

ОДНОВРЕМЕННАЯ ИНЖЕКЦИЯ В ЛИНЕЙНЫЙ УСКОРИТЕЛЬ СИЛЬНОТОЧНЫХ ПРОТОННОГО И ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКОВ

В.И. Бутенко, Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика
ННЦ ХФТИ, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1, Украина;
E-mail: ivanovbi@kipt.kharkov.ua

С использованием компьютерного моделирования рассматривается инжекция протонного пучка с током до 500 мА в линейный ускоритель с применением электромагнитной фокусировки встречным замагниченным интенсивным электронным пучком. Исследуется динамика электронного и протонного пучков в области инжекции протонного пучка в ускоритель. Получено сжатие радиуса протонного пучка на входе в ускоритель до 1 мм.

1. ВВЕДЕНИЕ

Современные ускорители интенсивных ионных пучков находят все большее применение для решения задач в области энергетики, экологии, новых технологий, медицины и др. (см., например, [-]).

Повышению тока в существующих ионных линейных ускорителях мешает, в частности, один принципиальный недостаток, который заключается в том, что ускоряющее ВЧ-поле является дефокусирующим в радиальном направлении [1]. Этот недостаток может быть преодолен в коллективных ускорителях (например, в плазменных волноводах [2] и двухпучковых электронно-ионных ускорителях [-]), в которых ускорение частиц производится объемными электромагнитными волнами, что обуславливает одновременную радиальную и фазовую устойчивость ускоряемого ионного пучка [3]. Кроме того, в двухпучковых электронно-ионных ускорителях весьма существенную роль играет фокусировка ионов кулоновским полем электронного пучка. Компьютерное моделирование фокусировки протонов для двухпучковых ускорителей выполнено в работах [4]. При этом показана возможность ускорения протонов с током в несколько ампер [5].

Радиальная фокусировка протонов с помощью встречного электронного пучка в линейном ускорителе типа Альвареса теоретически рассматривалась Ахизером, Любарским и Файнбергом [6]. Ранее подобная фокусировка в протонном ускорителе со спиральной замедляющей структурой была предложена в работе [7], но ни теоретически, ни экспериментально исследована не была. Следует отметить, что, в отличие от [8], в данной работе рассматривается ускоряющая структура на π -волне, в которой передача энергии от волны к электронному пучку сведена к минимуму, так как в соседних ускоряющих зазорах поля противофазны.

Экспериментально метод фокусировки ионов электронным пучком опробован в МИФИ [9]. При энергии 70 кэВ и токе электронного пучка 18 А получены протоны с энергией 0.5...1.2 МэВ, током 3 мА длительностью 70 мкс, частотой посылок 1 Гц. Хотя в этой работе получен малый ток ускоренных протонов, зато ускоряющая структура возбуждалась не ВЧ генератором, а самим электронным модулированным пучком (с КПД 20...30%).

В настоящее время для реализации электроодерной программы предлагаются клистроны мощностью ~1 МВт с КПД до 80% [10] (при этом рекуперация электронного пучка в клистроны может достигать 95%). В работе [11] с помощью компьютерного моделирования показано, что начальная часть ускорителя (НЧУ) с фокусировкой электронным пучком в принципе может дать на выходе протонный пучок с током порядка 1 А и энергией несколько мегавольт, а последующие секции способны ускорять этот пучок до больших энергий. Таким образом, имеет смысл для электроодерной программы разрабатывать НЧУ с запиткой ВЧ генераторами указанного выше типа и с фокусировкой протонов электронным пучком в сочетании с его эффективной рекуперацией.

В данной работе не ставится задача точно рассчитать процесс совместной инжекции интенсивных электронного и ионного пучков, так как этим целесообразно заниматься на стадии проектирования. Здесь, при упрощающих предположениях, мы ограничиваемся изучением основных особенностей этого процесса, его оптимизацией и оценкой параметров экспериментальной установки.

На данный момент постановка задачи такова. В соответствии с работой [12] требуется ввести в начальную ускоряющую секцию линейного протонного ускорителя с радиальной фокусировкой, обеспечиваемой встречным электронным пучком (с энергией 100...150 кэВ, током 50...150 А, радиусом 1...2 мм), пучок протонов с энергией 100...150 кэВ, током 0.1...1 А, радиусом около 1 мм. Этой задаче должен способствовать электронный пучок, выходящий из секции НЧУ и направляемый вдоль расходящихся магнитных силовых линий в рекуператор. (Зарядово-токовая фокусировка ионного пучка электронным пучком в профилированном магнитном поле рассматривалась в [13], раздел 2.4; см. также [14]). Исходя из условий эксперимента, электронный пучок предполагается трубчатым, толстостенным. Ионный инжектор расположен на достаточном расстоянии от входа в первую секцию ускорителя (около 100 см), поскольку в ней давление остаточного газа должно быть около 10^{-7} Торр (см. [15]), так что весь газ, выходящий из инжектора, может быть удален с помощью приосевых конических диафрагм и дифференциальной откачки.

2. ОСНОВНЫЕ УРАВНЕНИЯ

Совместное движение электронного и ионного пучков моделировалось нерелятивистскими уравнениями в цилиндрической системе координат, в условиях параксиального приближения при постоянной продольной скорости пучков:

$$\frac{d^2 r}{dz^2} V^2 = \frac{e}{m} E_r + \frac{e}{mc} (V_\phi B_z - V B_\phi) + \frac{V_\phi^2}{r}; \quad (1)$$

$$r \left(V_\phi + \frac{e}{mc} A_\phi \right) = const; \quad (2)$$

$$E_r = \begin{cases} 0, & r \leq r_i \\ \frac{2I}{V(r_b^2 - r_i^2)} \frac{r^2 - r_i^2}{r}, & r_i < r < r_b, \\ \frac{2I}{Vr}, & r \geq r_b \end{cases} \quad (3)$$

$$B_\phi = \begin{cases} 0, & r \leq r_i \\ \frac{2I}{c(r_b^2 - r_i^2)} \frac{r^2 - r_i^2}{r}, & r_i < r < r_b, \\ \frac{2I}{cr}, & r \geq r_b \end{cases}$$

где V – продольная скорость пучка, r_b – внешний радиус пучка, r_i – внутренний радиус пучка, I – ток пучка, e – заряд частицы пучка, m – масса частицы пучка, c – скорость света. Внешнее магнитное поле задавалось азимутальным компонентом векторного потенциала по формуле:

$$A_\phi(r, z) = \left(a_0 + a_1 z^2 - a_1 \left(\frac{r}{2} \right)^2 \right) \frac{r}{2},$$

откуда по формулам:

$$B_r = -\frac{\partial A_\phi}{\partial z}, \quad B_z = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r A_\phi)$$

определялись радиальный и продольный компоненты магнитного поля:

$$B_r(r, z) = -a_1 r z,$$

$$B_z(r, z) = a_0 + a_1 \left(z^2 - \frac{1}{2} r^2 \right).$$

3. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Уравнение (1) решалось методом Адамса 4-го порядка. Ниже приведены результаты моделирования. На рисунках тонкими сходящимися линиями обозначены силовые линии внешнего магнитного поля $B_z(r, z)$, а утолщенными – внешние границы электронного и ионного пучков.

В работах [–] получены протонные пучки высокой яркости с током в несколько сот миллиампер. Протонный пучок, выходящий из инжектора, скомпенсирован медленными электронами примерно на 99% [–], поэтому поначалу его радиус увеличи-

вается достаточно медленно. Однако в процессе входа во встречный интенсивный электронный пучок протонный пучок теряет медленные электроны, сильно увеличивает свой заряд и приобретает поперечную скорость, которая мешает сжатию пучка до требуемого радиуса. Чтобы протонный пучок не раскачался по радиусу, следует в области среза протонного инжектора резко увеличить крутизну расхождения магнитных силовых линий. При этом нужно следить, чтобы электронный пучок не задел инжектор, поскольку это влияет на КПД рекуперации. В соответствии с этими условиями на рис.1-4 показаны результаты численного моделирования фокусировки нескомпенсированного протонного пучка встречным электронным пучком в слабодиффундирующем магнитном поле. (Здесь и в дальнейшем приняты следующие обозначения: энергия и ток электронов W_e, I_e , начальный внешний / внутренний радиус электронного пучка $r_{e,out} / r_{e,in}$, энергия ионных W_i , ток ионов I_i , начальный радиус ионного пучка r_{i0} , начальный угол ионного пучка α_{i0} , распределение магнитного поля на оси $H(z)$, координата инжекции протонов z_i). Видно, что на сжатие протонного пучка влияет модуляция электронного пучка по радиусу, степень которой зависит от соотношения электронной плотности и напряженности магнитного поля (то есть отношения плазменной и циклотронной частот: ω_0 / ω_H). Наблюдаемый период пространственной модуляции электронного пучка (d) соответствует соотношению $d=2\pi v / \omega_H$, где v – продольная скорость электронного пучка. Здесь следует обратить внимание на существенное радиальное раскачивание даже слабодиффундирующего протонного пучка при увеличении тока электронного пучка вследствие роста радиальной модуляции последнего (см. рис.1,2). На рис.3 показано, что радиальную модуляцию протонного пучка можно уменьшить за счет увеличения ведущего магнитного поля (при этом уменьшается радиальная модуляция электронного пучка). Кроме того, путем подбора параметров электронного и ионного пучков можно найти режим, когда радиусы этих пучков изменяются в противофазе. При этом увеличению радиуса ионного пучка противопоставляется уменьшение радиуса электронного пучка и, соответственно, увеличение фокусирующей силы. В этом случае на протяжении нескольких периодов возможно получить существенное уменьшение колебаний ионного пучка. При этом можно достаточно хорошо, до 1...2 мм, сжать сильный протонный пучок (см. рис. 4 и ниже рис. 9).

На рис. 5,6 показано, что уменьшения радиальной модуляции протонного пучка можно достичь путем увеличения его начального радиуса (радиуса инжекции) благодаря уменьшению взаимного кулоновского расталкивания протонов и угла их влета в электронный пучок. На рис. 6 представлен случай хорошей фокусировки протонного пучка с током 300 мА, радиус которого на входе в ускоритель около 1 мм. Однако, при этом часть электронного пучка попадает на протонный инжектор.

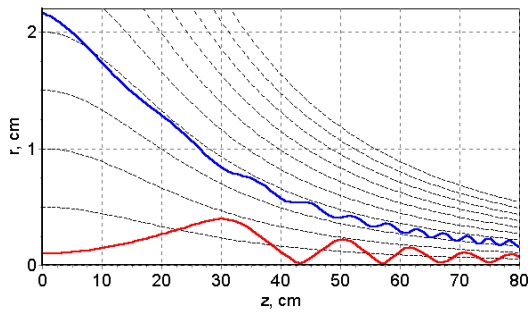


Рис. 1. $W_e=100$ кэВ, $I_e=40$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм; $W_i=100$ кэВ, $I_i=5$ мА, $r_{i0}=1$ мм, $\alpha_{i0}=0^\circ$, $z_i=0$ см, $H(z)=235+0.3z^2$ [Э, см]

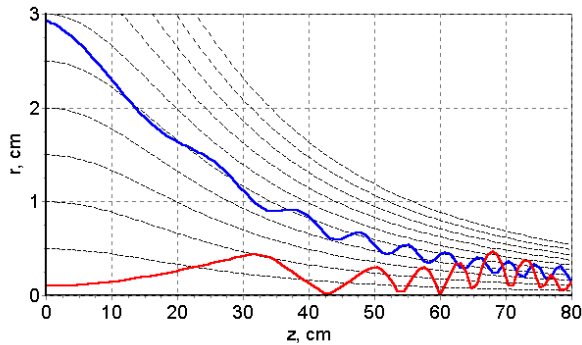


Рис. 2. $W_e=100$ кэВ, $I_e=100$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм; $W_i=100$ кэВ, $I_i=5$ мА, $r_{i0}=1$ мм, $\alpha_{i0}=0^\circ$, $z_i=0$ см, $H(z)=235+0.3z^2$ [Э, см]

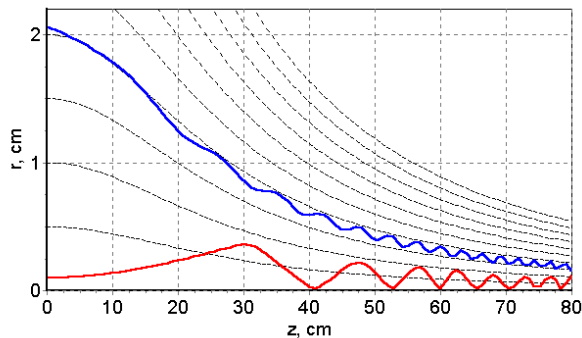


Рис. 3. $W_e=100$ кэВ, $I_e=100$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм; $W_i=100$ кэВ, $I_i=4$ мА, $r_{i0}=1$ мм, $\alpha_{i0}=0^\circ$, $z_i=0$ см, $H(z)=352.5+0.45z^2$ [Э, см]

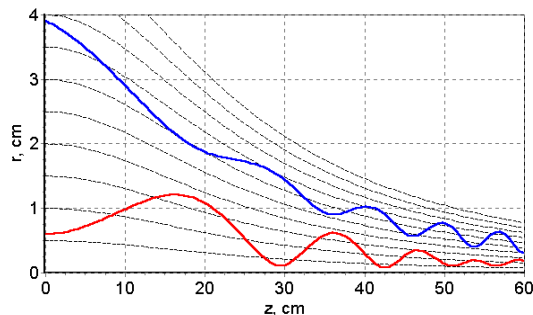


Рис. 4. $W_e=100$ кэВ, $I_e=160$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм; $W_i=100$ кэВ, $I_i=400$ мА, $r_{i0}=5$ мм, $\alpha_{i0}=0^\circ$, $z_i=0$ см, $H(z)=235+0.3z^2$ [Э, см]

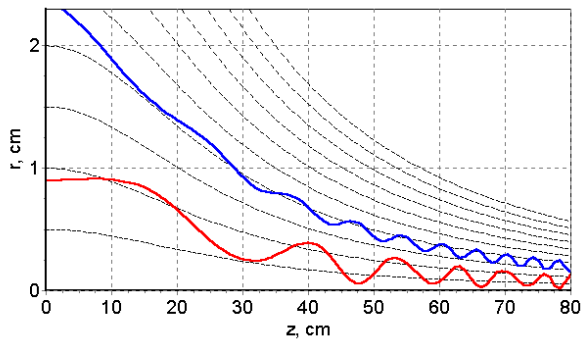


Рис. 5. $W_e=100$ кэВ, $I_e=60$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм; $W_i=100$ кэВ, $I_i=100$ мА, $r_{i0}=9$ мм, $\alpha_{i0}=0^\circ$, $z_i=0$ см, $H(z)=230+0.28z^2$ [Э, см]

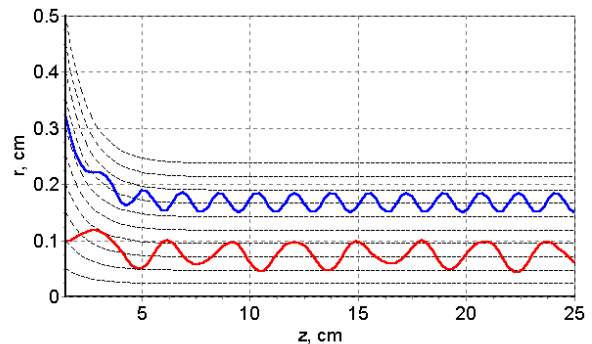


Рис. 8. $W_e=120$ кэВ, $I_e=120$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм; $W_i=100$ кэВ, $I_i=300$ мА, $r_{i0}=1$ мм, $\alpha_{i0}=0^\circ$, $z_i=1.5$ см, $H(z)=4 \cdot 10^3 \text{erf}(0.3 z)$

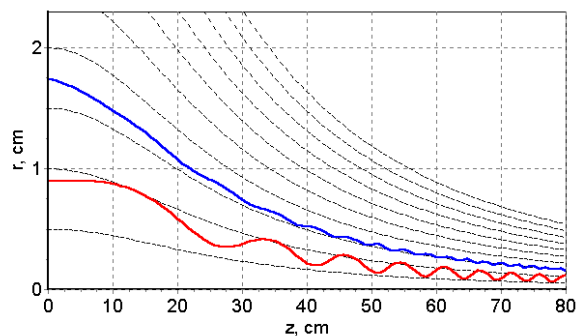


Рис. 6. $W_e=100$ кэВ, $I_e=60$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм; $W_i=100$ кэВ, $I_i=300$ мА, $r_{i0}=9$ мм, $\alpha_{i0}=0^\circ$, $z_i=0$ см, $H(z)=352.5+0.45z^2$ [Э, см]

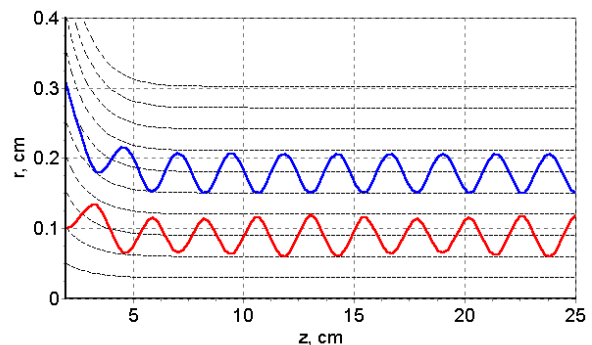


Рис. 9. $W_e=120$ кэВ, $I_e=120$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм, $W_i=100$ кэВ, $I_i=500$ мА, $r_{i0}=1$ мм, $\alpha_{i0}=0^\circ$, $z_i=2$ см, $H(z)=3 \cdot 10^3 \text{erf}(0.3 z)$

На рис. 7-9 показаны результаты численного моделирования фокусировки нескомпенсированного протонного пучка встречным электронным пучком в сильно расходящемся магнитном поле, которое в эксперименте предполагается создавать с помощью встречно включенных соленоидов, а в данном случае его пространственное распределение формально моделируется функцией ошибок. Показано, что при увеличении крутизны магнитных силовых линий, приближении инжектора к месту резкого увеличения крутизны этих линий, увеличении магнитного поля, а также при пространственном резонансе пучков (см. рис.9 и ранее рис.4) можно добиться на входе в ускоряющую секцию минимального радиуса протонного пучка около 1 мм при его токе 150...500 мА.

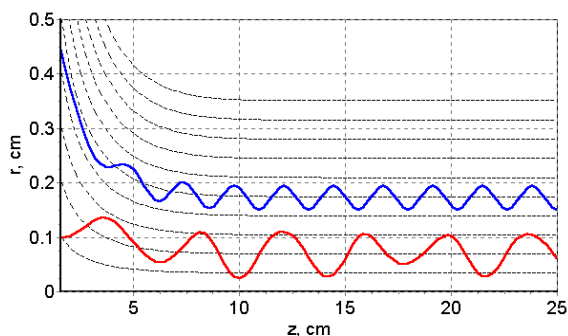


Рис. 7. $W_e=120$ кэВ, $I_e=80$ А, $r_{e,out}=1.5$ мм, $r_{e,in}=0.5$ мм, $W_i=100$ кэВ, $I_i=150$ мА, $r_{i0}=1$ мм, $z_i=1.5$ см, $H(z)=3 \cdot 10^3 \text{erf}(0.2 z)$

ЛИТЕРАТУРА

1. Proc. CERN Accelerator School: Cyclotrons, Linacs and their Applications. Ed. S.Turner. Geneva, CERN 96-02, 1996.
2. Н.А. Хижняк. Пути создания безопасной, экологически чистой ядерной энергетики в Украине: Препринт ХФТИ 94-8, Харьков, 1994, 22 с.
3. C. Rubbia, J.A. Rubio, S. Buono e.a. Conceptual design of a fast neutron operated high power energy amplifier // CERN/AT/95-44 (ET), Geneva, 1995.
4. Н.В. Лазарев, А.М. Козодаев // Атомная энергия. 2000, т.89, с.440-446.
5. В.А. Бомко, И.М. Карнаухов, В.И. Лапшин. Усилитель мощности – основа ядерной энергетики XXI века (обзор): Препринт НИЦ ХФТИ, Харьков, 2001, 52 с.
6. Я.Б. Файнберг // Теория и расчет линейных ускорителей. М.: «Госатомиздат», 1962, с.19-37, с.333-346.
7. Я.Б. Файнберг // УФН. 1967, т.93, с.617-631.
8. В.П. Индыкул, И.П. Панченко, В.Д. Шапиро, В.И. Шевченко // Физика плазмы. 1976, т.2, с. 775-785.
9. В.И. Ivanov, D.V. Gorozhanin, V.A. Miroshnichenko, V.P. Prishchepov // Proc. of 3rd Intern. Conf. on High Power Beams, Novosibirsk, 1979, v.1, p.327-332.
10. В.И. Ivanov, V.I. Butenko, A.M. Egorov e.a. // AIP Conf. Proc. 1995, No. 335, p.429-450.

11. В.И. Бутенко, А.М. Егоров, Б.И. Иванов и др. // *Физика плазмы*. 1997, т. 23, № 4, с.359-365.
12. В.И. Бутенко, Б.И. Иванов // *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: «Ядерно-физические исследования»*, 1997, вып. 4,5 (31,32), с.140-142.
13. А.И. Ахиезер, Г.Я. Любарский, Я.Б. Файнберг // *Теория и расчет линейных ускорителей*. М.: «Госатомиздат», 1962, с.131-146.
14. D.R. Chick, D.P.R. Petrie. The helix as a linear accelerator for protons // *Nature*. 1951, v.168, № 4279, p.782-783.
15. Н.И. Абраменко, Н.М. Гаврилов, Е.В. Громов и др. // *Вопросы атомной науки и техники*. 1985, вып. 2(23), с.48-50.
16. Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика // *Вопросы атомной науки и техники*. 2003, №4, с.81-83.
17. Б.И. Иванов // *Вопросы атомной науки и техники*. 1999, №4, с.81-83.
18. Н.М. Гаврилов, Е.В. Громов, В.А. Краснополяский и др. // *Ускорители*. 1976, вып. XV, с.58-61.
19. О.Я. Савченко // *Труды II Всесоюз. совещ. по ускорителям заряженных частиц*. М.: «Наука», 1972, ч.1, с.128.
20. Г.И. Димов Ю.Г. Кононенко, О.Я. Савченко, В.Г. Шаповаловский // *ЖТФ*. 1968, т.38, вып.6, с.997-1004.
21. В.И. Баткин, В.Н. Гетманов, О.Я. Савченко // *ПТЭ*. 1984, № 1, с.44-48.

SIMULTANEOUS INJECTION OF HIGH-CURRENT PROTON AND ELECTRON BEAMS INTO LINEAR ACCELERATOR

V.I. Butenko, B.I. Ivanov, N.G. Shulika

Computer simulation of injection of the proton beam with current up to 500 mA into a linear accelerator with the use of electromagnetic focusing by a counter magnetized intense electron beam is considered. The dynamics of the electron and proton beams in the region of the proton beam injection into the accelerator is investigated. It is allowed to compress the proton beam at the entrance of the accelerator down to radius up to 1 mm.

ОДНОЧАСНА ІНЖЕКЦІЯ В ЛІНІЙНИЙ ПРИСКОРЮВАЧ СИЛЬНОСТРУМОВИХ ПРОТОННОГО ТА ЕЛЕКТРОННОГО ПУЧКІВ

В.І. Бутенко, Б.І. Іванов, М.Г. Шуліка

З використанням комп'ютерного моделювання розглядається інжекція протонного пучка із струмом до 500 мА в лінійний прискорювач із застосуванням електромагнітного фокусування зустрічним замагніченим інтенсивним електронним пучком. Досліджується динаміка електронного і протонного пучків в області інжекції протонного пучка в прискорювач. Отримано стискання протонного пучка на вході в прискорювач до радіуса до 1 мм.