

УДК 621.384.644

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАГРУЗКИ ТОКОМ ПУЧКА УСКОРИТЕЛЯ ЛУЭ-200

*В. С. Александров, Н. Ю. Казаринов, М. Н. Сазонов,
А. П. Сумбаев, В. Ф. Шевцов*

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

Приведены аналитические оценки и результаты численного моделирования эффекта нагрузки током пучка в ускоряющих секциях ускорителя ЛУЭ-200. Представлены результаты моделирования динамики пучка электронов в ускорителе и канале транспортировки.

Analytical estimations and results of numerical simulation of beam loading effect in accelerating sections of accelerator LUE-200 are resulted. Results of simulation of electron beam dynamics in the accelerator and the channel of transportation are submitted.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования на ЛУЭ-200 входят в состав проекта ИРЕН [1]. Пучок электронов длительностью $t_b = 250$ нс при среднем токе в импульсе $I = 2$ А ускоряется в двух ускоряющих секциях AS № 1 и AS № 2 до энергии 200 МэВ. Далее пучок транспортируется на мишень, где образуются пучки нейтронов. Для оценки эффекта нагрузки током пучка использовались электродинамические параметры секции, приведенные в таблице.

Параметры ускоряющих секций ЛУЭ-200

Рабочая частота f , МГц	2856
Средний ускоряющий градиент, МэВ/м	35
Шунтовое сопротивление $R_{ш}$, МОм/м	50
Собственная добротность Q	13200
Длина ускоряющей структуры L , м	2,93
Время заполнения t_f , мкс	0,465

Согласно [2] амплитуда ускоряющего электрического поля $E_z(s, t)$ в секции с постоянным импедансом, с учетом нагрузки пучком с током $i(s, t)$, удовлетворяет следующему уравнению:

$$\frac{\partial E_z}{\partial s} + \frac{1}{v_g} \frac{\partial E_z}{\partial t} + \alpha E_z = -\alpha R_{ш} i(s, t), \quad (1)$$

где v_g — групповая скорость волны ускоряющего поля ($t_f = L/v_g$) и $\alpha = \frac{\pi f}{Q v_g}$.

Решение уравнения (1) с граничным условием $E(s = 0, t) = E_0\theta(t)$, где $\theta(x)$ — ступенчатая функция Хевисайда, имеет следующий вид:

$$E_z(s, t) = E_0 e^{-\alpha s} \theta(t - s/v_g) + E_{\text{ind}}(s, t),$$

$$E_{\text{ind}}(s, t) = -R_{\text{ш}} \alpha \int_0^s e^{-\alpha(s-s')} i\left(s', t - \frac{s-s'}{v_g}\right) \theta\left(t - \frac{s-s'}{v_g}\right) ds'. \quad (2)$$

Для короткого ультрарелятивистского сгустка частиц с полным зарядом q , стартующего при $s = 0$ в момент времени $t = t_0$ (ток $i(s, t) = q\delta(t - t_0 - s/c)$), индуцированное электрическое поле равно, согласно (2):

$$E_{\text{ind}}(s, t) = -R_{\text{ш}} \alpha v_g q e^{-\alpha v_g [(t-t_0) - s/c]} \text{ при } s/c \leq (t - t_0) \leq s/v_g. \quad (3)$$

Для других значений (s, t) индуцированное поле равно нулю. Отметим, что формула (3) получена в предположении $v_g/c \ll 1$.

РЕЗУЛЬТАТЫ НАГРУЗКИ ТОКОМ ПУЧКА

Изменение энергии электрона $\Delta\varepsilon(s)$ на участке структуры от 0 до s в индуцированном поле (3):

$$\Delta\varepsilon(s) = -e R_{\text{ш}} \alpha v_g q e^{-\alpha v_g (t_i - t_0)} [s - v_g (t_i - t_0)] \theta[s - v_g (t_i - t_0)], \quad (4)$$

где $t_i > t_0$ — момент времени влета электрона в ускоряющую структуру. Для последовательности сгустков изменение энергии находится суммированием (4) для всех сгустков, предшествующих электрону. Энергия электрона на выходе ускоряющей секции будет зависеть от длительности предшествующего импульса тока t_b . При длительности t_b , меньшей времени заполнения секции ВЧ-мощностью, отличие энергии пучка от максимальной составит

$$\Delta\varepsilon = -e \frac{\pi R_{\text{ш}} LI}{Q} - e \frac{\pi R_{\text{ш}} LI}{Q} \left[1 - \left(\frac{1}{1 - e^{-\pi/Q}} - \frac{ft_b}{e^{\pi ft_b/Q} - 1} \right) / (ft_f) \right]. \quad (5)$$

При $t_b \geq t_f$ энергия пучка не зависит от длительности импульса тока и отличие энергии электронов от максимальной может быть найдено по формуле (5) с помощью подстановки $t_b = t_f$.

При длительности пучка $t_b \ll t_f$ может быть использована упрощенная формула:

$$\Delta\varepsilon = -e \frac{\pi R_{\text{ш}} LI}{Q} ft_b \left(1 - \frac{1}{2} \frac{t_b}{t_f} \right). \quad (6)$$

Зависимость $\Delta\varepsilon$ на выходе ускоряющей секции ИРЕН от длительности импульса t_b , вычисленная по формулам (5) и (6), показана на рис. 1. Относительное отличие (5) и (6) не превышает 10%.

Было выполнено численное моделирование для пучка, состоящего из последовательности 715 электронных сгустков, по $4,4 \cdot 10^9$ электронов в каждом. Результаты моделирования нагрузки током пучка и ее аналитические оценки по формуле (6) для ЛУЭ-200 представлены на рис. 2.

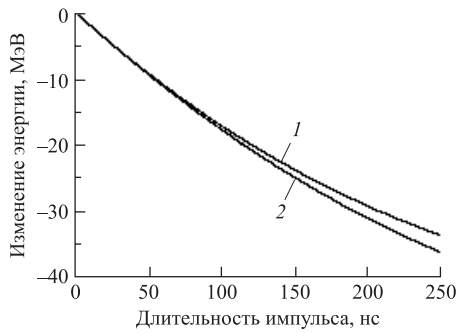


Рис. 1. Аналитические оценки изменения энергии пучка: 1 — формула (5); 2 — формула (6)

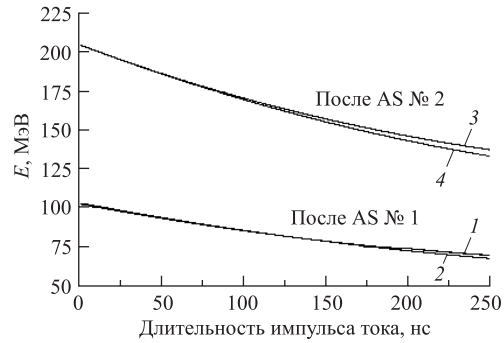


Рис. 2. Энергия электронов после первой (1, 2) и второй (3, 4) секций. 1, 3 — формула (5); 2, 4 — расчет

Энергия первого сгустка пучка после второй ускоряющей секции AS № 2 составляет 205 МэВ, а последнего (715-го) 137 МэВ. Средняя энергия пучка уменьшается приблизительно на 20%. Как видно из рис. 2, энергия ускоренных сгустков пучка уменьшается почти линейно с длительностью импульса и пропорционально его току.

Эти результаты позволяют при моделировании динамики конкретного сгустка учитывать эффект нагрузки пучком, изменяя ускоряющее поле в соответствии с временным положением сгустка в пучке. При моделировании ускорения и транспортировки различных сгустков пучка электронов с помощью программы PARMELA [3] электрическое поле уменьшалось так, чтобы получить среднюю энергию пучка с учетом нагрузки током пучка. Градиенты квадрупольных линз соответствовали номинальным значениям. В расчете динамики использовались следующие начальные параметры: энергия инжекции электронов 200 кэВ, энергетический разброс ± 2 кэВ, длительность сгустка 360° , ток пучка 2 А, эмиттанс $100 \pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$, радиус пучка 4 мм. Распределение магнитного

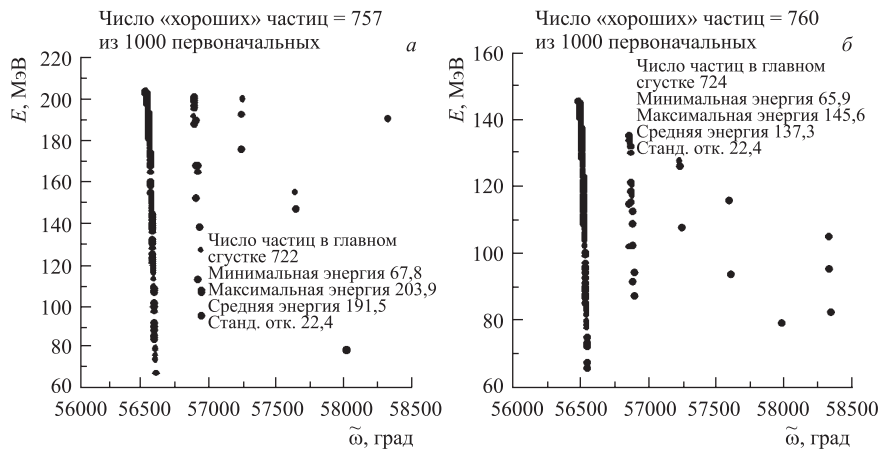


Рис. 3. Энергетические спектры и основные параметры первого (а) и последнего (б) сгустков пучка на мишени

поля соответствует параметрам системы соленоидальной фокусировки работы [4]. На рис. 3 показаны энергетические спектры первого и последнего (715-го) сгустка пучка на мишени.

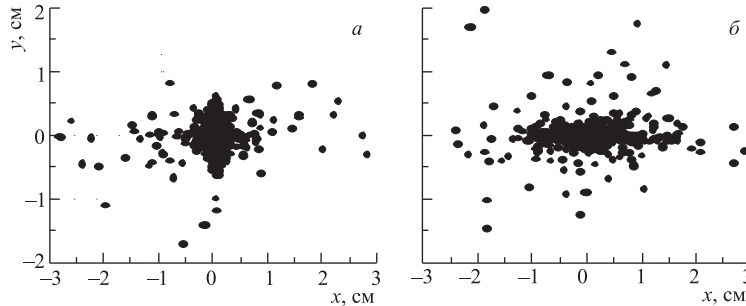


Рис. 4. Распределение частиц на мишени: а) сгусток № 1; б) сгусток № 715

Как видно из данных рис. 3, уровень потерь частиц практически не зависит от номера сгустка. Распределения электронов первого и последнего сгустков пучка на мишени показаны на рис. 4. Видно, что характер распределения меняется в зависимости от положения сгустка в пучке: вертикально вытянутый эллипс для начала пучка переходит в горизонтально вытянутый для последних сгустков.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате нагрузки током пучка средняя энергия ускоренных электронов уменьшается на 20 % и составляет ~ 160 МэВ. Тем не менее, при фиксированных градиентах линз удастся провести пучок с планируемыми потерями в 25 %.

Разные фокусирующие свойства канала квадрупольной фокусировки при разных энергиях сгустков, из-за нагрузки ускоряющей структуры током пучка, могут играть положительную роль, позволяя более равномерно распределять частицы по площади размножающей мишени.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Кобец В. В. и др.* Проект ИРЕН: Статус и первые результаты // Тр. IV науч. семинара памяти В. П. Саранцева. Дубна, 2002. С. 150.
2. *Wang J. W.* RF properties of periodic accelerating structures for linear collider. SLAC-336. 1989.
3. *Mouton B.* The PARMELA Program. LAL/SERA 93-455. Orsay, 1993.
4. *Александров В. С. и др.* Расчет динамики пучка электронов ускорителя ЛУЭ-200 // Письма в ЭЧАЯ. 2004. Т. 1, № 3(120). С. 70.