

УДК 621.385.6

ВЛИЯНИЕ ФАЗОВОГО СДВИГА СОПРОВОЖДАЮЩЕЙ ВОЛНЫ НА ДИНАМИКУ ЭЛЕКТРОНОВ В ДРАЙВЕРЕ ДВУХПУЧКОВОГО УСКОРИТЕЛЯ

А. В. Елзов, Э. А. Перельштейн

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Исследуется фазовая стабильность волны и устойчивость группировки электронов в драйвере с сопровождающей волной с учетом фазовых возмущений при выводе СВЧ-мощности. Специальное рассмотрение этого вопроса позволяет сформулировать дополнительные требования к устройствам вывода мощности. Представлены результаты моделирования динамики пучка в драйвере в зависимости от величины фазовых возмущений. Сформулировано условие, при котором сохраняется квазистационарное состояние пучка драйвера с высоким показателем группировки.

The phase stability of the wave and steady bunching of the electrons in the driver with accompanying wave taking into account phase perturbation at RF power extraction is investigated. A special consideration of this pattern allows one to state additional requirements for the systems of power extraction. Results of numerical simulations of beam dynamics in the driver subject to the amount of phase perturbations are presented. A criterium of preservation of quasi-stationary of the driver beam with high bunching factor is formulated.

ВВЕДЕНИЕ

Концепция двухпучкового ускорителя (ДПУ), как одна из возможных схем реализации электрон-позитронного коллайдера, была предложена Э. Сесслером [1]. Различные схемы драйвера двухпучкового ускорителя (ДПУ) на базе линейных индукционных ускорителей (ЛИУ) обсуждались в [2–4].

В работах [5, 6] была предложена новая схема драйвера ДПУ на основе ЛИУ. Ее отличительные черты:

а) группировка электронного пучка производится при достаточно низкой начальной энергии (~ 1 МэВ);

б) дальнейшее ускорение сгруппированного пучка происходит в сопровождающей усиленной волне, что обеспечивает устойчивую продольную группировку пучка на протяжении всего драйвера;

в) нигде в драйвере не осуществляется полный вывод СВЧ-мощности, и пучок распространяется синхронно с сопровождающей волной.

В качестве примера рассматривается драйвер (см. рис. 1), который состоит из инжектора, группирователя пучка и протяженной (возможно, несколько сотен метров) последовательности отдельных ускорительно-генераторных секций. В них потери пучка на излучение компенсируются внешней ускоряющей секцией ЛИУ. Секции перемежаются с переходными участками, в которых осуществляется частичный вывод СВЧ-мощности.

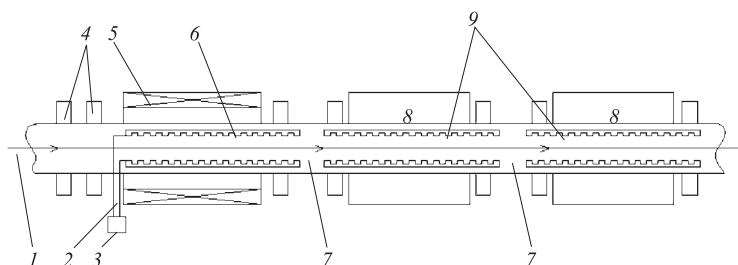


Рис. 1. Схема драйвера ДПУ: 1 — электронный пучок; 2 — волновод; 3 — магнетрон; 4 — фокусирующие магнитные линзы; 5 — соленоид; 6 — ЛБВ; 7 — участки вывода СВЧ-мощности; 8 — ускоряющие секции; 9 — гофрированный волновод — замедляющая электродинамическая структура

Электронный пучок с энергией 1–2 МэВ, создаваемый в инжекторе, вводится в группирователь. В качестве последнего может быть использована лампа бегущей волны (ЛБВ) в режиме усиления. В работах [7, 8] показано, что высокая степень группировки может быть достигнута на расстоянии ~ 1 м. Усиление СВЧ-волны и группировка пучка в ЛБВ были исследованы и зарегистрированы в экспериментах.

Далее по ходу драйвера электронные сгустки продолжают движение в ЛИУ в сопровождении СВЧ-волны, усиливаемой в электродинамических структурах. Ускоряющее электрическое поле может быть приложено непрерывно по всей длине драйвера либо на отдельных ускоряющих промежутках. Вывод СВЧ-мощности из драйвера производится только на переходных участках. Система достигает стационарного состояния на первых нескольких десятках метров, где энергия сгустков возрастает до уровня ~ 10 МэВ. Затем следует область квазистационарной генерации СВЧ-волны: вся мощность, передаваемая ускоряющим полем пучку, преобразуется в СВЧ-мощность.

Схема обладает следующими достоинствами:

1) есть возможность обеспечения фазовой и амплитудной стабильности СВЧ-волны. Фазовая стабильность может быть получена за счет квазинепрерывности системы. Это означает, что существенны лишь механические допуски;

2) так как ускоряется предварительно сгруппированный пучок, нет необходимости в группировке при энергиях ~ 10 МэВ.

Согласно результатам работы [5], при сопровождении пучка синхронной волной качество группировки сохраняется на протяжении сотен метров. Если электронные сгустки, сопровождаемые усиленной СВЧ-волной, одновременно ускоряются во внешнем электрическом поле, существует квазистационарное состояние пучка, в котором вся мощность, передаваемая пучку ускоряющим полем, преобразуется в СВЧ-мощность.

Здесь исследуются фазовая стабильность и устойчивость группировки электронов с учетом влияния фазовых возмущений при выводе СВЧ-мощности.

1. МОДЕЛЬ

Для моделирования динамики пучка с учетом фазового возмущения при выводе СВЧ-мощности использовалась модифицированная система уравнений [9]:

$$\frac{dW_j}{d\zeta} = -F \cos \psi_j + \epsilon_0, \quad (1)$$

$$\frac{d\theta_j}{d\zeta} = 2\gamma_0^2 \left(\Delta_0 + \frac{1}{\beta_{zj}} - \frac{1}{\beta_{z0}} \right), \quad (2)$$

$$\frac{dF}{d\zeta} = 2\pi J \langle \cos \psi_j \rangle - \Gamma F, \quad (3)$$

$$\frac{d\varphi}{d\zeta} = \frac{2\pi J}{F} \langle \sin \psi_j \rangle - \Phi. \quad (4)$$

Здесь $W_j = \gamma_j/\gamma_0$ — нормированная энергия j -й частицы; $\zeta = k_0 z / 2\gamma_0^2$ — безразмерная продольная координата; $k_0 = \omega_0/c$ — волновое число; $\omega_0 = 2\pi f_0$ — частота СВЧ-волны; θ_j — фаза j -го электрона относительно электромагнитного поля; φ — фаза волны, комплексная амплитуда волны $\hat{F} = F e^{i\varphi}$; $\psi_j = \varphi + \theta_j$ — полная пондеромоторная фаза. Величина $F = 2\gamma_0 e E_z / m c \omega_0$ есть безразмерная амплитуда продольного электрического поля волны. Параметр $\Delta_0 = 1/\beta_{z0} - 1/\beta_{ph}$ определяет начальную расстройку синхронизма волны с пучком; β_{zj} — продольная безразмерная скорость электронов; β_{ph} — фазовая скорость СВЧ-волны, на которую должен быть рассчитан волновод. Угловые скобки в уравнениях (3) и (4) означают усреднение по сгустку.

Параметр $\epsilon_0 = 2\gamma_0 e E_a / m c \omega_0$ — безразмерная величина внешнего электрического поля E_a ; параметр Γ — постоянная ослабления, характеризующая распределенные потери СВЧ-мощности вдоль драйвера. Фазовое возмущение моделируется мнимой добавкой к параметру Γ ; в данной записи этому соответствует появление второго слагаемого в правой части (4).

Параметр взаимодействия пучка с волной J пропорционален кубу параметра Пирса:

$$J = \frac{2\gamma_0^3}{\pi m c^2 / e} I Z, \quad (5)$$

где

$$Z = \frac{|E_z^2|}{2_0^2 N} \quad (6)$$

— импеданс связи пучка с волной (N — мощность волны в данной моде).

2. ОЦЕНОЧНЫЙ КРИТЕРИЙ

Параметры стационарного состояния без учета фазового возмущения оцениваются из соотношений [9]

$$\psi \simeq \pi/2 - \epsilon_0/F, \quad \Gamma \simeq 2\pi\epsilon_0 J/F^2, \quad 2\gamma_0^2 \left(\Delta_0 + \frac{1}{\beta_{zj}} - \frac{1}{\beta_{z0}} \right) - 2\pi J/F = 0. \quad (7)$$

Из (4) видно, что влияние фазового возмущения должно быть несущественным при условии

$$|\Phi| \ll 2\pi J/F. \quad (8)$$

Поскольку область устойчивых фаз находится в окрестности $\pi/2$, при оценке значения $\langle \sin \psi_j \rangle$ заменено на 1.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Цикл расчетов выполнен для последовательности ускоряющих секций протяженностью $l_s = 50$ см, чередующихся с переходными участками ($l_t = 25$ см) [5]. Вывод СВЧ-мощности был локализован только в переходных участках. Исходные характеристики электронного пучка, ускоряющих полей и вывода СВЧ-волны принимались близкими к условиям, исследовавшимся в [5] (см. таблицу). Постоянная ослабления составляла $\Gamma \simeq 0,112$.

Параметры пучка и волны

Энергия электронного пучка, МэВ	$\sim 2,2$ ($\gamma_0 \sim 5,31$)
Электронный ток I_b , А	~ 500
Радиус электронного пучка, см	$\sim 0,5$
Рабочая мода волновода	E_{01}
Частота волны f_0 , ГГц	17 ($\lambda \sim 1,76$ см)
Затравочная мощность в ЛБВ, МВт	10
Внешнее электрическое поле E_a , МВ/м	1,5

Мерой фазового возмущения служит дополнительный набег фазы волны $\Delta\varphi$ на переходном участке, связанный с безразмерной длиной переходного участка ζ_t соотношением $\Phi = \Delta\varphi/\zeta_t$. Оценка по критерию (8) для выбранных параметров моделирования дает $\Delta\varphi \ll 1,3$.

Моделирование проводилось по системе (1)–(4) методом крупных частиц (100–400 частиц на сгусток). Для контроля погрешности расчетов на каждом шаге вычислялось значение интеграла системы уравнений

$$\Xi = \langle W_j \rangle + \frac{F^2}{4\pi J} + \int \left(\frac{\Gamma F^2}{2\pi J} - \epsilon_0 \right) d\zeta. \quad (9)$$

Отклонения от постоянного значения находились на уровне 10^{-6} в относительном масштабе.

На рис. 2, 3 представлены расчетные зависимости мощности волны на двух участках драйвера ($z = 100-102$ м и $z = 175-177$ м).

Как видно из рис. 3, при умеренных отрицательных значениях $\Delta\varphi < 0$ наблюдается повышение темпа восстановления мощности в каждой ускорительно-генераторной секции. Это можно объяснить частичной компенсацией нагрузки волны пучком, что улучшает соотношение синхронизма.

На рис. 4 и 5 соответственно представлены расчетные зависимости показателя группировки $B = |\langle e^{i\psi} \rangle|$ и средней энергии пучка при разных значениях $\Delta\varphi$.

Исследование поведения сгустков в фазовом пространстве показывает, что, как и в [5], наблюдается перемешивание сгустков за счет «отстающих» частиц. С ростом величины $\Delta\varphi$ этот эффект усиливается. Возрастает энергетический разброс; при этом частицы, в основном, остаются квазизахваченными, находясь в области замедляющих фаз. На рис. 6 показаны фазовые портреты в области $z \approx 200$ м для случаев $\Delta\varphi = 0$ и $\Delta\varphi = 0,5\pi$.

Степень группировки пучка остается стабильно высокой, а частицы практически удерживаются в пределах сепаратрисы одного сгустка при $|\Delta\varphi| \leq 0,3$. Это соответствует

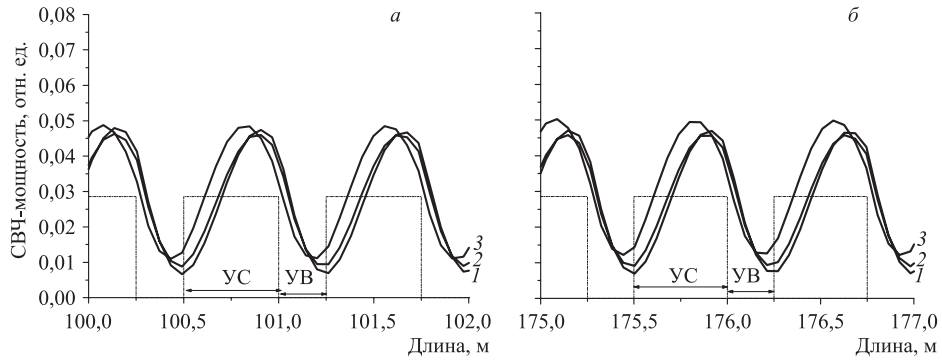


Рис. 2. Пространственные зависимости мощности СВЧ-волны на двух участках драйвера для положительных значений набега фазы на ячейку: 1 — $\Delta\varphi = 0$; 2 — $\Delta\varphi = 0,1\pi$; 3 — $\Delta\varphi = 0,5\pi$. Условно показано положение ускоряющих секций (УС) и участков вывода мощности (УВ)

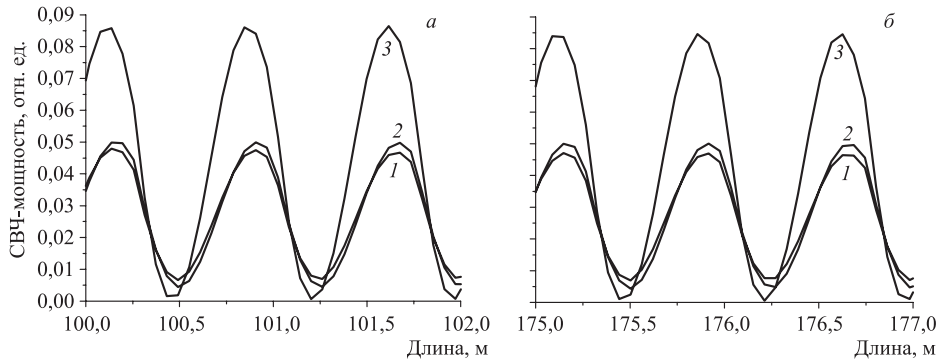


Рис. 3. Пространственные зависимости мощности СВЧ-волны на двух участках драйвера для отрицательных значений набега фазы на ячейку: 1 — $\Delta\varphi = 0$; 2 — $\Delta\varphi = -0,1\pi$; 3 — $\Delta\varphi = -0,5\pi$

оценке по критерию (8). С ростом величины набега фазы на ячейку в поведении параметра группировки проявляется спад. Его, по-видимому, следует связывать с переходом части сгустка в область ускоряющих фаз.

При положительных фазовых набегах на ячейку ($\Delta\varphi > 0$) для нарушения стационарного состояния оказывается достаточно значений, меньших по абсолютному значению. В этом случае частицы быстрее попадают в область ускоряющих фаз, что сказывается на качестве группировки пучка.

Исследование зависимости результатов моделирования от числа крупных частиц N_p показало, что при небольших значениях $\Delta\varphi \leq 0,1\pi$ результаты практически не меняются, оставаясь близкими к соответствующим исходному квазистационарному режиму. В качестве примера на рис. 7 приведены фазовые портреты в области $z \approx 200$ м при $\Delta\varphi = -0,1\pi$ для $N_p = 100$ (а) и $N_p = 200$ (б).

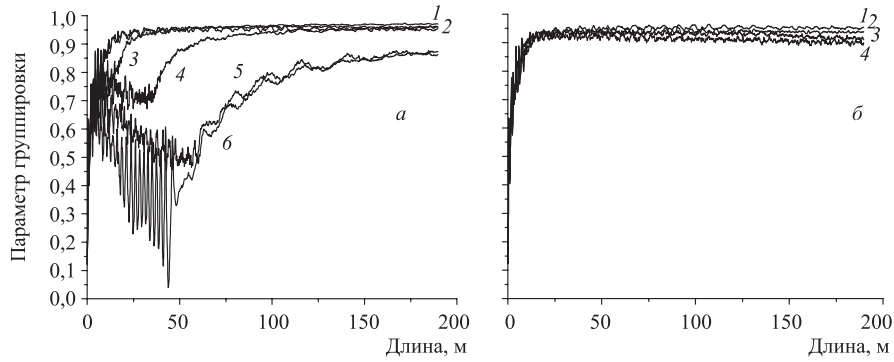


Рис. 4. Пространственные зависимости параметра группировки. а) 1 — $\Delta\varphi = 0$; 2 — $\Delta\varphi = 0,1\pi$; 3 — $\Delta\varphi = 0,4\pi$; 4 — $\Delta\varphi = 0,5\pi$; 5 — $\Delta\varphi = 0,7\pi$; 6 — $\Delta\varphi = \pi$. б) 1 — $\Delta\varphi = 0$; 2 — $\Delta\varphi = -0,1\pi$; 3 — $\Delta\varphi = -0,5\pi$; 4 — $\Delta\varphi = -\pi$

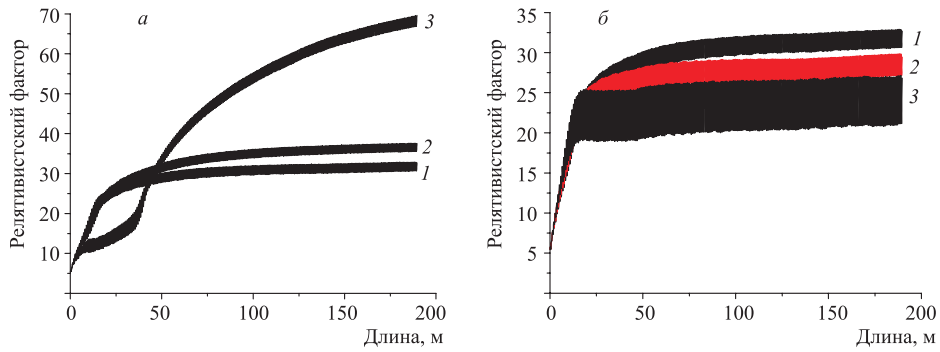


Рис. 5. Пространственные зависимости средней энергии пучка. а) 1 — $\Delta\varphi = 0$; 2 — $\Delta\varphi = 0,1\pi$; 3 — $\Delta\varphi = 0,5\pi$. б) 1 — $\Delta\varphi = 0$; 2 — $\Delta\varphi = -0,1\pi$; 3 — $\Delta\varphi = -0,5\pi$

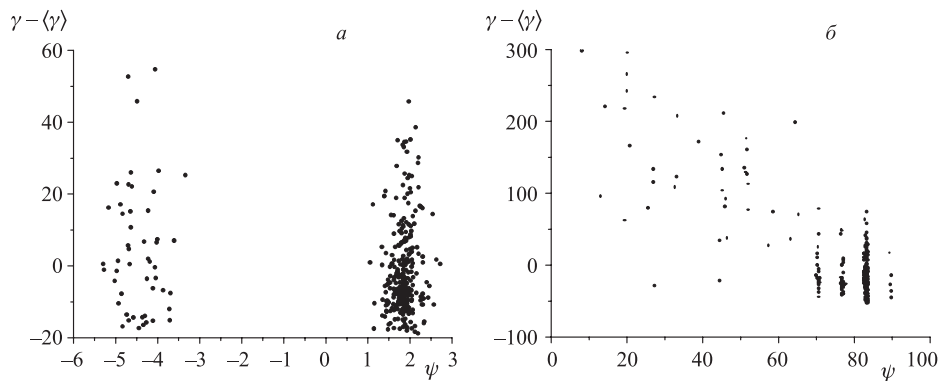


Рис. 6. Фазовые портреты сгустков в области $z \approx 200$ м при $\Delta\varphi = 0$ (а) и $\Delta\varphi = 0,5\pi$ (б)

Для больших значений $\Delta\varphi$ точность расчетов снижается, наблюдается более сильная зависимость от N_p . Но с увеличением N_p до 300–400 результаты становятся достаточно

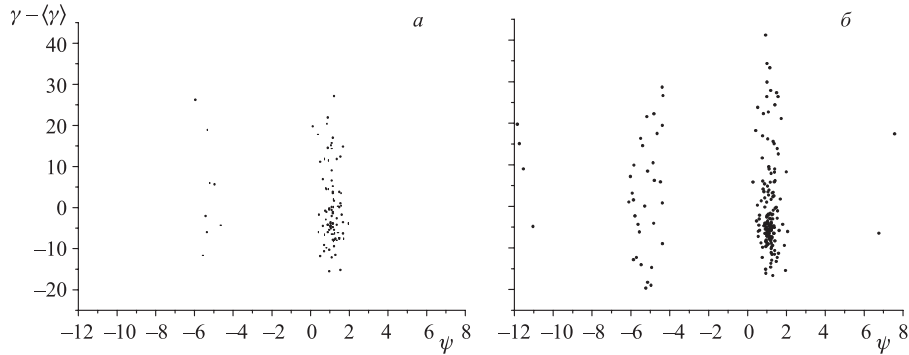


Рис. 7. Фазовые портреты сгустков в области $z \approx 200$ м при $\Delta\varphi = -0,1\pi$ в зависимости от числа крупных частиц в моделировании: $N_p = 100$ (а) и $N_p = 200$ (б)

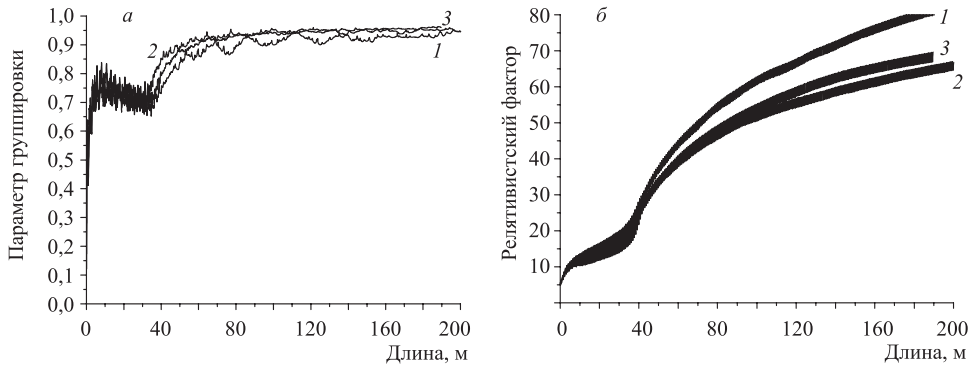


Рис. 8. Пространственные распределения параметра группировки (а) и средней энергии сгустков (б) при $\Delta\varphi = 0,5\pi$ в зависимости от числа крупных частиц в моделировании: 1 — $N_p = 100$; 2 — $N_p = 200$; 3 — $N_p = 400$

устойчивыми. На рис. 8 показаны распределения параметра группировки и средней энергии сгустков в зависимости от N_p для $\Delta\varphi = 0,5\pi$.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В численном моделировании исследовано влияние фазовых возмущений при выводе СВЧ-мощности на фазовую стабильность и устойчивость группировки в схеме драйвера двухпучкового ускорителя с сопровождающей волной. Показано, что при умеренном набеге фазы на ячейку вывода мощности — около $0,1\pi$ рад, — можно поддерживать квазистационарное состояние драйвера. Требование на величину набега фазы согласуется с оценкой по сформулированному численному критерию.

Благодарности. Авторы выражают благодарность А. Н. Лебедеву, обратившему внимание на проблему фазового сдвига при выводе мощности, а также А. К. Каминскому, С. Н. Седых, А. П. Сергееву и А. И. Сидорову за полезные обсуждения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Sessler A. M.* The free electron laser as a power source for a high-gradient accelerating structure // Proc. of Workshop on the Laser Acceleration of Particles. AIP Conf. Proc. 1982. V. 91. P. 154–159.
2. *Sessler A. M. et al.* Standing-wave free-electron laser two-beam accelerator // Nucl. Instr. Meth. A. 1991. V. 306. P. 592–605.
3. *Houck T. et al.* Prototype microwave source for a relativistic klystron two-beam accelerator // IEEE Trans. Plasma Sci. 1996. V. 24, No. 3. P. 938–946.
4. *Denisov G. G. et al.* Problems of autobunching and phase stability for the TBA-driver: calculations and design for a modeling experiment // Nucl. Instr. Meth. A. 1995. V. 358. P. 528–531.
5. *Elzhov A. V., Kazacha V. I., Perelstein E. A.* New scheme of two beam accelerator driver on base of linear induction accelerator // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. «Ядерно-физ. исслед.»*. 1997. Вып. 4, 5 (31, 32). С. 129–131; Тр. II Науч. семинара памяти В.П. Саранцева. Дубна, 1998. С. 119–124.
6. *Elzhov A. V. et al.* New scheme of two beam accelerator driver based on linear induction accelerator // Proc. of Sixth Eur. Particle Accelerator Conf. (EPAC'98), Stockholm, 1998. P. 472–474.
7. *Perelstein E. A. et al.* Theoretical study of power relativistic amplifiers for electron beam bunching // Proc. of 1997 Particle Accelerator Conf. (PAC'97), Vancouver, Canada, 1997. P. 488–490; *Перельштейн Э. А. и др.* Теоретическое исследование группировки электронного пучка в релятивистских усилителях мощности // *ЖТФ*. 1999. Т. 69, вып. 2. С. 98–102.
8. *Elzhov A. V. et al.* Study of modified TBA driver scheme // Proc. of 1999 Particle Accelerator Conf. (PAC'99), New York, 1999. P. 3393–3395.
9. *Elzhov A. V. et al.* Study of scheme of two beam accelerator driver with accompanying electromagnetic wave. JINR Commun. E9-2000-294. Dubna, 2000. 17 p.

Получено 24 мая 2004 г.