

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ В ТЕРАГЕРЦОВОМ ЧЕРЕНКОВСКОМ  
ГЕНЕРАТОРЕ С ДИФРАКЦИОННЫМ ОТРАЖАТЕЛЕМ**© 2023 г. М. П. Дейчули<sup>а</sup>, В. И. Кошелев<sup>а</sup> \*, А. А. Петкун<sup>а</sup>, В. А. Чазов<sup>а</sup><sup>а</sup> Институт сильноточной электроники СО РАН,  
просп. Академический, 2/3, Томск, 634055 Российская Федерация

\*E-mail: koshelev@lhfe.hcei.tsc.ru

Поступила в редакцию 27.06.2023 г.

После доработки 27.06.2023 г.

Принята к публикации 04.07.2023 г.

С использованием 2.5D гибридной модели численно исследовано взаимодействие пучка с током 2.5...7.5 кА, энергией электронов 345...510 кэВ и электромагнитного поля в терагерцовом (364...368 ГГц) диапазоне частот. Показано, что применение дифракционных отражателей в электродинамической системе с параметром сверхразмерности 49 позволяет значительно подавить обратное излучение и многократно увеличить мощность излучения в направлении электронного пучка. В расчетах без учета тепловых потерь в ведущем магнитном поле 6 Тл получены импульсы излучения с мощностью до 330 МВт.

DOI: 10.31857/S0033849423120057, EDN: XQUAEA

**ВВЕДЕНИЕ**

Увеличение мощности излучения в вакуумных электронных устройствах с продольным взаимодействием пучка и поля приводит к необходимости увеличивать отношение диаметра замедляющей структуры (ЗС) к длине волны ( $D/\lambda$ ). Особенно это проявляется в терагерцовом диапазоне частот (0.3...3 ТГц) [1], где параметр сверхразмерности  $D/\lambda$  достигает 40 [2]. Важной задачей в устройствах с сверхразмерными ( $D/\lambda > 1$ ) ЗС является уменьшение мощности обратного излучения, направленного в сторону катода. Среди мощных источников излучения выделим релятивистские лампы обратной волны (РЛОВ), генераторы поверхностной волны (ГПВ) и многоволновые черенковские генераторы (МВЧГ). Ниже рассмотрим методы, которые используются для подавления обратного излучения.

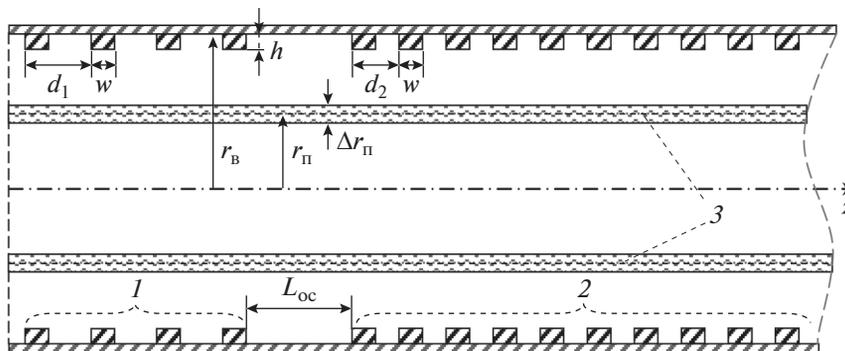
Наиболее подробно эта проблема изучена в РЛОВ. Здесь используют резонансные [3, 4], комбинированные (резонансные и плоские) [5, 6] и дифракционные (брэгговские) [7] отражатели. В комбинированных отражателях плоская пластина устанавливается, как правило, в катоде. Пространство между плоским и резонансным отражателем используется для модуляции пучка. В ГПВ для подавления мощности обратного излучения применяют плоские отражатели [8].

В первых исследованиях МВЧГ [9–11], обобщенных в монографии [12], использовали длин-

ные конические коллиматоры из графита, которые выполняли также роль поглотителя излучения. Графитовый коллиматор ограничивал внешний радиус микросекундных электронных пучков с энергией 30...60 кДж, формируемых на ускорителе ГАММА. В последующих исследованиях [13] на наносекундном ускорителе СИНУС-7М с меньшей на два порядка энергией пучка использовали металлические коллиматоры, а также дифракционные и комбинированные отражатели [14–16].

Экспериментально было показано, что использование дифракционного отражателя, установленного перед одной секцией периодического волновода и двухсекционной ЗС МВЧГ, приводит к увеличению мощности выходного излучения [14]. Сравнительный анализ полученных результатов показал, что при использовании дифракционного отражателя стабильность выходного излучения выше по сравнению с плоским [15]. Использование комбинированных отражателей приводило к изменению выходной мощности излучения в пределах  $\pm 15\%$ . В МВЧГ с линейной поляризацией выходного излучения [16] плоский отражатель устанавливался в цилиндрической трубе на некотором расстоянии от дифракционного, оптимальное положение которых определяли экспериментально.

С ростом частоты и увеличением параметра сверхразмерности  $D/\lambda$  трудности подавления обратного излучения возрастают. В субтерагерцовом (100...300 ГГц) диапазоне частот используются



**Рис. 1.** Геометрия расчетной области цилиндрической ЗС с прямоугольными в сечении  $r$ - $z$  диафрагмами: 1 – дифракционный (брэгговский) отражатель, 2 – периодическая замедляющая структура, 3 – тонкий трубчатый пучок;  $L_{ос}$  – расстояние между отражателем и структурой.

плоские [17] и дифракционные [18, 19] отражатели. Генерацию мощного терагерцового (>300 ГГц) излучения в сверхразмерных ЗС исследовали как при отсутствии отражателя [2, 20], так и при использовании двойного резонансного отражателя [21], установленного между катодом и ЗС с  $D/\lambda = 6.8$ .

Цель данной работы – исследовать влияние дифракционного отражателя на процессы взаимодействия трубчатого пучка и поля в терагерцовом черенковском генераторе. Ранее [22, 23] этот генератор был исследован на основе односекционной ЗС (40 прямоугольных диафрагм) с помощью разработанной 2.5D гибридной электромагнитной модели. В ЗС диаметром 40 мм ( $D/\lambda \approx 49$ ) инжектировали пучок с энергией электронов  $W_э = 350...515$  кэВ и током  $I_n = 2...10$  кА. В приближении идеальной проводимости поверхности ЗС были получены импульсы излучения мощностью до  $P = 250$  МВт на частоте  $f = 367$  ГГц. Основная часть мощности излучения была направлена назад. Мощность излучения в прямом направлении составляла 10...40% от полной мощности излучения. Это соответствует низкой энергетической эффективности источника излучения при выводе импульсов излучения вперед с помощью рупорной антенны. Для увеличения эффективности необходимо существенно увеличить долю мощности излучения в прямом направлении. Это и является предметом данного исследования наряду с изучением особенностей взаимодействия пучка и поля в электродинамической системе с дифракционным отражателем.

### 1. ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ

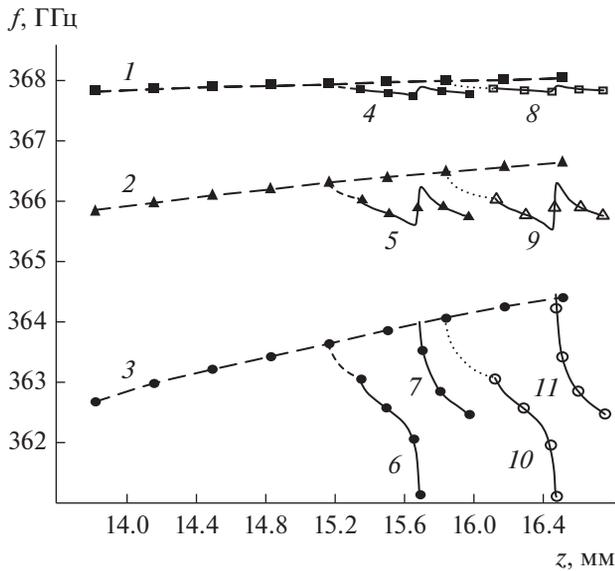
Разработанная 2.5D гибридная электромагнитная модель [22, 23] состоит из двух частей. Первая часть предназначена для расчета электродинамических характеристик [19] с помощью метода матриц рассеяния. Вторая часть разработана на основе метода крупных частиц и используется

для моделирования взаимодействия пучка и поля. Пучок с заданными параметрами инжектируется в электродинамическую систему с предварительно рассчитанными характеристиками.

Первоначально рассмотрим расчеты электродинамических характеристик исследуемой системы (рис. 1) без электронного пучка. Электродинамическая система представляет собой две короткие секции цилиндрических волноводов, радиусом  $r_в = 20$  мм, с периодически расположенными прямоугольными (в сечении  $r$ - $z$ ) диафрагмами. Секции разделены гладкой трубой, длина которой равна  $L_{ос}$ . Первая секция – дифракционный отражатель (ДО), содержащий от 4 до 8 диафрагм, имеет период  $d_1 = 0.4$  мм. Вторая секция – замедляющая структура (ЗС), состоящая из 40 диафрагм с периодом  $d_2 = 0.34$  мм, имеет те же высоты ( $h = 0.09$  мм) и длины ( $w = 0.17$  мм) диафрагм, что и в ДО. Период ДО был выбран на основе условия Вульфа–Брэгга в исследуемом диапазоне частот (360...370 ГГц), а длину ДО масштабировали в соответствии с ранее выполненными экспериментами [14–16]. При исследовании резонансных электромагнитных волн предполагается, что поверхность электродинамической структуры – идеальный проводник, а пространство внутри всей структуры – вакуумное.

Рассмотрим поверхностные волны мод  $TM_{01m}$ . Влияние несимметричных типов электромагнитных волн на электронный пучок, взаимодействующий с  $TM$ -модами, требует отдельных вычислительных экспериментов и здесь не рассматривается.

Установлено, что при генерации терагерцового (>300 ГГц) излучения из короткой периодической ЗС [23] основной вклад в мощность взаимодействия электромагнитного поля и пучка дают три продольных резонанса. Каждый из резонансов представляет собой сумму электромагнитных полей симметричных мод (например,  $R_1 = TM_{011} + TM_{02m} + TM_{03m} + \dots$ ) на частотах, близких к частоте



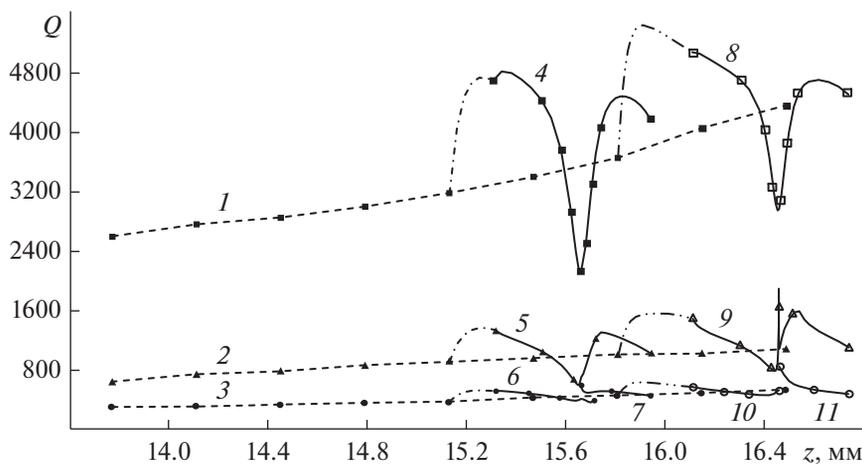
**Рис. 2.** Зависимость продольных резонансных частот симметричных  $TM$ -мод от длины электродинамической структуры. Для периодических ЗС без отражателя кривые 1, 2 и 3 соответствуют первым трем продольным резонансам  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ . Для периодической ЗС с ДО, содержащим четыре диафрагмы, кривые 4 и 5 соответствуют  $R_1$  и  $R_2$ , кривые 6 и 7 соответствуют  $R_3$ . Для периодической ЗС с ДО, содержащим шесть диафрагм, кривые 8 и 9 соответствуют  $R_1$  и  $R_2$ , кривые 10 и 11 соответствуют  $R_3$ .

там первых продольных резонансов мод  $TM_{01m}$ . Частоты этих продольных резонансов  $R_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) отсчитываются от  $\pi$ -вида колебаний моды  $TM_{01}$  ( $f_\pi = 368.473$  ГГц).

Значения частот  $F$  продольных резонансов  $R_i$  монотонно возрастают с увеличением длины пе-

риодических ЗС от 40 до 48 периодов с шагом в одну диафрагму (рис. 2, кривые 1–3). Частота продольных резонансов перестает быть монотонно возрастающей функцией длины  $z$  при введении ДО в конструкцию электродинамической структуры и изменении длины  $L_{oc}$  гладкой трубы. При этом для первых двух продольных резонансов частота как функция длины  $z$  является непрерывной квазипериодической функцией (кривые 4 и 5 для секции ДО, содержащей четыре диафрагмы; 8 и 9 – ДО с шестью диафрагмами). Для резонанса  $R_3$  частотная зависимость от  $z$  при увеличении длины  $L_{oc}$  разделяется на две монотонно убывающие кривые.

Численные эксперименты проводили в пределах до  $L_{oc} \approx \lambda_0$ , где  $\lambda_0$  – длина волны излучения из ЗС. В области возрастания резонансных частот ( $L_{oc} \approx 0.46...0.56$  мм для ДО с четырьмя диафрагмами и  $L_{oc} \approx 0.48...0.54$  мм – ДО с шестью диафрагмами) для  $R_1$  и  $R_2$  в структурах с ДО добротности колебаний (рис. 3, кривые 4, 5, 8, 9) становятся ниже, чем соответствующие добротности в периодических ЗС без ДО длиной от 45 до 48 периодов. В данной области длин  $L_{oc}$  происходит падение отношения  $P^+/P_\Sigma$ , где  $P^+$  – мощность, переносимая резонансной электромагнитной волной вперед в выходной секции,  $P_\Sigma$  – суммарная мощность, переносимая вперед в выходной секции и назад в секции ДО. При этом для ЗС с ДО, где четыре диафрагмы, отношение  $P^+/P_\Sigma$  для основного резонанса  $R_1$  уменьшается до 0.34 при  $L_{oc} = 0.52$  мм ( $z = 15.66$  мм, рис. 4а), а для ЗС с ДО, где шесть диафрагм, аналогичное значение выше –  $P^+/P_\Sigma \approx 0.44$  при  $L_{oc} = 0.51$  мм ( $z = 16.45$  мм, рис. 4б). Для исследования взаимодействия пучка с электромагнитными волнами в электродинамической



**Рис. 3.** Зависимость добротностей резонансов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  от длины электродинамической структуры. Для периодических ЗС без отражателя кривые 1, 2 и 3 соответствуют добротностям  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$ . Для периодической ЗС с ДО, содержащим четыре диафрагмы, кривые 4 и 5 соответствуют добротностям  $R_1$  и  $R_2$ , кривые 6 и 7 соответствуют добротности  $R_3$ . Для периодической ЗС с ДО, содержащим шесть диафрагм, кривые 8 и 9 соответствуют добротностям  $R_1$  и  $R_2$ , кривые 10 и 11 соответствуют добротности  $R_3$ .

системе были выбраны значения  $L_{oc} = 0.2...0.8$  мм с шагом 0.2 мм ( $\lambda_0/4$ ), которые не попадают в область превалирования отражения мощности назад к ДО (т.е. исследовали структуры с отношением  $P^+/P_{\Sigma} > 0.5$  без электронного пучка).

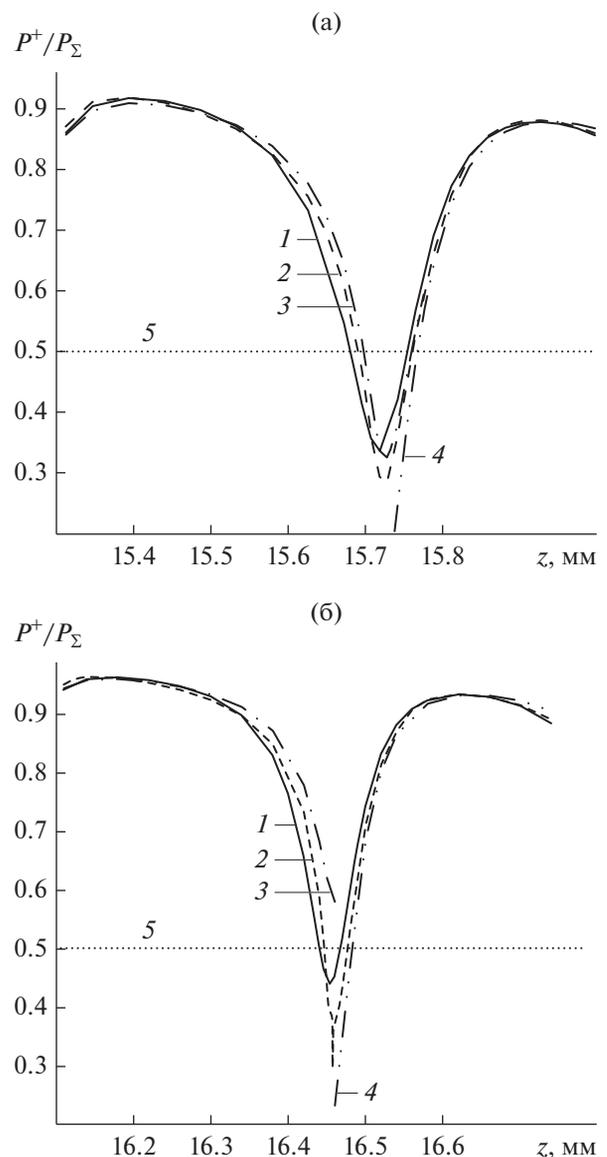
Основные значения характеристик, использованных при расчетах уравнений возбуждений [23], представлены в табл. 1 для четырех значений  $L_{oc}$  и ДО с числом диафрагм 4, 6.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПУЧКА И ПОЛЯ

Трубчатый электронный пучок с током  $I_n = 2.5...7.5$  кА и энергией электронов  $W_3 = 345...510$  кэВ инжектировался в электродинамическую структуру диаметром 40 мм с продольным магнитным полем  $B = 3...9$  Тл. Во всех расчетах толщина пучка с однородной плотностью тока и длительность переднего фронта импульса тока были постоянными и соответственно равными  $\Delta r_n = 0.3$  мм и  $T_{\Phi} = 0.5$  нс. Ток и энергия электронов пучка согласованно возрастали в течение фронта.

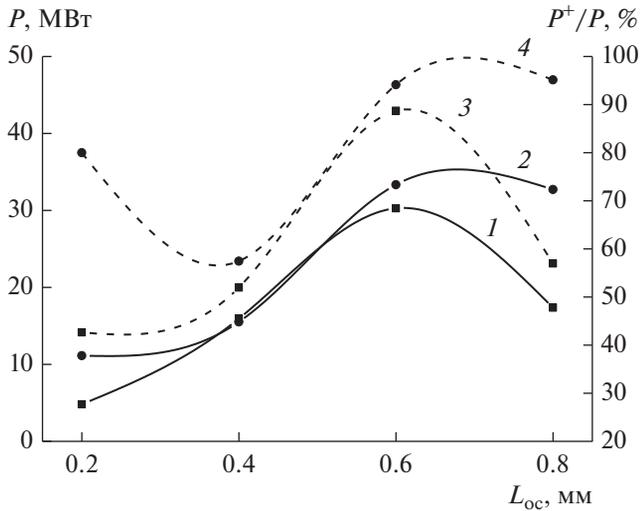
Уравнение возбуждения и методика численного моделирования подробно описаны в работе [23]. В расчетах учитывали первые три продольных резонанса  $R_1, R_2, R_3$ , для которых предварительно вычисляли частоты  $F$ , добротности  $Q$ , структура поля и нормы. Мы исследовали динамику мгновенных частот резонансов, оцениваемых с помощью преобразования Гильберта, до выхода на частоту синхронизации  $f_c$ . Дополнительно с помощью преобразования Фурье оценивали частоты максимума спектра импульса излучения  $f_0$ . По результатам численного моделирования рассчитывали мощность излучения вперед  $P^+$ , назад  $P^-$ , полная мощность ( $P = P^+ + P^-$ ), отношение мощности излучения вперед к полной мощности ( $P^+/P$ ), а также распределение выходной мощности по модам гладкого волновода  $TM_{0m}$  на частоте синхронизации продольных резонансов. Расчеты проводили при инжекции электронного пучка в электродинамическую систему в отличие от расчетов  $P^+/P_{\Sigma}$  без электронного пучка в предыдущем разделе. Численное моделирование взаимодействия электронного пучка и электромагнитного поля выполняли вдали от магнитного поля циклотронных резонансов [24].

Как отмечалось ранее, главной задачей является увеличение доли мощности излучения вперед ( $P^+/P$ ) при инжекции электронного пучка в электродинамическую систему с дифракционным отражателем. Первоначально был выбран набор параметров электронного пучка ( $I_n = 5$  кА,  $W_3 = 420$  кэВ,  $r_n = 19.6$  мм,  $B = 3$  Тл) для оценки влияния расстояния между отражателем и структурой  $L_{oc}$  и числа



**Рис. 4.** Отношение мощности  $P^+$  электромагнитной волны, распространяющейся вперед в выходной секции ЗС к сумме мощностей  $P_{\Sigma}$  вперед в выходной секции и назад в секции ДО с числом диафрагм 4 (а) и 6 (б), в зависимости от длины электродинамической структуры без электронного пучка. Кривые 1 и 2 соответствуют резонансам  $R_1$  и  $R_2$ , кривые 3 и 4 – резонансу  $R_3$ , кривая 5 – периодические ЗС без ДО.

диафрагм в отражателе на характеристики излучения. Энергия электронов  $W_3 = 420$  кэВ соответствует пересечению линии электронного пучка и дисперсионной характеристики моды  $TM_{01}$  бесконечного периодического волновода ( $d_2 = 0.34$  мм) вблизи высокочастотной границы полосы пропускания ( $\pi$ -вид колебаний). На рис. 5 показаны зависимости полной мощности излучения (кривые 1, 2) и отношения  $P^+/P$  (кривые 3, 4) от рас-



**Рис. 5.** Зависимости полной мощности излучения (кривые 1, 2) и отношения мощности излучаемой вперед к полной мощности излучения (кривые 3, 4) от расстояния между замедляющей структурой и дифракционным отражателем с числом диафрагм 4 (1, 3) и 6 (2, 4) при энергии пучка электронов 420 кэВ.

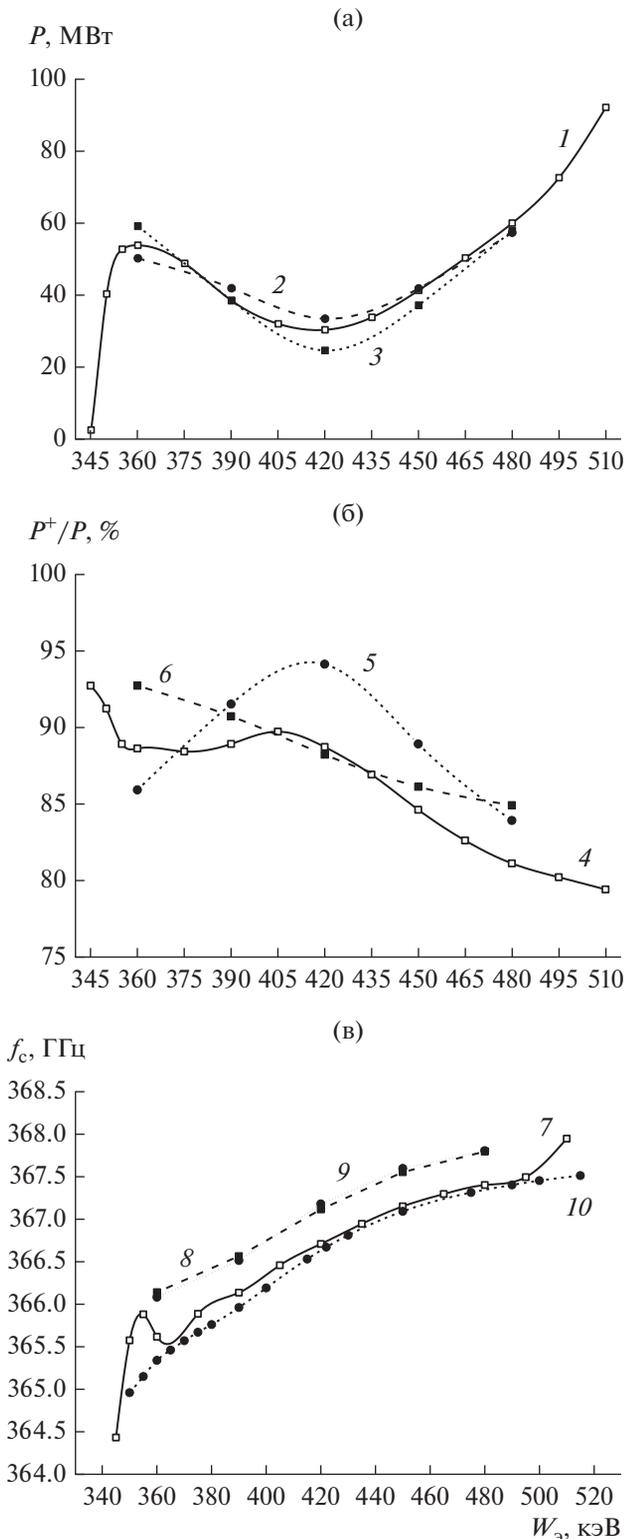
стояния между отражателем и структурой  $L_{oc}$  при числе диафрагм в отражателе 4 и 6. Видно, что отношение  $P^+/P$  существенно возрастает при  $L_{oc} = 0.6$  мм и выше для ДО с 6 диафрагмами. При расстоянии  $L_{oc} = 0.6$  мм были выполнены также расчеты  $P$  и  $P^+/P$  для ДО с 8 диафрагмами ( $P = 24.6$  МВт и  $P^+/P = 88.2\%$ ). Отметим, что здесь приведены значения мощности излучения после синхронизации резонансов и выхода на стационарный режим.

Для выбранного оптимального расстояния  $L_{oc} = 0.6$  мм были исследованы характеристики излучения в зависимости от энергии электронов при прочих одинаковых условиях. Результаты расчетов показаны на рис. 6а–6в. Показано (рис. 6а, кривые 1...3), что полная мощность излучения минимальна при  $W_0 = 420$  кэВ, слабо зависит от числа диафрагм ДО и уменьшается в 20 раз при изменении  $W_0$  от 350 до 345 кэВ. Отношение  $P^+/P$  слабо зависит от энергии электронов и находится в пределах 80...95% (рис. 6б, кривые 4...6). Частоты резонансов синхронизируются через 4...6 нс от

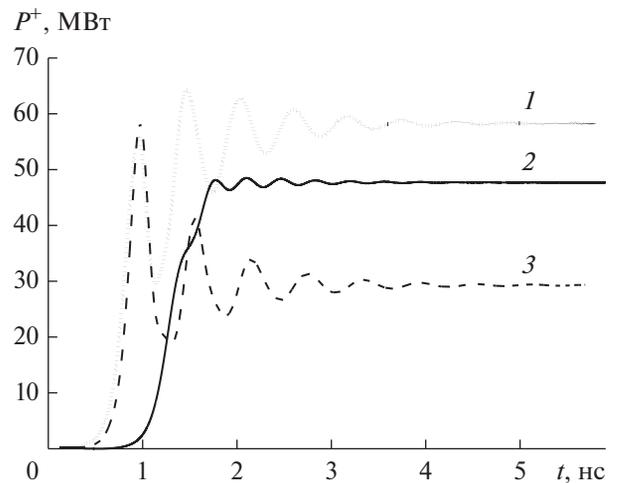
**Таблица 1.** Электродинамические характеристики систем с ДО, включающих четыре и шесть диафрагм и гладкую трубу длиной  $L_{oc} = 0.2, 0.4, 0.6$  и  $0.8$  мм для трех резонансов  $R_1, R_2, R_3$

Параметры	Четыре диафрагмы			Шесть диафрагм		
	$R_1$	$R_2$	$R_3$	$R_1$	$R_2$	$R_3$
$L_{oc} = 0.2$ мм						
$F$ , ГГц	367.827	365.939	362.878	367.826	365.937	362.874
$Q$	4819	1270	508	5057	1358	544
$N_e$ , Всм <sup>2</sup>	7.184	149.924	7.791	7.176	148.141	7.762
$P^+/P_{\Sigma}$	0.906	0.912	0.898	0.961	0.965	0.958
$L_{oc} = 0.4$ мм						
$F$ , ГГц	367.768	365.709	362.393	367.765	365.698	362.376
$Q$	4193	963	436	4576	1047	466
$N_e$ , Всм <sup>2</sup>	6.949	107.806	8.065	6.935	104.403	8.063
$P^+/P_{\Sigma}$	0.825	0.828	0.840	0.899	0.898	0.912
$L_{oc} = 0.6$ мм						
$F$ , ГГц	367.843	366.009	363.046	367.842	366.006	363.043
$Q$	4064	1299	503	4533	1582	573
$N_e$ , Всм <sup>2</sup>	7.351	154.94	8.539	7.338	158.769	8.450
$P^+/P_{\Sigma}$	0.774	0.758	0.744	0.883	0.872	0.866
$L_{oc} = 0.8$ мм						
$F$ , ГГц	367.775	365.733	362.461	367.773	365.725	362.446
$Q$	4181	1014	444	4505	1094	467
$N_e$ , Всм <sup>2</sup>	6.988	118.162	7.948	6.979	114.837	7.962
$P^+/P_{\Sigma}$	0.817	0.827	0.843	0.855	0.892	0.906

Примечание:  $N_e$  – норма поля, используемая в уравнении возбуждения.



**Рис. 6.** Зависимости полной мощности излучения (а); отношения мощности излучаемой вперед к полной мощности излучения (б); частоты синхронизации резонансов (в) от энергии пучка электронов при расстоянии 0.6 мм между замедляющей структурой и дифракционными отражателями с числом диафрагм 4 (кривые 1, 4, 7), 6 (кривые 2, 5, 8), 8 (кривые 3, 6, 9), а также частоты синхронизации без отражателя (кривая 10).

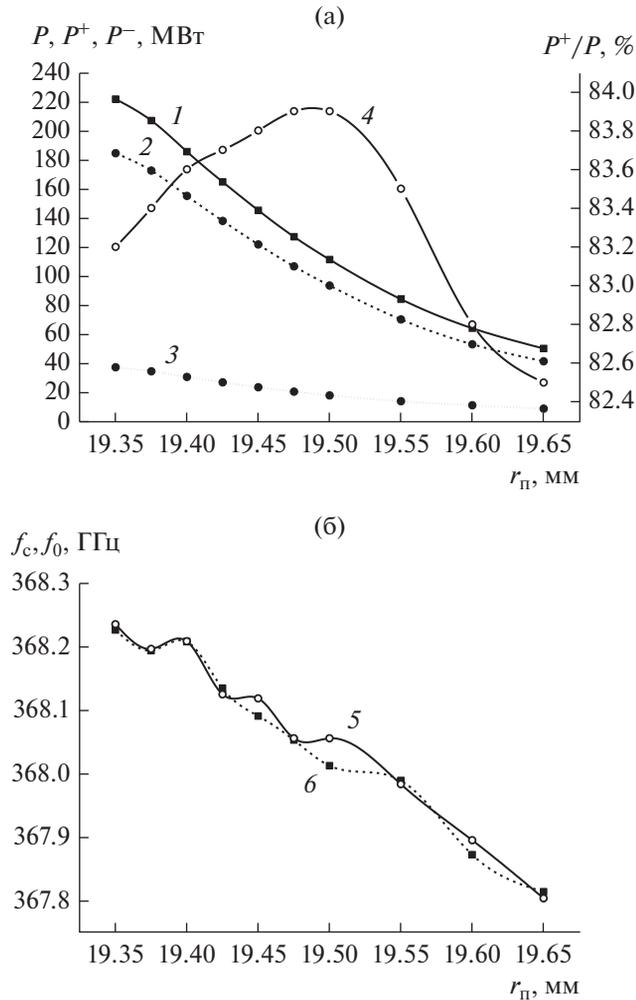


**Рис. 7.** Осциллограммы мощности излучения вперед для пучка с током 5 кА, энергией электронов: 495 (1), 360 (2) и 435 кэВ (3) в магнитном поле 3 Тл при расстоянии 0.6 мм между замедляющей структурой и дифракционным отражателем с 4 диафрагмами.

начала импульса тока. Частота синхронизации возрастает с ростом  $W_0$  и увеличением числа диафрагм ДО от 4 до 6 (рис. 6в, кривые 7, 8). Увеличение количества диафрагм до 8 не приводит к изменению  $f_c$  (кривая 9). Здесь же приведена зависимость  $f_c$  от энергии электронов при отсутствии ДО (кривая 10). Различие в зависимостях  $f_c$  от  $W_0$  при наличии ДО с 4 диафрагмами (кривая 7) и отсутствия ДО (кривая 10) наблюдается только в области низких и высоких энергий электронов.

На рис. 7 показаны осциллограммы мощности излучения вперед для некоторых энергий электронов и, соответственно, частот синхронизации (рис. 6в). При энергии  $W_0 = 495$  кэВ (кривая 1) частота синхронизации близка к частоте резонанса  $R_1$ , а при  $W_0 = 360$  кэВ (кривая 2) близка к частоте резонанса  $R_2$ . При частоте синхронизации между частотами резонансов  $R_1$  и  $R_2$  ( $W_0 = 435$  кэВ) наблюдаются максимальные колебания мощности перед выходом на стационарный режим излучения (кривая 3).

Для поиска режимов с большой мощностью были выполнены расчеты для пучка с энергией 490 кэВ и радиусом  $r_n = 19.35...19.65$  мм в магнитном поле 3 Тл при оптимальном  $L_{oc} = 0.6$  мм и ДО с 6 диафрагмами. Результаты показаны на рис. 8а, 8б. Видно, что с уменьшением радиуса пучка мощность излучения возрастает (рис. 8а, кривые 1–3), но при этом время синхронизации резонансов и, соответственно, выхода на стационарный режим излучения также возрастает от 4...6 до 20...25 нс. Максимальное отношение  $P^+/P = 83.9\%$  реализуется при  $r_n = 19.5$  мм (кривая 4) и приемлемом времени синхронизации резонансов 5...6 нс. Частоты син-

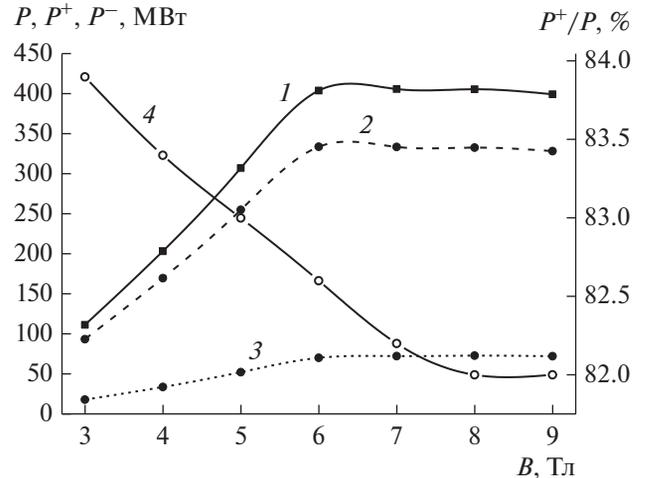


**Рис. 8.** Зависимости мощности излучения (а): полной (кривая 1), излучаемой вперед (кривая 2), излучаемой назад (кривая 3) и отношения мощности излучаемой вперед к полной мощности (кривая 4); и частот (б): синхронизации резонансов (кривая 5) и максимума спектра излучения (кривая 6) от радиуса пучка при энергии электронов пучка 490 кэВ, магнитном поле 3 Тл и расстоянии 0.6 мм между замедляющей структурой и дифракционным отражателем с шестью диафрагмами.

хронизации резонансов (рис. 8б, кривая 5) и максимума спектра излучения (кривая 6) согласуются между собой и возрастают с уменьшением  $r_{п}$ .

Представлялось интересным провести расчеты в широком диапазоне магнитного поля  $B = 3...9$  Тл для оптимального радиуса пучка  $r_{п} = 19.5$  мм.

Результаты моделирования показаны на рис. 9. Мощность излучения существенно возрастает в диапазоне  $B = 3...6$  Тл, а затем выходит на насыщение (кривые 1...3). Частота синхронизации растет в пределах 368...368.2 ГГц. Время синхронизации резонансов и, соответственно, выход на стационар также возрастает до 10 нс при  $B = 6...9$  Тл.



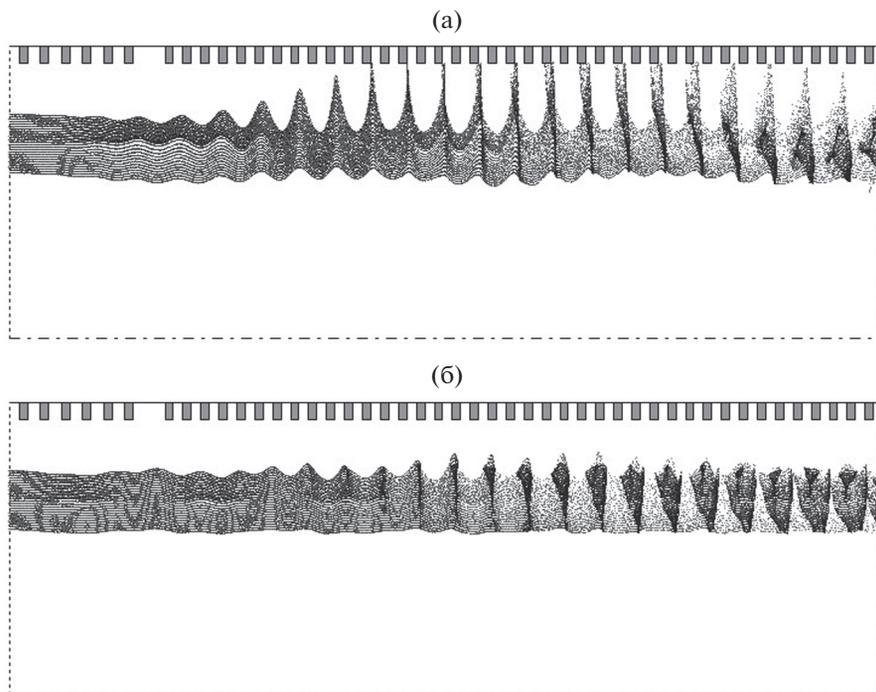
**Рис. 9.** Зависимости: полной мощности излучения (кривая 1), мощности излучаемой вперед (кривая 2), мощности излучаемой назад (кривая 3) и отношения мощности излучаемой вперед к полной мощности (кривая 4) от магнитного поля для пучка с током 5 кА, радиусом 19.5 мм и энергией электронов 490 кэВ при расстоянии 0.6 мм между замедляющей структурой и дифракционным отражателем с шестью диафрагмами.

При этом отношение  $P^+/P$  незначительно падает с 84 до 82% (кривая 4). Мощность излучения в направлении пучка достигает примерно 330 МВт при эффективности генерации 13%. Отметим, что в режиме больших мощностей ( $>100$  МВт) осциллограммы гладкие, нет колебаний на фронте импульса.

Была исследована структура электронного пучка в указанном диапазоне магнитного поля. При поле 3 Тл (рис. 10а) малая часть тока пучка (менее 0.1%) оседает на поверхности ЗС. С увеличением поля до 5 Тл электроны не касаются поверхности ЗС. При поле 7 Тл (рис. 10б) толщина электронного пучка сохраняется от входа к выходу ЗС.

Распределение выходной мощности по модам гладкого волновода  $TM_{0m}$  ( $m = 1...49$ ) слабо зависит от параметров численного эксперимента. Для излучения вперед 50% мощности выносятся модами ( $m = 1...9$ ), а 90% – модами ( $m = 1...33$ ). Для излучения назад 50% мощности выносятся модами ( $m = 1...25$ ), а 90% – модами ( $m = 1...43$ ).

Для общности исследований при выбранных первоначально параметрах пучка ( $W_0 = 420$  кэВ) и ДО с шестью диафрагмами были выполнены две серии численных экспериментов. В первой серии варьировали ток пучка  $I_{п} = 2.5, 5, 7.5$  кА. Показано, что с увеличением тока пучка частота синхронизации и отношение  $P^+/P$  уменьшаются соответственно от 367.44 до 366.87 ГГц и от 96.2 до 93%. Эффективность генерации при этом возрастает от 1 до 1.6%.



**Рис. 10.** Структура электронного пучка с током 5 кА, радиусом 19.5 мм и энергией электронов 490 кэВ в магнитном поле 3 (а) и 7 Тл (б) при расстоянии 0.6 мм между замедляющей структурой и дифракционным отражателем с шестью диафрагмами. Расстояние изменяется по радиусу в пределах 18.5...20 мм, а вдоль оси – 0...16.6 мм.

Во второй серии при токе пучка 5 кА и прочих одинаковых параметрах в численных экспериментах использовали 3 резонанса и первые 2 резонанса. Расчеты показали, что использование двух резонансов привело к изменению частоты синхронизации на 0.002%, а мощности на 1.4%. Из численных экспериментов следует, что практически во всем диапазоне параметров пучка использование первых двух продольных резонансов достаточно для адекватного описания процессов взаимодействия пучка и поля. Исключение составил численный эксперимент при энергии электронов 345 кэВ (рис. 6), в котором возросла амплитуда поля третьего резонанса, резко уменьшились частота синхронизации (кривая 7) и мощность излучения (кривая 1), а отношение  $P^+/P$  увеличилось (кривая 4).

### ВЫВОДЫ

Выполнено численное моделирование взаимодействия релятивистского трубчатого электронного пучка и электромагнитного поля в терагерцовом черенковском генераторе с сверхразмерной ( $D/\lambda = 49$ ) электродинамической системой. В расчетах использовалась 2.5D гибридная электромагнитная модель. Показано, что применение дифракционного отражателя позволяет существенно снизить обратное излучение и, соответственно, в несколько раз увеличить выходную мощность излучения. Найдено оптимальное чис-

ло диафрагм в отражателе и расстояние между ЗС и ДО. Увеличение магнитного поля до 5...6 Тл позволяет устранить оседание пучка на поверхность ЗС и получить мощность выходного излучения до 330 МВт без учета тепловых потерь. Исследована динамика синхронизации продольных резонансов, то есть переход от многомодового к многоволновому излучению. Время синхронизации и, соответственно, выхода на стационарный режим генерации зависит от параметров электронного пучка и изменялось в пределах 5...10 нс при длительности переднего фронта 0.5 нс. В будущем представляется интересным выполнить исследования с использованием секционированной ЗС, как в традиционном МВЧГ [12, 13]. Это может позволить повысить эффективность генерации и снизить требования к электронному пучку.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

### ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 22-29-00063.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Booske J.H., Dobbs R.J., Joye C.D. et al. // IEEE Trans. 2011. V. TST-1. № 1. P. 54. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2011.2151610>*

2. *San M.T., Ogura K., Kubota K. et al.* // IEEE Trans. P12018. V. PS-46. № 3. P. 530.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2796569>
3. *Куркан И.К., Ростов В.В., Тотменинов Е.М.* // Письма ЖТФ. 1998. Т. 24. № 10. С. 43.
4. *Ansari M.A., Thottappan M.* // IEEE Trans. 2019. V. PS-47. № 4. P. 1754.  
<https://doi.org/10.1109/TPS.2019.2904041>
5. *Wang H., Xiao R., Chen C. et al.* // IEEE Trans. 2021. V. ED-68. № 6. P. 3045.  
<https://doi.org/10.1109/TED.2021.3075419>
6. *Zhou N., Zhang X., Dang F. et al.* // Phys. Plasmas. 2023. V. 30. № 1. Article No. 013102.  
<https://doi.org/10.1063/S0124811>
7. *Ogura K., Miyazawa Y., Tanaka H. et al.* // Plasma and Fusion Research: Regular Articles. 2007. V. 2. P. S1041.  
<https://doi.org/10.1585/pfr.2.S1041>
8. *Vlasov A.N., Shkvarunets A.G., Rodgers A.S. et al.* // IEEE Trans. 2000. V. PS-28. № 3. P. 550.  
<https://doi.org/10.1109/27.887671>
9. *Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И. и др.* // Письма ЖТФ. 1983. Т. 9. № 22. С. 1385.
10. *Бугаев С.П., Канавец В.И., Климов А.И. и др.* // РЭ. 1987. Т. 32. № 7. С. 1488.
11. *Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В. И. и др.* // РЭ. 1989. Т. 34. № 2. С. 400.
12. *Бугаев С.П., Канавец В.И., Кошелев В.И., Черепенин В.А.* // Релятивистские многоволновые СВЧ-генераторы. Новосибирск: Наука, 1991.
13. *Koshelev V.I., Deichuly M.P.* // AIP Conf. Proc. 1999. V. 474. № 1. P. 347.
14. *Deichuly M.P., Koshelev V.I., Pikunov V.M. et al.* // AIP Conf. Proc. 2002. V. 65. № 1. № P. 287.
15. *Koshelev V.I., Deichuly M.P.* // Proc.13th Int. Symp. on High Current Electronics / Eds. by B. Kovalchuk, G. Remnev. Tomsk, 25–29 Jul. 2004, Tomsk: IHCE SB RAS, 2004. P. 296.
16. *Дейчули М.П., Кошелев В.И.* // РЭ. 2013. Т. 58. № 8. С. 829.  
<https://doi.org/10.7868/S0033849413080020>
17. *Ginzburg N.S., Malkin A.M., Sergeev A.S. et al.* // Phys. Rev. Lett. 2016. V. 117. № 20. P. 204801.  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.117.204801>
18. *Gardelle J., Modin P., Bluem H.P. et al.* // IEEE Trans. 2016. V. TST-6. № 3. P. 497.  
<https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2543603>
19. *Chazov V., Deichuly M., Koshelev V.* // Proc. 7th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE), Tomsk 14–26 Sept. 2020. Tomsk: Publishing House of IAO SB RAS, 2020. P. 23.  
<https://doi.org/10.1109/EFRE47760.2020.9242150>
20. *Wang J., Wang G., Wang D. et al.* // Scientific Reports. 2018. V. 8. № 6978.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-018-25466-w>
21. *Li S., Wang J., Wang D.* // Scientific Reports. 2020. V. 10. № 336.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-019-55525-9>
22. *Chazov V., Deichuly M., Koshelev V., Petkun A.* // Proc. 8th Int. Congress on Energy Fluxes and Radiation Effects (EFRE). Tomsk. 2–8 Oct. 2022 / Eds. by D. Sorokin, A. Grishkov. Tomsk: TPU Publishing House, 2022. P. 219.  
<https://doi.org/10.56761/EFRE2022.S3-O-020502>
23. *Дейчули М.П., Кошелев В.И., Петкун А.А., Чазов В.А.* // Изв. вузов. Физика. 2023. Т. 66. № 6. С. 92.  
<https://doi.org/10.17223/00213411/66/6/11>
24. *Vlasov A.N., Ilyin A.S., Carmel Y.* // IEEE Trans. 1998. V. PS-26. № 3. P. 605.