

УДК 533.9.07, 533.9.082.74, 621.3.095.21

С.А. ОГИЕНКО

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

## СВЧ ИЗЛУЧЕНИЕ СТАЦИОНАРНОГО ПЛАЗМЕННОГО ДВИГАТЕЛЯ КАК РЕЗУЛЬТАТ ТРАНСФОРМАЦИИ ВОЛН В ПЛАЗМЕ РАЗРЯДНОГО ПРОМЕЖУТКА

Причины генерирования СВЧ излучения в плазме стационарного плазменного двигателя (СПД), которое подавляет радиосигнал связи космического аппарата, изучаются с использованием результатов экспериментов исследователей США и России. Выполнен оценочный расчёт мощности продольных волн, генерированных вследствие эффекта Вавилова-Черенкова электронами, испускаемыми катодом в ускоренный поток плазмы при характерных для СПД параметрах. Рассчитан коэффициент трансформации продольных волн в СВЧ волны в слое плавно-неоднородной магнитоактивной плазмы и мощность СВЧ излучения  $W_{\text{СВЧ}} \leq 10^{-3}$  Вт на частотах  $\omega \leq 30$  ГГц, что соответствует известному экспериментальному диапазону.

**Ключевые слова:** плазма, стационарный плазменный двигатель, расчёт мощности СВЧ излучения, трансформация продольных волн в плазме в электромагнитные волны.

### Введение

Стационарный плазменный двигатель (СПД) зарекомендовал себя на протяжении десятков лет эксплуатации в космосе как надёжное устройство с высоким КПД. Дальнейшее усовершенствование СПД предполагает решение проблем, которые ограничивают использование преимуществ двигателя в полной мере. Одна из таких проблем – СВЧ излучение из плазмы двигателя, создающее помехи для приёма и передачи сигнала бортовыми устройствами космического аппарата. Чтобы найти техническое решение этой проблемы, в первую очередь необходимо понять основные закономерности процессов в плазме, которые определяют мощность и частоту выходящего СВЧ излучения. В этом исследовании проанализирована возможность генерирования СВЧ излучения путём трансформации электромагнитных волн в потоке ускоренной плазмы, создаваемой двигателем.

### 1. Анализ проблем

Частотный диапазон СВЧ волн, генерируемых в плазме СПД, пересекается с диапазоном радиосигнала связи космического аппарата  $f_{\text{сигн}} > 2 \dots 10$  ГГц и более, а мощность СВЧ волн существенно превосходит мощность радиосигнала, что создаёт помехи для связи.

На основе экспериментальных результатов полученных в России [1, 2] в диапазоне частот  $f \approx 1,5 \dots 10$  ГГц при пиковой спектральной плотно-

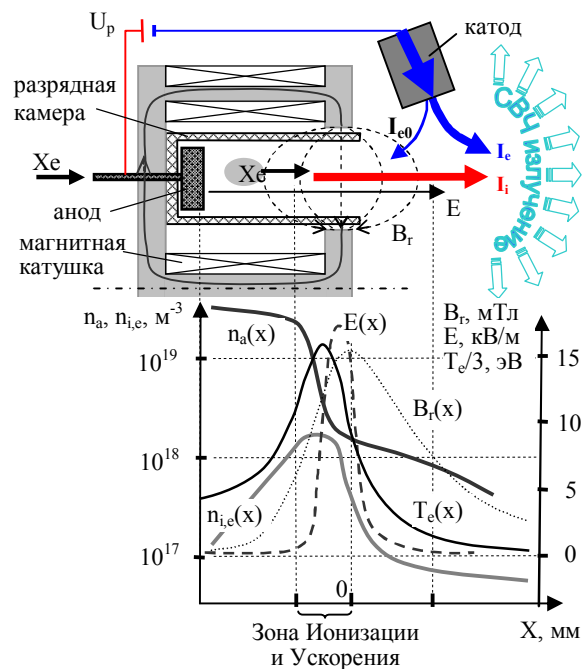


Рис. 1. Распределение параметров потока плазмы, полей в разрядном интервале СПД.  $n_{i,e}(x)$ ,  $T_e(x)$  взяты вблизи поверхности потока

сти потока энергии  $w_3 \approx 10^{-8 \dots -7}$  Вт/(м<sup>2</sup>·МГц) в полосе  $f \approx 1,5 \dots 2,5$  ГГц оценён возможный диапазон мощности СВЧ излучения при работе СПД типоразмера М-100 величиной  $W_{\text{ЭР}} \approx 10^{-8 \dots -3}$  Вт.

По результатам экспериментов в США, например [3], при пиковой спектральной плотности потока энергии  $w_3 \approx 2 \cdot 10^{-4 \dots -3}$  Вт/(м<sup>2</sup>·МГц) в полосе частот  $f \approx 3 \dots 5$  ГГц мощность СВЧ излучения в диапа-

зоне частот  $f \approx 1,5 \dots 10$  ГГц, оценивается величиной  $W_{ЭА} \approx 1 \dots 0,1$  Вт.

К настоящему времени известны результаты работ выполненных в России, например [1, 2], в которых проведен анализ механизма генерирования такого СВЧ излучения путём трансформации преимущественно продольных (плазменных) волн в СВЧ волны, подтвержденный расчётом лишь в диапазоне мощности СВЧ излучения  $\approx 10^{-7} \dots 10^{-8}$  Вт и частоты  $\omega_{расч} \approx 12$  ГГц, тогда как экспериментально определена мощность до  $10^{-3} \dots 10^{-0}$  Вт при  $\omega_{эксп} \approx 9 \dots 60$  ГГц и более.

На основе проведенного анализа сделано заключение о необходимости изучить возможность генерирования СВЧ излучения мощностью  $10^{-3} \dots 10^0$  Вт на частотах  $\omega_{эксп} \approx 9 \dots 60$  ГГц при различных процессах трансформации в плазме продольных волн, генерированных вследствие эффекта Вавилова-Черенкова (ЭВЧ) в СВЧ волны. В этом исследовании мощность и частота СВЧ волн генерированных в плазме СПД, оценены с учётом характерных параметров плазмы [4] (рис. 1) в следующей последовательности. Проведен расчёт мощности и частоты продольных волн, генерированных вследствие ЭВЧ, затем – расчёт мощности СВЧ излучения, генерированного в результате трансформации продольных волн в СВЧ волны, выходящего из плазмы двигателя.

## 2. Генерирование продольных волн вследствие эффекта Вавилова-Черенкова, а также их усиление в потоке плазмы

Определены условия излучения и мощность продольных волн, генерированных вследствие ЭВЧ в потоке плазмы вне разрядной камеры СПД (далее среда). Используются следующие характерные величины параметров среды, полей в расчётной области:  $T_e \approx 1$  эВ,  $E \approx 10^3$  В/м,  $B \approx 5 \dots 10$  мТл,  $n_e \approx (10 \dots 5) \cdot 10^{16}$  м<sup>-3</sup>. При расчёте полагалось, что поток электронов  $I_e \approx 2$  А эмитированных катодом (рис. 2) попадает в поток плазмы вне разрядной камеры СПД с ионным током  $I_i \approx 2$  А, набирая энергию при проходе через перепад потенциалов  $\Delta\phi_{кп}$  между катодом и потоком плазмы характерной величиной  $\Delta\phi_{кп} \approx 10$  В. При этом электроны с энергиями  $\approx \Delta\phi_{кп}$ , двигаясь в области плазмы где температура  $T_e \approx 1$  эВ, могут генерировать продольные волны вследствие эффекта Вавилова-Черенкова (скорость электронов превосходит фазовую скорость света в плазме) до тех пор, пока энергия электронов не снизится вследствие столкновений. Затем эти волны могут трансформироваться в СВЧ излучение, которое выходит из плазмы. Полагается, что внешнее магнитное поле является равномерным и

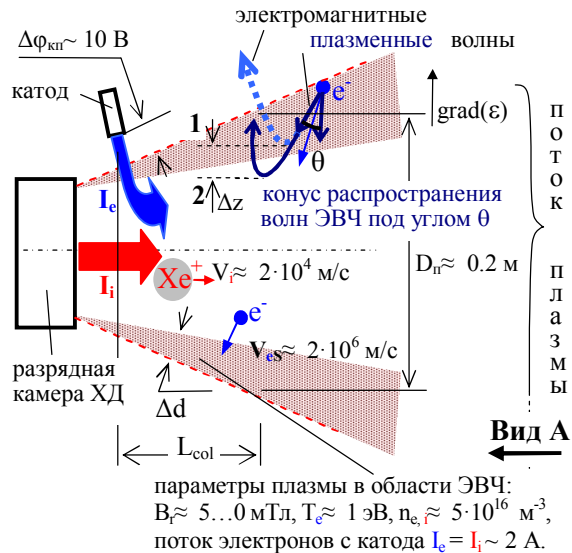


Рис. 2. Излучение волн, вызванное эффектом Вавилова-Черенкова

слабым  $\omega_B/\omega_{эксп} \ll 1$ , поэтому плазма считается изотропной, а движение электронов прямолинейным на протяжении длины излучаемой волны. Относительный перепад концентрации плазмы в радиальном направлении области генерирования волн оценен величиной  $\Delta n_e/n_e \approx 1$ . Условие испускания волн вследствие ЭВЧ (аномальный эффект) при условии, что показатель преломления испускаемых в плазме волн, рассчитанный по формуле

$n_{ср} = (\epsilon / (3 \cdot \beta_T^2))^{1/2} = ((1 - (\omega/\omega)^2)/3)^{1/2} / \beta_T \approx 157$ ,  
определён как для плазменных волн с фазовой скоростью

$$V_{\phi} = V_{\epsilon T} / (\epsilon)^{1/2} = c / n_{ср}$$

в среде где они генерируются (с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \approx 0,29$  и ленгмюровской частотой

$$\omega_L = (n_e \cdot e^2 / (\epsilon_0 \cdot m))^{1/2} \approx 12 \cdot 10^9 \text{ Гц};$$

коэффициент  $\beta_T = V_{\epsilon T} / c$ , в котором

$$V_{\epsilon T} \approx (T_e \cdot e \cdot 2/m)^{1/2} \approx 6 \cdot 10^5 \text{ м/с} -$$

тепловая (хаотическая) составляющая скорости электрона в среде; коэффициент

$$\beta = V_{eS} / c \approx 6,7 \cdot 10^{-3},$$

в котором  $V_{eS} \approx (\Delta\phi_{кп} \cdot e \cdot 2/m)^{1/2} \approx 2 \cdot 10^6$  м/с – характерная абсолютная скорость электрона в потоке с катода после прохождения перепада потенциалов  $\Delta\phi_{кп}$  между катодом и плазмой;  $\theta \approx 16^\circ$  – угол между направлением испускания волн и направлением движения электрона (вектора  $V_{eS}$ ), предельный для условия испускания волн со свойствами плазменных, определено следуя [5], соотношением

$$n_{ср} \cdot \beta \cdot \cos(\theta) \geq 1.$$

Частота  $\omega$ , на которой происходит испускание волн, определяется [5], как  $\omega \approx V_{eS} \cdot k_{ср} \approx 15$  ГГц, где волновое число  $k_{ср} = n_{ср} \cdot \omega / c = 7,5 \cdot 10^3$  м<sup>-1</sup> и  $k_{ср} = 2 \cdot \pi / \lambda_{ср}$ , а  $\lambda_{ср} = 8,3 \cdot 10^{-4}$  м – длина волны в среде.

Генерируемые продольные волны будут слабо-затухающими т.к. длина волны  $\lambda_{cp}$  значительно превосходит дебаевский радиус экранирования зарядов  $r_D \approx V_{eT}/\omega_L \approx 6 \cdot 10^{-5} \text{ м} < \lambda_{cp} = 8,3 \cdot 10^{-4} \text{ м}$ .

Частота  $\omega$  генерируемых продольных волн будет определяющей для частоты СВЧ волн, которые возникнут при трансформации продольных. Поскольку условия ЭВЧ – параметры ускоренного потока плазмы и потока электронов с катода – предполагают разброс, а также учитывая возможное возрастание частоты СВЧ волн (относительно  $\omega$ ) при трансформации продольных волн, допустимо ожидать двукратного увеличения частоты СВЧ волн. Т.о., частота СВЧ волн  $\approx 30 \text{ ГГц}$  близка к предельно возможной вследствие ЭВЧ, тогда как экспериментально определено излучение относительно низкой мощности и на частотах  $\geq 100 \text{ ГГц}$ .

При определении мощности  $W_{ЭВЧГ}$  продольных волн, генерируемых в плазме в полосе частот  $\Delta\omega \approx 3 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ , в котором сосредоточен максимум излучаемой мощности (по результатам эксперимента) вблизи  $\omega$ , учитывается, что эти волны генерируются вследствие ЭВЧ электронами, испускаемыми катодом – потоком  $I_e/e \approx 1,3 \cdot 10^{19} \text{ с}^{-1}$  со скоростью  $V_{eS}$ . Полагается, что ЭВЧ возможен лишь с участием электронов ещё не испытавших столкновений с частицами плазмы (в которых электрон передаёт часть своей энергии  $\Delta\phi_{кп}$  и теряет способность генерировать волну), а потери на излучение сравнительно малы. Т.о., среднее время излучения электронов учитывается временем  $\tau_{col}$  пробега электрона до столкновения в плазме  $\tau_{col} \approx 1/(n_e \cdot \sigma_{col} \cdot V_{eS}) \approx 2,5 \cdot 10^{-6}$ , где преимущественно  $n_e \approx 2 \cdot 10^{17} \text{ м}^{-3}$  и сечение столкновений  $\sigma_{col} \approx 10^{-18} \text{ м}^2$ .

Через  $V_{ЭВЧ}$  обозначим объём условно выделенной области вблизи поверхности потока плазмы (рис. 1, 2), в которой выполняется условие ЭВЧ и возможно генерирование плазменных волн эмитированными катодом электронами, в течение времени  $\tau_{col}$  с начала их движения. Упрощённо определим область излучения плазмы с температурой  $T_e \approx 1 \text{ эВ}$ , концентрацией  $n_e \approx 5 \cdot 10^{16} \text{ м}^{-3}$  и объёмом  $V_{ЭВЧ}$  как трубчатый поток диаметром  $D_n \approx 0,2 \text{ м}$  и толщиной  $\Delta d \approx 0,015 \text{ м}$ , на протяжении  $L_{col}$  которого дрейфующие в азимутальном направлении электроны сохраняют энергию ( $\sim \Delta\phi_{кп}$ ) необходимую для генерирования волн вследствие ЭВЧ, таким образом,  $V_{ЭВЧ} \approx \pi \cdot D_n \cdot \Delta d \cdot L_{col}$ .

Будем полагать, что  $V_{пл} \approx \pi \cdot D_n^2/4 \cdot L_{col}$  – объём области потока плазмы, содержащей полностью траектории движения электронов (эмитированных катодом и ускоренных до энергии  $\Delta\phi_{кп} \approx 10 \text{ эВ}$ ) до момента  $\tau_{col}$ , когда электрон перестаёт соответствовать условию ЭВЧ из-за потери существенной доли энергии  $\Delta\phi_{кп}$  в столкновениях. Полагая, что все эми-

тированные катодом электроны движутся с некоторой средней скоростью  $V_{eS}$ , определим долю времени  $d\tau_{col}$  их движения (когда они находятся в области плазмы, в которой возможен ЭВЧ) среди периода  $\tau_{col}$  (после которого ЭВЧ уже не возможен) как  $d\tau_{col}/\tau_{col}$ . Оценим эту долю как

$$d\tau_{col}/\tau_{col} \approx V_{ЭВЧ}/V_{пл} \approx 4 \cdot \Delta d/D_n \approx 0,33.$$

Тогда электроны способны к ЭВЧ лишь в течение времени  $d\tau_{col} = 4 \cdot \Delta d / D_n \cdot \tau_{col}$ . Следуя [5], мощность  $W_{ЭВЧГ}$  рассчитана по формуле

$$W_{ЭВЧГ} = \frac{e^6 \cdot \omega \cdot \Delta\omega}{V_{eS} \cdot \varepsilon \cdot 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0} \cdot d\tau_{col} \cdot I_e/e \approx 0,15 \text{ Вт},$$

что по порядку величины соответствует мощности  $W_{ЭВЧГР} = e^2 \cdot \omega_L^2 / (8 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot V_{eS}) \cdot \ln(2/3 \cdot V_{eS} / V_{eT})$ , излучаемой во всём разрешённом диапазоне частот  $\omega$ .

Оценим, следуя [5], эффект усиления (Ландау) мощности  $W_{ЭВЧГ}$  продольных волн (со свойствами плазменных волн) при их распространении в среде. Предполагается, что неустойчивость рассматриваемой системы „поток электронов с катода – поток ускоренной плазмы“, характеризуется небольшим возмущением вносимым потоком электронов. Коэффициент  $\mu_{пл}$  (размерность  $\text{м}^{-1}$ ) поглощения/усиления плазменных волн определяется процессами „истинного“, поглощения и индуцированного испускания, и при  $\mu_{пл} < 0$  инкремент  $\mu_{пл}$  отвечает усилению волн в системе. Коэффициент  $\gamma = \mu_{пл} \cdot 3 \cdot V_{eT}^2 / V_{\phi}$  (размерность  $\text{с}^{-1}$ ) характеризует затухание/нарастание волн во времени.

Следуя [5], коэффициент  $\mu_{пл} \approx -1,4$  при условии, что  $\theta \approx 16^\circ$  – угол при конусе черенковского испускания волн; индекс  $s$  относит величину к характеристикам потока электронов из катода так, что  $\omega_{Ls}^2 \approx \omega_L^2/5 = 12^2/5 \cdot 10^9 \text{ Гц}$ , учитывая, что концентрации зарядов в потоке электронов из катода (где  $n_e \approx n_i$  определяются скоростью ионов  $\approx 10^4 \text{ м/с}$  в этом потоке через сечение  $S \approx \pi \cdot D_n^2/4 \approx 3 \cdot 10^{-2} \text{ м}^2$ ) и в потоке плазмы из разрядной камеры соотносятся как  $\approx 1/(1 \dots 2)$ ; полагая соотношение тепловых скоростей  $V_{eT}^2 \approx V_{eTs}^2$ , рассчитан по формуле

$$\mu_{i\ddot{e}} = \sqrt{\frac{\pi}{18}} \cdot \frac{\omega_{Ls}^2 \cdot 4 \cdot \pi \cdot \varepsilon_0 \cdot V_{\phi}^3}{\omega \cdot V_{eT}^2 \cdot V_{eTs}^2} \cdot (V_{\phi} - V_{eS} \cdot \cos(\theta)) \times \\ \times \exp\left(-\left(V_{\phi} - V_{eS} \cdot \cos(\theta)\right)^2 / \left(2 \cdot V_{eTs}^2\right)\right).$$

Усиление мощности  $W_{ЭВЧГ}$  плазменных волн будет определяться фактором  $\exp(-\mu_{пл} \cdot \Delta d)$ , где  $\Delta d \approx 0,015$  – характерная толщина (в радиальном направлении) трубчатого потока плазмы – области, на протяжении которой, происходит генерирование и распространение волн. Тогда усиленная мощность плазменных волн определяется

$$W_{ЭВЧ} \approx W_{ЭВЧГ} \cdot \exp(-\mu_{пл} \cdot \Delta d) \approx 0,17 \text{ Вт},$$

что мало отличается от мощности первоначально генерированных волн.

### 3. СВЧ излучение как результат трансформации плазменных волн

Полагая что частоты генерируемой СВЧ волны и плазменной волны близки, эффективность  $Q_{\text{пн}}$  преобразования мощности  $W_{\text{ЭВЧ}}$  плазменных волн в СВЧ мощность  $W_{\text{СВЧпн}}$  в области потока ионов с плавным изменением свойств плазмы (радиальный градиент концентрации) определена при условии, что:  $V_{\text{ф}} = V_{\text{эф}}/(\epsilon)^{1/2} = c/n_{\text{ср}}$  – фазовая скорость плазменных волн,  $\omega$  – частота излучаемых СВЧ волн,  $\epsilon = 1 - (\omega_{\text{L}}/\omega)^2$ , градиент диэлектрической проницаемости между слоями плазмы 1 и 2 на протяжении  $\Delta d$  (рис. 2), где, предполагается, и происходит трансформация продольных волн в СВЧ волны

$$\text{grad}(\epsilon) = (\omega_{\text{L1}}^2 - \omega_{\text{L2}}^2) / (\omega \cdot \Delta d) = (n_{\text{e1}} - n_{\text{e2}}) \epsilon^2 / (\epsilon_0 \cdot m \cdot \omega \cdot \Delta d).$$

За период движения электрона  $\tau_{\text{col}} \approx 2,5 \cdot 10^{-6}$  с в потоке ионов (см. выше), когда он может инициировать ЭВЧ, электроны удаляются от катода со среднemasсовой скоростью  $V_i \approx 2 \cdot 10^4$  м/с на расстояние  $L_{\text{col}} \approx V_i \cdot \tau_{\text{col}} \approx 0,05$  м, на протяжении которого характерная величина  $(n_{\text{e1}} - n_{\text{e2}}) \approx (4 - 6) \cdot 10^{16}$ . Следуя [6],

$$Q_{\text{пн}} = \frac{1}{8} \cdot \left( \frac{V_{\text{ф}}}{c} \right)^2 \cdot \left( \frac{3 \cdot c \cdot \text{grad}(\epsilon)}{\omega} \right)^{2/3},$$

и при  $|\text{grad}(\epsilon)| \approx 20 \text{ м}^{-1}$ , эффективность преобразования мощности плазменных волн в СВЧ волны  $Q_{\text{пн}} \approx 7 \cdot 10^{-7}$ , а мощность СВЧ волн в плазме оценена как  $W_{\text{СВЧпн}} = W_{\text{ЭВЧ}} \cdot Q_{\text{пн}} \approx 10^{8 \dots 7}$  Вт. СВЧ волны практически не ослабляются проходя через слой плазмы  $D_{\text{п}}/2 \approx 0,1$  м, т.к. при частоте столкновений электронов  $\nu_{\text{m}} \approx V_{\text{эф}} \cdot \sigma_{\text{col}} \cdot n_{\text{e}} \approx 1,2 \cdot 10^5 \text{ с}^{-1}$  декремент затухания мощности из-за столкновений  $\mu_{\omega} \approx 10^{-3} \text{ м}^{-1}$ .

Следуя [5, 6], эффективность  $Q_{\text{р}}$  преобразования мощности  $W_{\text{ЭВЧ}}$  плазменных волн в СВЧ мощность вследствие рэлеевского рассеяния на флуктуациях концентрации ионов оценена как  $Q_{\text{р}} \approx 10^{-13}$ .

Эффективность  $Q_{\text{пн}}$  преобразования мощности  $W_{\text{ЭВЧ}}$  плазменных волн в СВЧ мощность  $W_{\text{СВЧпн}}$  оценена, следуя [5, 6], с учётом магнитоактивности плазмы с плавным изменением неоднородности концентрации (подобно сделанному выше) за пределами разрядной камеры СПД при том, что частоты генерируемой СВЧ волны и плазменной волны близки. Полагается, что магнитное поле с характерной индукцией  $B_x \approx 1,5$  мТл внешнего источника является равномерным и слабым (так как  $\omega_{\text{В}}/\omega \approx 0,015 \ll 1$  и длина плазменной волны  $\lambda_{\text{ср}} = 8,3 \cdot 10^{-4}$  м значительно меньше ларморовского радиуса  $R_{\text{Lе}} \approx 10^{-2}$  м), а распространение плазмен-

ных волн (вдоль магнитного поля) происходящим вдоль градиента концентрации. Параметр  $2 \cdot \delta_{01}$  взаимодействия падающей плазменной и рассеянной электромагнитной волнами определяется при: гиро-частоте  $\omega_{\text{В}} = e \cdot B_x / m \approx 0,25$  ГГц (когда характерная индукция  $B_x \approx 1,5$  мТл); градиенте диэлектрической проницаемости  $\text{grad}(\epsilon) \cdot \cos(\alpha \approx 45^\circ) \approx 14 \text{ м}^{-1}$  взятом в направлении распространения волн;  $\alpha$  – угле между направлением  $B_x$  и направлением распространения плазменной волны при малом  $\theta$ , полагая  $\text{tg}(\alpha) \approx \alpha$  (рис. 3), как

$$2 \cdot \delta_{01} \approx \frac{\pi}{2} \cdot \frac{\omega}{c \cdot \text{grad}(\epsilon)} \cdot \frac{\alpha^2}{(1 + \omega/\omega_{\text{В}})^{3/2}} \approx \alpha^2 \cdot 10^{-2}.$$

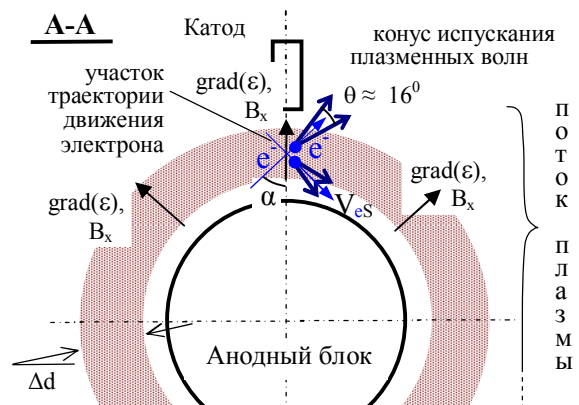


Рис. 3. Характерные направления испускания плазменных волн в области генерации (см. рис. 2)

Коэффициент  $Q_{\text{пн}}(\alpha)$  определяется как  $Q_{\text{пн}} = \exp(-2 \cdot \delta_{01}) \cdot (1 - \exp(-2 \cdot \delta_{01}))$ . Полагая  $2 \cdot \delta_{01}$  малым, средняя величина  $Q_{\text{пн}} \approx 7,5 \cdot 10^{-3}$  определена при  $\alpha = 0 \dots \pi/2$  (учитывая, что магнитное поле и плазменные волны имеют различную направленность) по формуле

$$Q_{\text{пн}} \approx \int_0^{\pi/2} Q_{\text{пн}}(\alpha) \cdot d\alpha / \int_0^{\pi/2} d\alpha \approx \int_0^{\pi/2} (1 - \alpha^2 \cdot 10^{-2}) \cdot \alpha^2 \cdot 10^{-2} \cdot d\alpha / (\pi/2) \approx 10^{-2} \cdot \pi^2 / 12.$$

Тогда мощность СВЧ излучения из плазмы  $W_{\text{СВЧ}} \approx W_{\text{ЭВЧ}} \cdot Q_{\text{пн}} \approx 10^{-3}$  Вт, что соответствует известному экспериментальному диапазону.

### Заключение

Трансформация преимущественно продольных электромагнитных волн в СВЧ волны (которые покидают плазму) в слое плавно-неоднородной магнитоактивной плазмы за пределами разрядной камеры СПД вблизи катода может быть причиной СВЧ излучения из плазмы СПД мощностью  $W_{\text{ЭМИ}} \leq 10^{-3}$  Вт на частотах  $\omega \leq 30$  ГГц, что соответствует диапазо-

ну экспериментальных результатов исследователей, например из России  $W_{эр} \approx 10^{8...3}$  Вт. Продольные волны могут генерироваться в этом же слое вследствие эффекта Вавилова-Черенкова электронами, которые испускаются катодом в ускоренный поток плазмы. Частота и мощность СВЧ излучения будут определяться особенностями взаимосвязанной работы катодного и анодного узлов СПД: перепадом потенциалов между катодом и потоком плазмы, концентрацией зарядов, температурой электронов и магнитной индукцией в области генерации волн.

### Литература

1. Кирдяшев, К.П. *Высокочастотные волновые процессы в плазодинамических системах* [Текст] / К.П. Кирдяшев. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 142 с.
2. 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.

3. 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).

4. 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.

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

6. Железняков, В.В. *Радиоизлучение солнца и планет* [Текст] / В.В. Железняков. – М.: Наука, 1964. – 560 с.

Поступила в редакцию 22.05.2013, рассмотрена на редколлегии 14.06.2013

**Рецензент:** д-р физ.-мат. наук, проф., начальник отдела распространения радиоволн в природной среде В.Ф. Кивва, Институт радиофизики и электроники им. А.Я. Усикова НАН Украины, Харьков.

## СВЧ ВИПРОМІНЮВАННЯ СТАЦІОНАРНОГО ПЛАЗМОВОГО ДВИГУНА ЯК НАСЛІДОК ТРАНСФОРМАЦІЇ ХВИЛЬ У ПЛАЗМІ РОЗРЯДНОГО ПРОМІЖКА

*С.А. Огієнко*

Причини генерування СВЧ випромінювання у плазмі стаціонарного плазмового двигуна (СПД), яке пригнічує радіосигнал зв'язку космічного апарата, вивчаються з використанням результатів експериментів дослідників США та Росії. Виконано оціночний розрахунок потужності подовжніх хвиль, генерованих внаслідок ефекту Вавилова-Черенкова електронами, що випускаються катодом у прискорений потік плазми при характерних для СПД параметрах. Розраховано коефіцієнт трансформації подовжніх хвиль у СВЧ хвилі у шарі плавно-неоднорідної магнітоактивної плазми та потужність СВЧ випромінювання  $W_{СВЧ} \leq 10^3$  Вт на частотах  $\omega \leq 30$  ГГц, що відповідає відомому експериментальному діапазону.

**Ключові слова:** плазма, стаціонарний плазмовий двигун, розрахунок потужності СВЧ випромінювання, трансформація подовжніх хвиль у плазмі в електромагнітні хвилі.

## MICROWAVE RANGE RADIATION OF STATIONARY PLASMA THRUSTER AS RESULT OF TRANSFORMATION OF WAVES IN DISCHARGE INTERVAL PLASMA

*S.A. Oghienko*

Reasons of generation of microwave range (MWR) radiation in the stationary plasma thruster (SPT) plasma, which suppresses a radio signal of space vehicle communication, are studied using results of experiments of researchers from the USA and Russia. It was estimated power of longitudinal waves, generated owing to Vavilov-Cherenkov effect by electrons, emitted by the cathode into accelerated plasma flow with SPT characteristic parameters. It was calculated the transformation efficiency of longitudinal waves into the microwave in a smoothly-non-uniform magneto-active plasma layer, and microwave radiation power  $W_{MWR} \leq 10^3$  W in frequencies  $\omega \leq 30$  GHz that meets to an experimental range.

**Key words:** plasma, stationary plasma thruster, calculation of microwave range radiation power, transformation of longitudinal waves in plasma into electromagnetic waves.

**Огиенко Сергей Анатольевич** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. кафедры “Ракетные двигатели и энергоустановки летательных аппаратов” Национального аэрокосмического университета им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков, Украина, e-mail: oghienko@yahoo.com.