

# КОНЦЕПЦИЯ НАЧАЛЬНОЙ ЧАСТИ ЛИНЕЙНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПРОТОННОГО УСКОРИТЕЛЯ С ФОКУСИРОВКОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

*Б.И. Иванов, Н.Г. Шулика*

*ННЦ ХФТИ, Академическая ул., 1, г. Харьков, 61108, Украина  
ivanovbi@kipt.kharkov.ua*

С помощью компьютерного моделирования исследуется ускорение протонов с током 0.1–1 А, энергией до 5.5 МэВ. При этом параметры фокусирующего электронного пучка меняются в пределах: ток 15–200 А, энергия 100–150 кэВ, напряженность фокусирующего магнитного поля 0.8–2.2 кЭ. Коэффициент захвата протонов в ускорение достигает 99 %. После ускорения в первой секции с фокусировкой электронным пучком до энергии 2.5 МэВ протоны ускоряются во второй секции с модифицированной переменнo-фазовой фокусировкой до энергии 5.5 МэВ. Обсуждается возможность рекуперации электронного пучка с КПД свыше 90 %.

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Современные ускорители интенсивных ионных пучков находят все большее применение для решения прикладных задач в области энергетики, экологии, новых технологий, медицины и др. (см., например, [1-4]).

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 [5]. Этот недостаток может быть преодолен в коллективных ускорителях (например, в плазменных волноводах [6,7], двухпучковых электронно-ионных ускорителях [8-12] и др.), в которых ускорение частиц производится объемными электромагнитными волнами, что обуславливает одновременную радиальную и фазовую устойчивость ускоряемого ионного пучка [6]. Кроме того, в двухпучковых ускорителях существенную роль играет фокусировка ионов кулоновским полем электронного пучка. Компьютерное моделирование фокусировки протонов для одного из двухпучковых ускорителей выполнено в работах [11,12]. Показана возможность ускорения протонов с током несколько ампер [8,11,12].

[В настоящее время в большинстве сооружаемых и проектируемых мощных ионных ускорителей начальная часть (НЧУ) основана на структуре ПОКФ (RFQ) [3,13-15], позволяющей ускорять протоны от 100 кэВ до нескольких микроэлектронвольт при непрерывном токе до 100 мА и коэффициенте захвата близком к 100 % (как в недавно запущенном ускорителе LEDA, Лос-Аламос [3]). Следует отметить, что сооружение RFQ ускорителей требует высокой технической оснащенности, большого опыта и значительных затрат [3].

Кроме этого, в МРТИ предложена [20] и экспериментально опробована [21] НЧУ с радиальной фокусировкой протонов сверхсильным магнитным полем, создаваемым сверхпроводящим соленоидом (получены протоны со средней энергией 1.5 МэВ, импульсным током 400 мА, длительностью до 70 мкс, частотой посылок 1 Гц). На этой основе разработан проект ускорителя на 1 ГэВ, 250 мА [22].

В ФТИ АН УССР (ныне ННЦ ХФТИ) теоретически рассматривался другой способ фокусировки – с помощью электронного пучка, пропускаемого через ускоритель навстречу пучку ускоряемых протонов [23] (на возможность такого метода указал в 1948 г. К.Д. Синельников). Экспериментально метод фокусировки электронным пучком опробован в МИФИ [24]. При энергии и токе электронного пучка 70 кэВ и 18 А получены протоны с энергией 0.5-1.2 МэВ, током 3 мА длительностью 70 мкс, частотой посылок 1 Гц.

Настоящая работа посвящена исследованию с помощью компьютерного моделирования возможности создания линейных ускорителей ионов с током до 1 А с применением радиальной фокусировки электронным пучком в 1-й секции и переменнo-фазовой фокусировки во 2-й. При этом отправной точкой явились работы [16,23], а также цикл экспериментальных и теоретических работ по модифицированной переменнo-фазовой фокусировке (см., например, [17-19]).

## 2. УСКОРЕНИЕ В СЕКЦИИ С ФОКУСИРОВКОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

В качестве ускоряющей структуры выбран Пн-резонатор с трубками дрейфа, укрепленными на плоских гребенчатых подвесках (пример такой структуры показан на рис. 1).

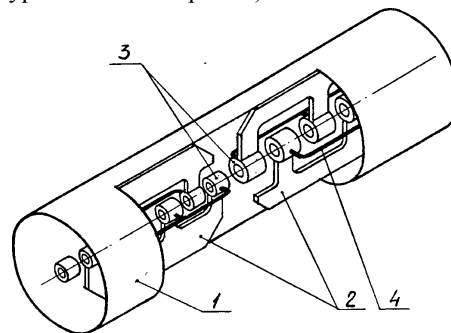


Рис. 1. Ускоряющая структура: 1–корпус, 2–подвески трубок дрейфа, 3– трубки дрейфа, 4–стабилизирующие нити

Для крепления трубок дрейфа использовались две пары подвесок. Первая пара подвесок объединя-

ла шесть периодов ускорения. На второй паре располагалось 112 периодов. Зазоры между электродами в первой паре составляли 4 мм, высокочастотные напряжения 32 кВ, зазоры между электродами второй пары подвесок 7 мм, напряжение между электродами 64 кВ. Диаметр пролетного канала 14 мм, диаметр резонатора 0.20 м, его длина 4.75 м. Рабочая частота 152.5 МГц. Энергия инжекции 0.1 МэВ, энергия на выходе 2.5 МэВ.

Математическое моделирование процесса движения пучка в канале ускорителя выполнялось с учетом кулоновского взаимодействия ускоряемых протонов. Использовался метод крупных частиц с кулоновской сеткой  $64 \times 32 \times 32$ ; количество частиц 10 000. Характеристики электронного пучка: энергия 100 кэВ, ток  $I=15\text{--}200$  А, внешний радиус пучка  $r_0=3$  мм, внутренний  $r_1=1.5$  мм (трубчатый пучок). Для удержания электронного пучка с током 100 А и радиусом 3 мм необходимо продольное магнитное поле величиной  $H=0,15$  Тл в соответствии с формулой [25]:

$$H = \frac{46.5}{r_0} \sqrt{\frac{I}{\sqrt{V_0}}},$$

где  $I$  – в мА,  $V_0$  – в кВ,  $r_0$  – в мм.

В процессе моделирования применялись следующие выражения для радиального электрического поля, создаваемого электронным пучком:

$$\text{при } r \leq r_1 \quad E_r = 0,$$

$$\text{при } r_1 \leq r \leq r_0 \quad E_r = -\frac{I}{2\pi\epsilon_0 c \beta r} \frac{r^2 - r_1^2}{r_0^2 - r_1^2},$$

$$\text{при } r_0 \leq r \quad E_r = -\frac{I}{2\pi\epsilon_0 c \beta r},$$

где  $\epsilon_0$  – диэлектрическая постоянная вакуума,  $\beta=v/c$ .

Результаты моделирования ускорения протонов в секции с фокусировкой электронным пучком представлены на рис. 2 и 3.

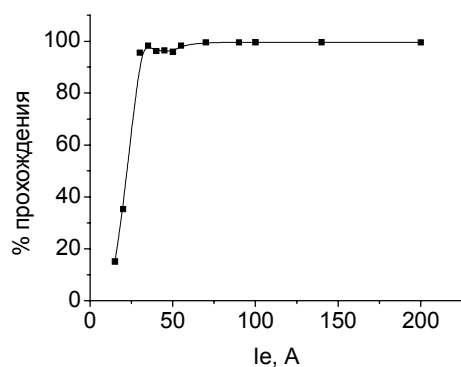


Рис. 2

На рис. 2 изображена зависимость прохождения (в процентах) слаботокового протонного пучка через первую секцию от тока фокусирующего электронного пучка, откуда видно, что при среднем темпе ускорения около 0.5 МэВ/м полная компенсация дефокусирующего действия ВЧ поля достигается при токе электронного пучка 30 А. Следует отметить, что в работе [24] при среднем темпе ускорения свыше 1 МэВ/м ток фокусирующего электронного пучка составлял всего 18 А, что, по-видимому, не-

достаточно для полного устранения дефокусирующего действия ВЧ поля и поэтому обусловило малый ускоренный ток протонов.

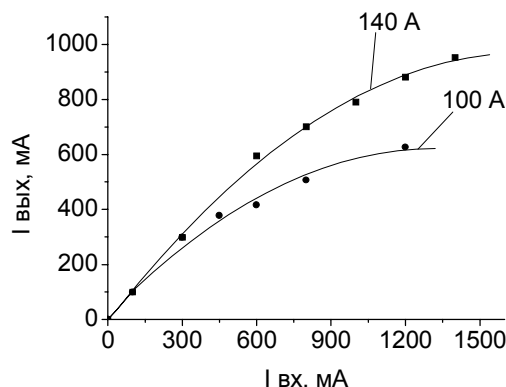


Рис. 3

Для фокусировки сильноточного протонного пучка требуется гораздо больший ток. На рис. 3 показаны зависимости ускоренного тока протонов на выходе от тока протонов на входе для двух значений фокусирующего электронного тока: 100 и 140 А. Из этого рисунка видно, что при фокусирующем электронном токе 100 А практически без потерь можно ускорить 300 мА протонного тока, а при фокусирующем электронном токе 140 А без потерь ускоряется 600 мА протонов.

### 3. УСКОРЕНИЕ В СЕКЦИИ С ПЕРЕМЕННО-ФАЗОВОЙ ФОКУСИРОВКОЙ

Ускоряющая структура для модифицированной переменнo-фазовой фокусировки аналогична (резонатор с трубками дрейфа, укрепленными на двух парах подвесок). В состав секции входят 23 периода ускорения. На первой паре подвесок размещены 7 периодов. Длина зазора между электродами 3.5 см. Высокочастотное напряжение составляет 402.5 кВ. На второй паре подвесок размещено 16 периодов. Длина зазора между электродами составляет 4.5 см, ВЧ напряжение 517.5 кВ. Радиус апертуры плавно увеличивается от 1.5 до 2.5 см. Энергия на входе 2.5 МэВ, на выходе 5.5 МэВ. Длина резонатора 2.6 м, диаметр 35 см.

Распределение синхронной фазы  $\varphi_s$  (в градусах) по периодам ускорения  $N$  показано в таблице 1.

N	1	2	3	4	5	6	7	8
$\varphi_s$	-90	-87	51.1	51.3	51.0	51.3	-85	-87

N	9	10	11	12	13	14	15	16
$\varphi_s$	-85	55.8	55.9	54.1	53.6	-80	-80.5	-84.4

N	17	18	19	20	21	22	23	
$\varphi_s$	54	53.8	54	54	-80	-80	-81.5	

Результаты моделирования на рис. 4 показывают зависимость выходного тока протонов с энергией 5.5 МэВ от входного тока с энергией 2.5 МэВ, откуда видно, что вплоть до тока 800 мА модифицированная переменнo-фазовая фокусировка позволяет практически полностью (99.8 %) захватить пучок,

вышедший из секции с фокусировкой электронным пучком, и ускорить его до энергии 5.5 МэВ.

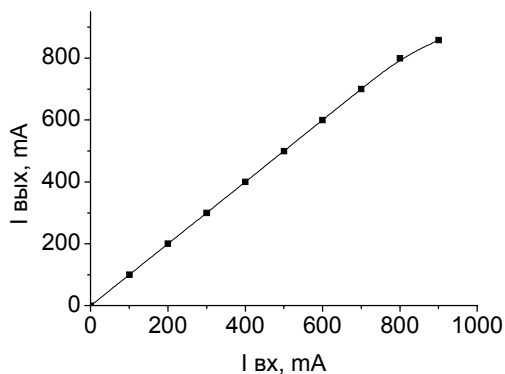


Рис. 4

#### 4. НЕКОТОРЫЕ ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С ФОКУСИРОВКОЙ ИОНОВ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ

Для создания НЧУ с высокой средней мощностью ионного пучка (10 – 100 кВт) требуется поставить и решить ряд научных и технических задач.

Нельзя допускать компенсацию электронного пучка ионами, возникающими при ионизации остаточного газа. Известно, что при энергии электронного пучка 100 кэВ, токе 100 А, длительности 300 мкс компенсацией можно пренебречь, если давление остаточного газа  $<10^{-7}$  Торр (см. [26], §28). При этом следует принять меры по ограничению потока газа из источника ионов в ускоритель (например, импульсный напуск газа, увеличение КПД использования газа, механический обтюратор, увеличение расстояния между источником и ускорителем). От этих факторов зависит величина скважности работы ускорителя.

Как инжектировать ионный пучок с током 1 А в ускоряющий канал диаметром несколько миллиметров. Для этого предполагается использовать встречный электронный пучок (тот же самый, что инжектируется в ускоритель навстречу ионам для их фокусировки). Зарядово-токовая (другими словами, электромагнитная) компрессия ионного пучка электронным пучком в профилированном магнитном поле (см. [27], раздел 2.4), как мы полагаем, позволит решить этот вопрос.

Сдвиг частоты резонатора, вызываемый сильноточным электронным пучком, ожидается значительным. Поэтому необходима подстройка начальной частоты резонатора, с тем чтобы частота нагруженного пучком резонатора совпала с расчетной (в данном случае 152.5 МГц).

Низкая добротность резонатора за счет нагрузки его ускоряемым ионным пучком требует особого подхода для согласования его с ВЧ генераторами мощностью порядка мегаватт. При этом, в частности, возможно использование генераторов на лампах типа ГИ-50А.

Возможные когерентные неустойчивости электронно-ионных пучков и меры по их устранению достаточно хорошо изучены, см., например, [7,26,28,29]. В частности, следует уделить внимание диокотронной неустойчивости и неустойчивости

Кошкарева-Зенкевича [30]. Факторы, препятствующие развитию неустойчивостей: сильное "стороннее" (в данном случае – ускоряющее) ВЧ поле, мешающее банчировке частиц на частотах неустойчивостей [7], а также значительная неоднородность системы в продольном направлении [8]. В частности, показано [8], что в достаточно неоднородной системе, включающей электронный и ионный пучки, модуляционная неустойчивость, а также (как проверено впоследствии) неустойчивость Кошкарева-Зенкевича не развиваются. Другие способы борьбы с неустойчивостями перечислены в [29, с. 284]. Подавление диокотронных неустойчивостей экспериментально изучалось в [32,33].

*Рекуперация электронного пучка.* Как видно из приведенных во втором разделе расчетов, электронный пучок несет импульсную мощность до 14 МВт. Эту мощность нужно рекуперировать либо, в некоторых вариантах, использовать для генерации вторичного излучения. При рекуперации моноэнергетического пучка важно добиться предотвращения вылета вторичных электронов из рекуператора (различные способы описаны в [28]). В экспериментальных работах получено: для импульсного электронного пучка (с параметрами 100 кэВ, 25 А) эффективность рекуперации 98 % [34]; для непрерывного электронного пучка (100 кэВ, 1 А) эффективность рекуперации 98.6 % [35]. Для рекуперации немоноэнергетических пучков в СВЧ приборах применяют многоступенчатые рекуператоры [36-39]. При этом удается получить эффективность рекуперации 80 – 95 %. Отметим, что в нашем случае следует добиваться минимального энергетического разброса электронов пучка на входе в рекуператор. Кроме того, следует обеспечить прохождение пучка через систему близкое к 100 %. В частности, в работе [40] доля рекуперированной мощности в системе фокусировки ионного пучка (в отсутствие ВЧ колебаний) составляла 70 %, при этом 27 % были обусловлены несовершенством пушки и оптической системы и только 3 % терялось в рекуператоре.

*Наведенная активность.* Довольно очевидно, что на линейном участке зависимости потерь от тока ускоряемого пучка наведенная на стенках активность будет пропорциональна среднему, а не импульсному

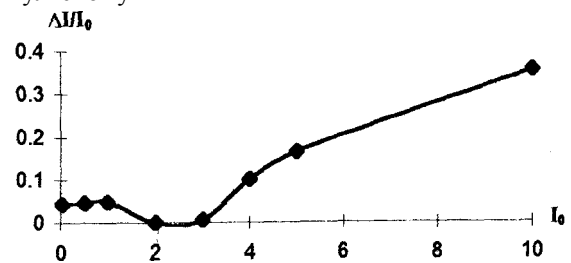


Рис. 5

току протонов. В качестве примера на рис. 5, взятом из работы [12], приведены результаты расчета относительных потерь протонов  $\Delta I/I_0$  в зависимости от ускоряемого импульсного тока  $I_0$  (речь идет о секции двухпучкового электронно-ионного ускорителя с входной энергией протонов 5 МэВ и выходной

8 МэВ [10,11]). Как видим, до тока протонов 3 А потери пучка не растут, а дальше их рост вплоть до тока 10 А можно аппроксимировать линейной функцией от  $I_0$ .

На этом участке усредненные по времени потери пропорциональны усредненному по времени току частиц.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

С помощью компьютерного моделирования показано, что НЧУ с фокусировкой электронным пучком может обеспечить на выходе протонный пучок с током порядка ампера и энергией несколько мегаэлектронвольт, а последующие секции способны ускорить этот ток до больших энергий. При этом возможно существенное увеличение КПД ускорения (с учетом затрат на фокусировку), поскольку при таком большом импульсном токе мощность ВЧ потерь в резонаторах значительно меньше мощности, идущей на ускорение протонного пучка. Предлагаемая концепция представляется перспективной для применения мощных протонных ускорителей с целью решения важных прикладных задач, в том числе указанных в [1-4].

Авторы благодарят Я.Б. Файнберга и А.М. Егорова за интерес к работе и полезные замечания.

## ЛИТЕРАТУРА

1. *Proc. CERN Accelerator School: Cyclotrons, Linacs and their Applications*. Ed. S.Turner. Geneva, CERN 96-02, 1996.
2. 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.
3. Н.В. Лазарев, А.М. Козодаев // *Атомная энергия*. 2000, т. 89, с. 440-446.
4. В.А. Бомко, И.М. Карнаухов, В.И. Лапшин. Усилитель мощности – основа ядерной энергетики XXI века (обзор): *Препринт ННЦ ХФТИ*, Харьков, 2001, 52 с.
5. Я.Б. Файнберг // *Теория и расчет линейных ускорителей*. М.: Госатомиздат, 1962, с. 19-37.
6. Я.Б. Файнберг // *ibid*, с. 333-346; *Атомная энергия*, 1959, т. 6, с. 431-441; [16], р. 84-90.
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 et al. // *AIP Conf. Proc.* 1995, №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. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 1997, вып. 4(31), 5(32), с. 140-142.
13. И.М. Капчинский, В.А. Тепляков // *ПТЭ*. 1970, №2, с. 19-21; *ПТЭ*. 1970, №4, с. 17-19.
14. И.М. Капчинский // *УФН*. 1980, т. 132, с. 639-661.
15. В.А. Тепляков // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 1992, вып. 4(25), с. 27-29.
16. Ya.V. Fainberg // *CERN Symposium on High Energy Accelerators*, Geneva, 1956, v. 1, p. 91-100; [5], с. 161-173.
17. В.В. Кушин // *Атомная энергия*. 1970, т. 29, с. 123.
18. В.Г. Папкович, Н.А. Хижняк, Н.Г. Шулика // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 1978, вып. 2(2), с. 51-54.
19. P.O. Demchenko, E.V. Gussev, M.G. Shulika // *Problems of Atomic Science and Technology. Ser. "Nuclear Physics Investigations" (40)*. 2003, №2, p. 138-143.
20. Б.И. Бондарев, А.А. Кузьмин, Б.П. Мурин и др. // *Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц*. Т. 1, Дубна, 1979 с. 260-263.
21. В.М. Пироженко, О.В. Плинк // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 1989, вып. 6(6), с. 30-32.
22. Г.И. Бацких, Б.П. Мурин, И.В. Чувило и др. // *Совещание по ускорителям заряженных частиц*. Т. 1, Протвино, 1999 с. 203-211.
23. А.И. Ахиезер, Г.Я. Любарский, Я.Б. Файнберг // *Теория и расчет линейных ускорителей*. М.: Госатомиздат, 1962 с. 131-146
24. Н.И. Абраменко, Н.М. Гаврилов, Е.В. Громов и др. // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"*. 1985, вып. 2(23), с. 48-50.
25. Н.С. Зинченко. *Курс лекций по электронной оптике*. Харьков: Издательство ХГУ, 1961, 362 с.
26. И.Н. Мешков. *Транспортировка пучков заряженных частиц*. Новосибирск: Наука, 1991, 223 с.
27. Б.И. Иванов // *Вопросы атомной науки и техники. Серия "Ядерно-физические исследования"* (30). 1999, №4, с. 81-83.
28. Е.А. Абрамян, Б.А. Альтеркоп, Г.Д. Кулешов. *Интенсивные электронные пучки*. М.: Энергоатомиздат, 1984, 231 с.
29. А.Н. Лебедев, А.В. Шальнов. *Основы физики и техники ускорителей*. М.: Энергоатомиздат. 1991, 528 с.
30. D.G. Koshkarev, P.R. Zenkevich // *Particle Accelerators*. 1972, v. 3, №1, p. 1-9.
31. В.С. Иванов, С.И. Кременцов, М.Д. Райзер и др. / *Физика плазмы*. 1981, т. 7, с. 784-789.
32. И.Н. Мешков, А.Н. Шарара, А.В. Шемякин // *ПТЭ*. 1984, №6, с. 141-143.
33. П.С. Стрелков, А.В. Федотов, А.Г. Шкварунец // *ЖТФ*. 1987, т. 57, с. 375-377.
34. Е.А. Абрамян, А.Н. Шарара // *ПТЭ*. 1971, №2, с. 30-32.
35. А.И. Арэнштам, И.Н. Мешков, В.Г. Пономаренко и др. // *ЖТФ*. 1971, т. 41, №2, с. 336-339.
36. Г.Дж. Космал // *ТИИЭР*. 1982, т. 70, №11, с. 93-99
37. Г.В. Кальман, Ю.И. Рубинштейн // *Электроника. Итоги науки и техники*. т. 17. М., 1985, с. 310-376.
38. W. Neugebauer, T.G. Mihran // *IEEE Transaction*. 1972, v. ED-19, p. 111-121.
39. А.Н. Антонов, О.Ф. Ковпик, Е.А. Корнилов, В.Г. Свиченский // *Успехи современной радиоэлектроники*. 2002, №5, с. 51-61.
40. Н.И. Абраменко, Н.М. Гаврилов, Е.В. Громов и др. // *Известия ВУЗов, Физика*. 1983, №5, с. 68-71.

