновых процессов в плазменном ускорителе [Текст] / В.И. Брухтий, К.П. Курдяшев, В.Л. Зарембо // ЖТФ. – 1996. – Т. 66, № 2. – С. 68-73.

5. Bugrova, A.I. Investigation of plasma local parameters in near wall field of channel of stationary plasma thruster of ATON type (SPT-ATON) [Text] / A.I. Bugrova, A.V. Desyatskov, V.K. Kharchevnikov // Proc. of the 3<sup>rd</sup> Intern. Conf. on Spacecraft Propulsion. - Cannes (France). – 2000. – P. 881-884.

6. Sommerville, J.D. Hall-Effect Thruster – Cathode Coupling Part II: Ion Beam and Near-Field Plume [Text] / J.D. Sommerville, L.B. King // Proc. of the 44<sup>th</sup> Joint Propulsion Conf. - Cincinnati (USA). – 2008. – 16 p. (Paper № 2008-4996).

7. Железняков, В.В. Электромагнитные волны в космической плазме (генерация и распространение) [Текст] / В.В. Железняков. – М.: Наука, 1977. – 432 с.

8. Бекефи, Дж. Радиационные процессы в плазме [Текст]: пер. с англ. / Дж. Бекефи. – М.: Мир, 1971. – 430 с.

Поступила в редакцию 23.11.2012, рассмотрена на редколлегии 12.12.2012

**Рецензент:** д-р техн. наук, ст. науч. сотр. отдела “Вакуумная электроника” Б.П. Ефимов, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков.

### ГЕНЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМАГНІТНОГО ВИПРОМІЮВАННЯ СВЧ ДІАПАЗОНА У ПЛАЗМІ ДВИГУНА ХОЛЛА

*С.А. Огієнко*

Вивчаються механізми безпосереднього генерування електромагнітного випромінювання СВЧ діапазону у плазмі двигуна Холла, яке є перешкодою радіосигналу зв'язку космічного апарата скрізь іоносферу Землі. Для аналізу використано результати експериментів з визначення спектральної щільності потужності СВЧ випромінювання дослідниками з США ( $10^{-6}$  Вт/МГц) та Росії ( $10^{-10}$  Вт/МГц). У дипольному наближенні виконано розрахунок потужності електромагнітного випромінювання у характерному діапазоні  $f=1,5...10$  ГГц. На основі цього розрахунку проаналізовано можливі механізми генерування СВЧ випромінювання – тормозний та циклотронний, а також випромінювання електронів при прискореному русі скрізь локальні області плазми з перепадом потенціалу – у радіальному напрямку на границі та в азимутальному напрямку в об'ємі осісиметричного потоку плазми – найбільш ймовірні причини генерування електромагнітного СВЧ випромінювання безпосередньо внаслідок руху зарядів у плазмі двигуна.

**Ключові слова:** плазма, двигун Холла, розрахунок потужності електромагнітного випромінювання, СВЧ діапазон.

### MICROWAVE RANGE ELECTROMAGNETIC EMISSION GENERATION IN THE HALL THRUSTER PLASMA

*S.A. Oghienko*

A ways of direct generation of microwave range electromagnetic radiation in Hall thruster plasma, which is a handicap to a communication radio signal of a space vehicle through an Earth ionosphere are investigated. Results of experiments on determining of power spectral density of the microwave range radiation of researchers from the USA ( $10^{-6}$  W/MHz) and Russia ( $10^{-10}$  W/MHz) are used for the analyzing. Electromagnetic radiation power in a characteristic range  $f=1,5...10$  GHz is calculated in dipole approximation. Basing on this calculation it was analyzed probable ways of microwave range radiation generation - braking and cyclotron, and also electron radiation by the accelerated motion through local areas with potential drop – in radial direction on border and in an azimuthal direction in volume of an axisymmetrical plasma stream - the most probable reasons of a microwave range electromagnetic radiation generation directly as result of movement of charges in plasma of the thruster.

**Key words:** plasma, Hall thruster, calculation of electromagnetic emission power, microwave range.

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