

ДИНАМИКА ИНТЕНСИВНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В КРУГЛОМ ДИАФРАГМИРОВАННОМ ВОЛНОВОДЕ С ПЕРЕМЕННОЙ ФАЗОВОЙ СКОРОСТЬЮ

В. Ф. Жигло, А. И. Зыков, В. С. Коваленко, Е. Ю. Крамаренко, В. А. Кушнир,
В. В. Митроченко, А. Н. Опанасенко

*Научно-исследовательский комплекс «Ускоритель»,
Национальный научный центр
«Харьковский физико-технический институт»
1, ул. Академическая, Харьков, 61108, Украина
E-mail: kovalenko@kipt.kharkov.ua*

Представлены результаты численного моделирования динамики электронов в ускоряющей секции на основе круглого диафрагмированного неоднородного волновода, которая используется в ускорителе 10-см диапазона со средней мощностью ускоренного пучка до 10 кВт. Рассмотрено два подхода учета собственного поля излучения пучка: оценочный, на основе уравнения диффузии мощности, и полномасштабный, на основе самосогласованных уравнений возбуждения поля и движения частиц. Самосогласованный подход показал наличие существенного фазового скольжения частиц в однородной части структуры, обусловленного реактивной токовой нагрузкой. Ил. 11. Табл. 1. Библиогр.: 10 назв.

Ключевые слова: линейный резонансный ускоритель электронов, группирователь, самосогласованная задача.

Односекционные линейные ускорители электронов наиболее часто применяются для реализации прикладных задач. В таких установках, как правило, неоднородный участок с переменной фазовой скоростью волны, представляющий собой группирователь, интегрирован с однородным ускоряющим участком секции с фазовой скоростью, равной скорости света. В группирователе инжектированные электроны формируются в сгустки, которые затем попадают в регулярный ускоряющий участок. В данных ускоряющих структурах отсутствует возможность изменения разности фазы между группирователем и ускоряющим участком секции, что ограничивает возможности подстройки ускорителя. В связи с этим возникает необходимость исследования динамики электронов в подобных интегрированных структурах с целью нахождения оптимального режима ускорения частиц.

В процессе группировки и ускорения электроны взаимодействуют с полем бегущей волны, которое складывается из внешнего поля (поля генератора) и собственного поля излучения пучка. Это поле вносит существенный вклад при ускорении интенсивного пучка, поэтому важным условием для исследования процесса является нахождение распределения суммарного поля в волноводе, что требует решения самосогласованной задачи. В данной работе приведены результаты численного моделирования процессов формирования и ускорения электронных сгустков в односекционном линейном ускорителе, выполненного на основе круглого диафрагмированного волновода.

1. Структура ускорителя. Линейный ускоритель электронов ЛУ-10 Национального

научного центра «Харьковский физико-технический институт» включает в себя следующие основные элементы, схематично указанные на рис. 1.

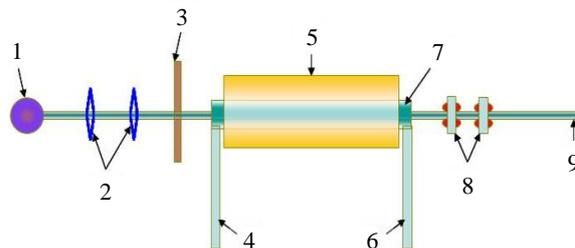


Рис. 1. Линейный ускоритель электронов ЛУ-10: 1 – электронная пушка; 2 – магнитные линзы; 3 – магнитный экран; 4 – волновод (72×34 мм); 5 – соленоид; 6 – волновод (90×45 мм); 7 – секция; 8 – квадрупольные линзы; 9 – электропровод

Как отмечалось выше, ускоряющая секция представляет собой частично неоднородный круглый диафрагмированный волновод, состоящий из соединенных между собой группирующего и ускоряющего участков. Группирователь содержит 15 ячеек с переменной фазовой скоростью волны, 4 из которых являются переходными (см. таблицу). Регулярный ускоряющий участок состоит из 86 ячеек с постоянной фазовой скоростью волны. Набег фазы на ячейке составляет 90° при частоте источника СВЧ-питания 2 797 МГц. В качестве источника электронов используется диодная электронная пушка. Магнитооптическая система состоит из двух аксиально-симметричных магнитных линз, соленоида и дуплета квадрупольных линз.

Параметры ячеек диафрагмированного волновода (β – приведенная фазовая скорость ускоряющей волны, a – радиус отверстия диафрагмы)

№ ячейки	a , мм	Z , см	β
1–6	21,65	0–10,3	0,6998
7	21,65	10,3–12,3	0,7494
8	21,1	12,3–14,6	0,8494
9–13	20,35	14,6–26,6	0,8994
14	20,35	26,6–29,1	0,9244
15	17,15	29,1–31,7	0,9741
16–101	15,0	31,7–263,5	1

2. Применение метода диффузии мощности для моделирования динамики пучка. Часто для проведения расчетов динамики ускоряемых частиц с учетом индуцированного пучком поля используется уравнение диффузии мощности [1, 2]. Это уравнение вместе с уравнениями движения частиц в общем виде представляют самосогласованную задачу. Однако для расчета движения частиц в ускорителе нами используется программа *PARMELA* [3], которая рассчитывает движение в заданных полях. Поэтому, чтобы применить данный метод для оценки вклада собственного поля излучения пучка, сделаны предположения:

- пучок, индуцирующий поле, аппроксимируется последовательностью точечных сгустков;
- частицы пучка находятся в синхронизме с излучаемой волной в максимуме тормозящего поля. В этом приближении уравнение баланса мощности имеет следующий вид:

$$\frac{dP_r}{dz} + 2\alpha P_r = IE_r, \quad (1)$$

где α – коэффициент затухания поля волны в секции; P_r – мощность; I – средний за ВЧ-период ток пучка; E_r – амплитуда основной пространственной гармоники продольной компоненты электрического поля излучаемой волны. Используя связь $P_r = E_r^2 / R_s(z)$ (R_s – последовательное сопротивление рабочей моды), из (1) можно найти собственное поле излучения пучка.

Суммарное поле основной пространственной гармоники волны будет иметь вид [1]

$$E_{tot}(z, t_0) = E_0(z) \cos \phi(z, t_0) - E_r(z), \quad (2)$$

где $E_0(z)$ – поле, создаваемое генератором; t_0 – время влета частицы в секцию; $\phi(z, t_0)$ – фаза частицы относительно фазы волны, которая определяется как

$$\phi(z, t_0) = \omega t_\Lambda(z, t_0) - \int_0^z \frac{\omega}{v_{ph}(z')} dz', \quad (3)$$

где v_{ph} – фазовая скорость волны; $t_\Lambda(z, t_0)$ – лагранжевая временная координата частицы; ω – круговая частота волны.

В дальнейшем для анализа фазового движения будем использовать фазу 1-й фурье-гармоники тока $\psi(z)$, определяемой из выражения

$$I_\omega e^{i\psi(z)} = I \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N e^{i\alpha t_\Lambda(z, t_{0,\alpha})}, \quad (4)$$

где N – число частиц в сгустке.

Процесс группировки и ускорения частиц изначально непрерывного пучка моделировался с помощью программы *PARMELA* [3], которая позволяет учитывать поля пространственного заряда. Программа генерирует поле периодической структуры в виде флюке-ряда, нормированного на амплитуду основной пространственной гармоники [4], которая является внешним параметром.

Расчет магнитооптической системы проводился с использованием программы *POISSON*, входящей в пакет *SUPERFISH* [5]. Электронный пучок с током 1,5 А, формируемый термоэлектронной пушкой, моделировался с помощью программы *EGUN* [6].

На рис. 2 (сплошная линия) приведено поле основной пространственной гармоники, рассчитанное по формуле (2) при токе сгруппированного пучка 1 А. Для сравнения построено распределение амплитуды поля без учета токовой нагрузки. Видно, что в ускоряющей однородной части секции собственные поля излучения пучка вносят существенный вклад в суммарное поле.

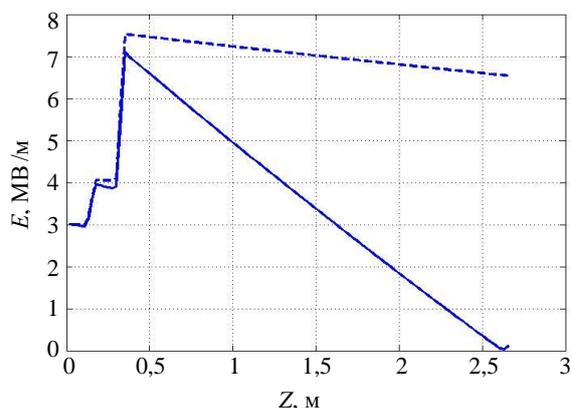


Рис. 2. Распределения амплитуды суммарного поля вдоль оси секции при мощности СВЧ-источника 10 МВт: сплошная линия соответствует методу диффузии мощности при токе пучка 1 А, пунктирная – при нулевом токе

На рис. 3 приведены зависимости фазовой протяженности сгустка (для 70 % частиц) и средней энергии пучка на выходе ускорителя от мощности СВЧ-питания секции. Видно, что с увеличением мощности СВЧ-питания растет не только средняя энергия пучка, но и улучшается эффективность группировки.

Следует отметить, что энергия частиц пучка ускорителя не должна превышать 10 МэВ, что определяется требованиями программы по стерилизации, которую выполняет данный ускоритель.

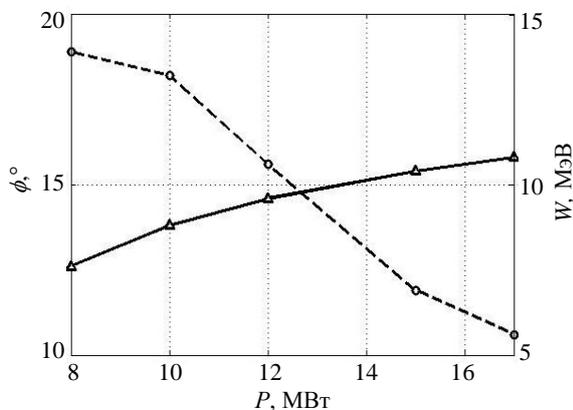


Рис. 3. Зависимость средней энергии пучка на выходе ускорителя (Δ) и фазовой протяженности сгустка (o) от мощности СВЧ-питания секции при токе из пушки 1,5 А

Поэтому в расчетах величина мощности СВЧ-питания секции принята равной 10 МВт. Ток инжектируемого пучка 1,5 А. При моделировании параметры магнитооптической системы подбираются таким образом, чтобы обеспечить транспортировку пучка электронов с наименьшими потерями частиц. Рассчитанный для этих параметров энергетический спектр частиц на выходе ускорителя приведен на рис. 4. Энергетический разброс равняется 5 % для 70 % частиц пучка.

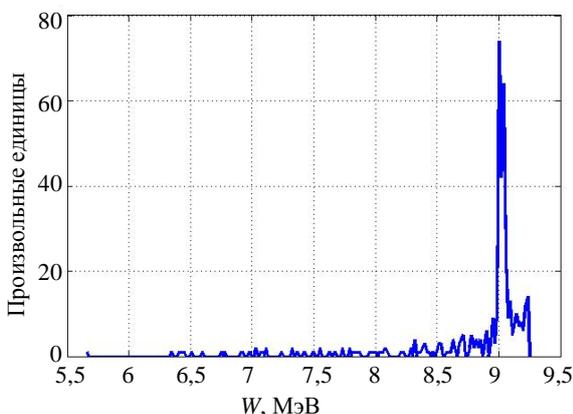


Рис. 4. Энергетический спектр пучка электронов на выходе ускорителя при мощности СВЧ-источника 10 МВт и токе инжектированного пучка 1,5 А

Рассмотрим подробнее фазовое движение электронов в процессе группировки и ускорения в секции. На рис. 5 приведены фазово-энергетические распределения частиц в различных сечениях секции: $z_1 = 31,7$ см, $z_2 = 147,6$ см, $z_3 = 263,5$ см. Результат формирования частиц в сгустки в неоднородной группирующей части секции представлен на рис. 5, а. Среднеквадра-

тичная фазовая протяженность сгустка для 70 % частиц составляет 60° .

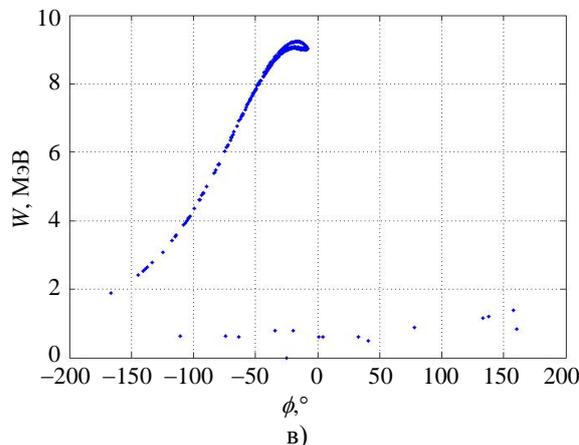
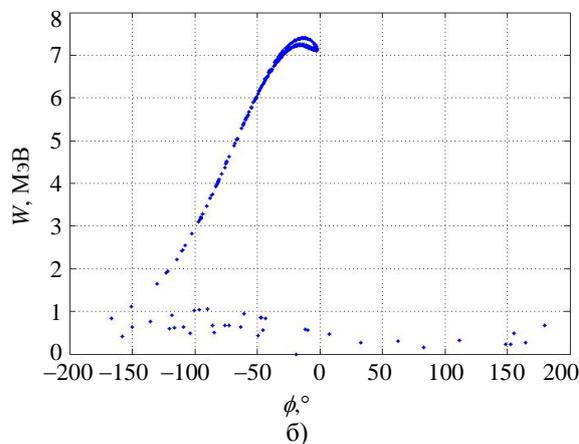
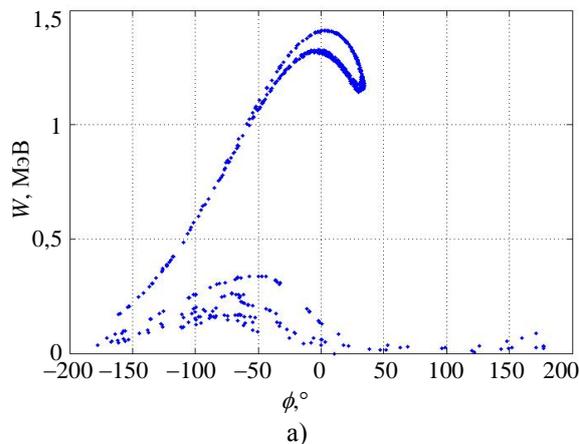


Рис. 5. Фазово-энергетическое распределение частиц: а) – в первой ячейке ускоряющего участка ($z_1 = 31,7$ см); б) – в середине ускоряющего участка ($z_2 = 147,6$ см); в) – в конце секции ($z_3 = 263,5$ см)

Из рисунка видно, что в этой части секции существует заметное количество низкоэнергетических частиц (с энергией меньше 300 кэВ), которые не захвачены волной в процесс группировки и ускорения. Сравнивая рис. 5, а, б, видно, что к середине ускоряющего участка сгусток,

получив приращение энергии около 6 МэВ, сместился приблизительно на 30° относительно волны, что свидетельствует о существенном фазовом скольжении сгустка, связанном с ускорением частиц пучка до ультрарелятивистских скоростей, для которых $\gamma^2 \gg 1$ (γ – лоренц-фактор). Энергетический разброс при этом составляет 6 % для 70 % частиц.

При дальнейшем ускорении пучка (рис. 5, в) фазовое скольжение сгустка практически отсутствует, так как энергия частиц основной части сгустка является ультрарелятивистской. Сравнивая рис. 5, б, в, видно, что приращение энергии частиц во второй части однородного ускоряющего участка секции составляет всего лишь около 2 МэВ. Такое незначительное приращение энергии пучка обусловлено низким значением суммарного поля (см. рис. 2) из-за токовой нагрузки (сложение в противофазе поля излучения с полем внешнего источника).

Группировка частиц в секции может быть проиллюстрирована зависимостью относительной фазовой протяженности сгустка $\Delta\phi/360^\circ$ от продольной координаты, приведенной на рис. 6. Видно, что фазовая протяженность сгустка значительно уменьшается в группирующей части секции. Выброс на спадающем участке графика обусловлен тем, что при расчете относительной фазовой протяженности сгустка учитываются также и незахваченные в процесс группировки низкоэнергетические частицы (см. рис. 5, а), которые существенно влияют на статистическую обработку параметров пучка и приводят к завышенному значению фазовой длины сгустка. Вместе с тем, как видно из рис. 5, в, заметное количество таких незахваченных частиц не достигает выхода секции.

На рис. 7 показана зависимость от продольной координаты фазы 1-й гармоники тока пучка относительно фазы волны, которую далее будем называть средней фазой сгустка. Видно, что в группирующей части ($z = 0-31,7$ см) происходят фазовые колебания, отражающие процесс группировки пучка. В начальных ячейках однородной части секции ($z = 31,7-111,7$ см) наблюдается заметное фазовое скольжение, связанное с ускорением частиц пучка до ультрарелятивистских скоростей. Во второй части ускоряющей структуры ($z = 111,7-263,5$ см) средняя фаза сгустка практически не меняется и равна примерно -23° . Согласно применяемому нами методу диффузии мощности фаза 1-й гармоники тока пучка относительно фазы волны должна равняться нулю. Таким образом, в данном случае нарушается закон сохранения баланса мощности и для более адекватного моделирования процессов ускорения сгруппированного пучка необходимо применять методы, учитывающие самосогласованное изменение как амплитуды, так и фазы 1-й гармоники тока вдоль ускорителя.

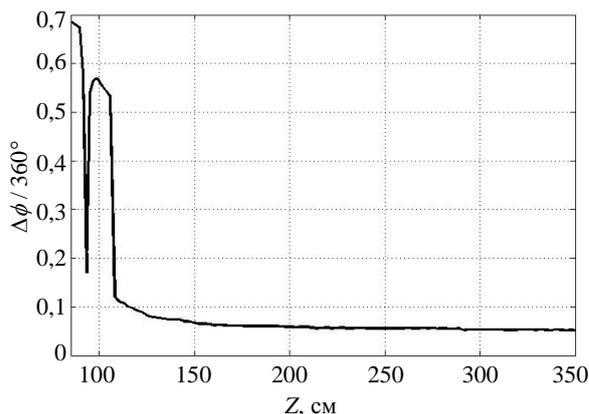


Рис. 6. Изменение относительной фазовой протяженности сгустка вдоль секции

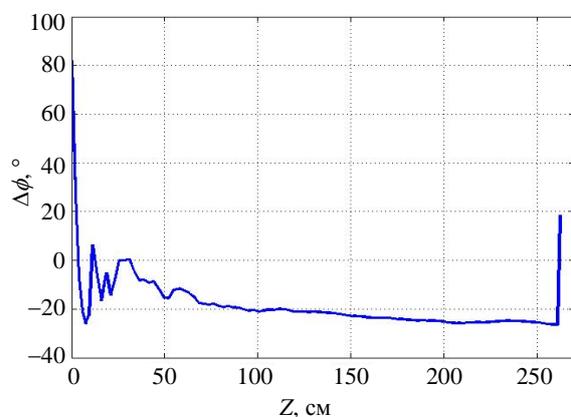


Рис. 7. Зависимость фазы сгустка относительно фазы волны от продольной координаты при $P = 10$ МВт. Ток инжектированного пучка 1,5 А

3. Результаты моделирования стационарной самосогласованной динамики пучка электронов. Для описания процессов формирования и ускорения пучка использовался метод макрочастиц [7, 8], который основан на нестационарной теории возбуждения резонаторов и волноводов пучком заряженных частиц и источниками СВЧ-питания [9]. Теория возбуждения волноводов обобщена и распространена на случай пространственно-неоднородных ускоряющих структур на бегущей волне. Согласно применяемой модели электрическое и магнитное поле представляется в виде бегущей волны:

$$\begin{aligned} \vec{E}(t, \vec{r}) &= \text{Re} \left\{ [C(t, z)] \vec{E}_0(\vec{r}) \times \right. \\ &\times \exp \left(i \left[\int_0^z \frac{\omega}{v_{ph}(z)} dz - \omega t + \phi(t, z) \right] \right) \Bigg\}, \\ \vec{H}(t, \vec{r}) &= \text{Re} \left\{ [C(t, z)] \vec{H}_0(\vec{r}) \times \right. \\ &\times \exp \left(i \left[\int_0^z \frac{\omega}{v_{ph}(z)} dz - \omega t + \phi(t, z) \right] \right) \Bigg\}. \end{aligned} \quad (5)$$

Медленноменяющиеся амплитуда $|C(t, z)|$ и фаза $\phi(t, z)$ подчиняются уравнениям возбуждения

$$\begin{aligned} \frac{\partial |C|}{\partial z} + \alpha |C| - \frac{1}{2R_s} \frac{2R_s}{dz} |C| + \frac{1}{v_g} \frac{\partial |C|}{\partial t} = \\ = \frac{IR_s}{2} \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \cos(\omega t_{\Lambda}(z, t_{0,\alpha}) - \\ - \int_0^z \frac{\omega}{v_{ph}(z)} dz - \phi(t, z)); \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \phi}{\partial z} + \frac{1}{v_g(z)} \frac{\partial \phi}{\partial t} = \\ = \frac{IR_s}{2|C|} \frac{1}{N} \sum_{\alpha=1}^N \sin(\omega t_{\Lambda}(z, t_{0,\alpha}) - \\ - \int_0^z \frac{\omega}{v_{ph}(z)} dz - \phi(t, z)), \end{aligned} \quad (7)$$

где v_g – групповая скорость; α – коэффициент затухания волны.

Для расчета собственных полей $\vec{E}_0(\vec{r}), \vec{H}_0(\vec{r})$ и электродинамических характеристик аксиально-симметричных резонансных структур (R_s, v_g) использовался пакет программ *SUPERFISH* [5]. Движение заряженных частиц на каждом временном шаге интегрирования моделировалось с помощью программы *PARMELA*.

Рассмотрим характеристики динамики пучка в установившемся режиме: распределение амплитуды основной пространственной гармоники суммарного поля вдоль оси секции представлено на рис. 8. Видно, что ускоряющее поле спадает вдоль оси структуры меньше, чем поле, рассчитанное методом диффузии. Это определяется двумя факторами:

- несинфазным сложением полей излучения частиц сгустка конечной протяженности;
- наличием скольжения фазы 1-й гармоники тока пучка относительно фазы волны [10], как показано на рис. 9.

Из рис. 9 также можно видеть, что, несмотря на ультрарелятивистские скорости частиц в области однородного ускоряющего участка $z = 111,7-263,5$ см, наблюдается сильное смещение средней фазы пучка приблизительно на -40° . Это можно трактовать, как изменение фазовой скорости ускоряющей волны, обусловленное наличием реактивной токовой нагрузки, описываемой уравнением (7). Уравнение показывает, что скорость изменения фазы волны, связанной с токовой нагрузкой, обратно пропорционально амплитуде поля. Поэтому чем меньше амплитуда, тем больше может наблюдаться фазовое скольжение.

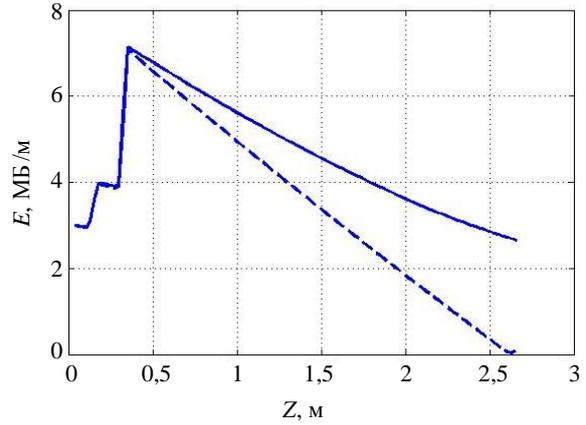


Рис. 8. Распределения амплитуды суммарного поля вдоль оси секции при мощности СВЧ-источника 10 МВт: сплошная линия соответствует самосогласованному подходу, пунктир – методу диффузии мощности

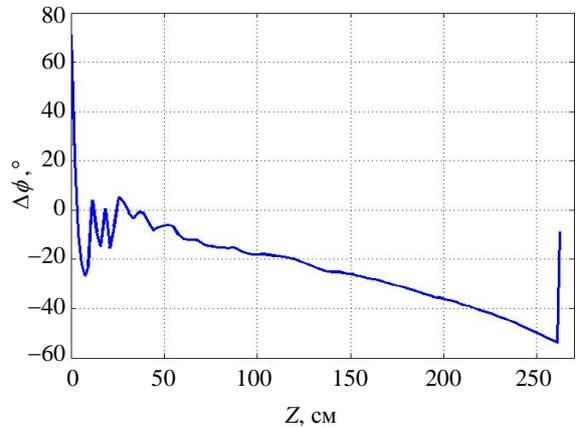


Рис. 9. Зависимость фазы сгустка относительно фазы волны от продольной координаты при $P = 10$ МВт и токе инжектированного пучка 1,5 А

Картина фазово-энергетического распределения частиц представлена на рис. 10 для сечений $z_1 = 31,7$ см, $z_2 = 147,6$ см, $z_3 = 263,5$ см соответственно. Видно, что распределения частиц на фазовой плоскости для сечений $z_1 = 31,7$ см и $z_2 = 147,6$ см (рис. 10, а, б) практически не отличаются от фазового распределения, полученного методом диффузии (см. рис. 5, а, б). Это связано с тем, что фазовое движение здесь определяется в основном разностью фазовой скорости волны и скорости частиц, а вклад реактивной токовой нагрузки незначительный. Вместе с тем, рис. 10, в наглядно демонстрирует наличие сильного фазового движения сгустка во второй части ускоряющей структуры, обусловленного реактивной токовой нагрузкой. Видно, что голова сгустка, находясь на гребне волны в сечении $z_2 = 147,6$ см (рис. 10, б), при дальнейшем ускорении сместилась от него на -55° (рис. 10, в), что приводит к недобору энергии частицами пучка.

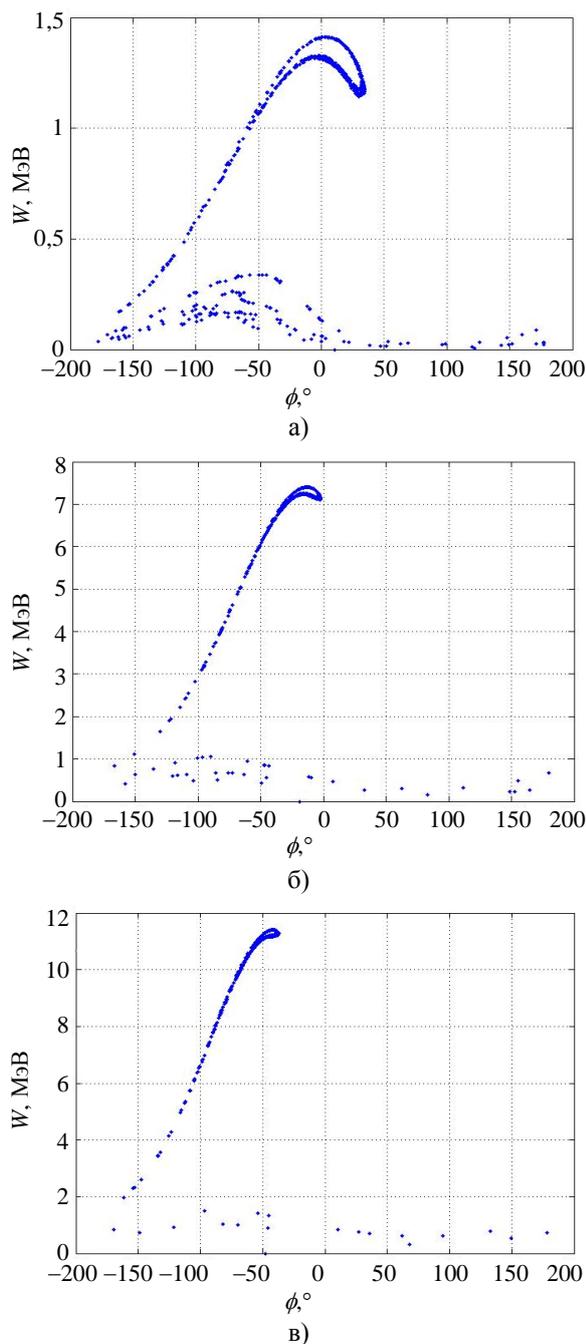


Рис. 10. Фазово-энергетическое распределение частиц: а) – в первой ячейке ускоряющего участка ($z_1 = 31,7$ см); б) – в середине ускоряющего участка ($z_2 = 147,6$ см); в) – в конце секции ($z_3 = 263,5$ см)

Энергетический спектр пучка на выходе ускорителя, полученный из решения самосогласованной задачи, приведен на рис. 11. Разброс по энергиям составил 7 % для 70 % частиц сгустка, что на 2 % больше, чем ширина энергетического спектра полученного методом диффузии (см. рис. 4). Следует также отметить, что, несмотря на неоптимальное ускорение пучка, связанное с соскальзыванием пучка с гребня волны, энергия частиц при 10 МВт входной мощности и токе инжекти-

руемого пучка 1,5 А превысила требуемое значение (10 МэВ) на 1,5 МэВ.

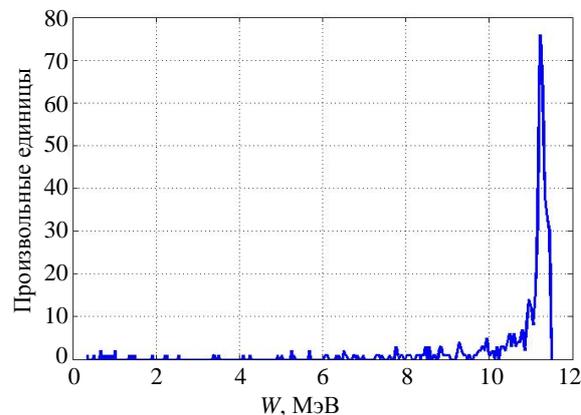


Рис. 11. Энергетический спектр. Мощность питания секции 10 МВт. Ток инжектированного пучка 1,5 А

Выводы. Проведено численное моделирование стационарной динамики интенсивного пучка электронов в круглом диафрагмированном волноводе, который состоит из группирователя с переменной фазовой скоростью волны, интегрированного с ускоряющим участком с постоянной фазовой скоростью волны. Рассмотрено два подхода:

- оценочный, на основе уравнения диффузии мощности;
- полномасштабный, на основе самосогласованных нестационарных уравнений возбуждения поля и движения частиц.

Показано, что для оценки параметров ускорения метод диффузии мощности может быть использован, если вклад реактивной токовой нагрузки в динамику пучка незначительный. Моделирование самосогласованной задачи показало наличие существенного фазового скольжения ультррелятивистских частиц в ускоряющей однородной части структуры, вызванное изменением фазовой скорости ускоряющей волны, которая в свою очередь обусловлена реактивной токовой нагрузкой. Это, с одной стороны, указывает на недостаток, присущий ускоряющим структурам с интегрированным группирователем, – невозможность внешней фазовой подстройки секции, с другой – на необходимость проведения оптимизации продольной самосогласованной динамики пучка в подобных структурах.

1. Вальднер О. А. Ускоряющие волноводы / О. А. Вальднер, А. Н. Диденко, А. В. Шальнов. – М.: Атомиздат, 1973. – 216 с.
2. Thiery Y. Design studies for a high current bunching system for CLIC Test Facility (CTF3) Drive Beam / Y. Thiery, J. Gao, J. Le Duff // Proc. XX International Linac Conf. – Monterey, 2000. – P. 95–97.
3. Young L. M. PARMELA / L. M. Young – Los Alamos, Los Alamos National Laboratory, 1996. – 93 с. – (Препринт / Los Alamos National Laboratory, LA-UR-96-1834).

4. *Lapostolle P. M.* Linear accelerators / P. M. Lapostolle, A. L. Septier. – Amsterdam: North Amsterdam North Holland Publishing Company, 1970. – P. 44 – 56.
5. *Billen J. H.* Poisson superfish / J. H. Billen, L. M. Young. – Los Alamos: Los Alamos National Laboratory, 1996. – 43 с. – (Препринт / Los Alamos National Laboratory; LA-UR-96-1834).
6. *Herrmannsfeldt W. B.* Developments in the Electron Gun Simulation Program, EGUN / W. B. Herrmannsfeldt – Stanford: Stanford Linear Accelerator Center, 1994. – 12 с. – (Препринт / Stanford Linear Accelerator Center; SLAC-PUB-6726).
7. *Mytrochenko V. V.* Simulation technique for study of transient Self-consistent Beam Dynamics in RF Linacs / V. V. Mytrochenko, A. N. Opanasenko // Proc. IX European Particle Accelerator Conf. – Lucerne, 2004. – P. 2762–2764.
8. *Mytrochenko V. V.* Study of transient self-consistent beam dynamics in RF linacs using a particle tracing code / V. V. Mytrochenko, A. N. Opanasenko // Nuclear Instruments & Methods. – 2006. – N A 558. – P. 235–239.
9. *Вайнштейн Л. А.* Лекции по сверхвысокочастотной электродинамике / Л. А. Вайнштейн, В. А. Солнцев. – М.: Сов. Радио, 1973. – 400 с.
10. *Масунов Э. С.* Исследования эффектов нагрузки током в линейных ускорителях / Э. С. Масунов // Журн. техн. физики. – 1976. – 46, вып. 1. – С. 146–150.

DYNAMICS OF INTENSIVE ELETRON BEAM IN DISK-LOADED WAVEGUIDE WITH VARIABLE PHASE VELOCITY

V. F. Zhiglo, A. I. Zykov, V. S. Kovalenko,
K. Yu. Kramarenko, V. A. Kushnir,
V. V. Mytrochenko, A. N. Opanasenko,

Results of numerical simulation of electron dynamics in an inhomogeneous disk-loaded waveguide which is used in the S-band linac with average power of an accelerated beam of 10 kW

are presented. Two approaches taking into account the self-fields of beam radiation are considered: the first method estimative based on the power diffusion equation; the second one based on self-consistent equations of field excitation and particles motion. The self-consistent approach showed the presence of substantial phase slipping of particles in the homogeneous part of the rf structure, conditioned by the reactive beam loading.

Key words: rf linac, a buncher, self-consistent task.

ДИНАМІКА ІНТЕНСИВНОГО ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКА В КРУГЛОМУ ДІАФРАГМОВАНОМУ ХВИЛЕВОДІ ЗІ ЗМІННОЮ ФАЗОВОЮ ШВИДКІСТЮ

В. Ф. Жигло, А. І. Зиков, В. С. Коваленко,
К. Ю. Крамаренко, В. А. Кушнір,
В. В. Митроченко, А. М. Опанасенко

Репрезентовано результати чисельного моделювання динаміки електронів у прискорювальній секції на основі круглого діафрагмованого неоднорідного хвилевода, яка використовується в прискорювачі 10-см діапазону з середньою потужністю прискореного пучка до 10 кВт. Розглянено два підходи урахування власного поля випромінювання пучка: оціночний, на основі рівняння дифузії потужності, і повномасштабний, на основі самоузгоджених рівнянь збудження поля і руху частинок. Самоузгоджений підхід показав наявність істотного фазового ковзання частинок в однорідній частині структури, обумовленого реактивним струмовим навантаженням.

Ключові слова: лінійний резонансний прискорювач електронів, групувач, самоузгоджена задача.

Рукопись поступила 14 декабря 2009 г.