

Предложения по созданию начальной части ускорителя непрерывного режима

А.Ж. Атачкин, О.К. Беляев, В.Е. Бородин, И.А. Грушичев, О.В. Ершов, А.В. Жеребцов,
И.Г. Мальцев, В.Б. Степанов, В.А. Тепляков

ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, Протвино, Россия

В начале 90-х годов в который раз вновь возник интерес к сильноточным линейным ускорителям протонов на энергию до 1 ГэВ и выше. Эти ускорители предназначаются для работы в составе АЭС, трансмутации отходов АЭС, производства трития и плутония.

Проработки таких ускорителей ведутся в США, Японии, Европе и в России. Начальная часть ускорителя (НЧУ) на энергию от примерно 100 КэВ до нескольких МэВ представляется реализуемой уже сегодня. Так в Канаде [1], а затем в США [2] были созданы установки непрерывного режима и продемонстрировано их кратковременное функционирование при параметрах, близких к ожидаемым.

В ГНЦ ИФВЭ на основании опыта создания импульсных ускорителей [3,4,5,6] и проверки работы их отдельных компонентов в непрерывном режиме рассмотрена возможность создания НЧУ протонов непрерывного режима на базе структуры с пространственно-однородной квадрупольно фокусировкой (ПОКФ или RFQ) со следующими параметрами: выходная энергия – 5 МэВ, ток пучка до 40 мА, рабочая частота – 297 МГц. НЧУ предназначена для работы в составе ускорителя для АЭС, проектируемого ИТЭФ и МРТИ.

Основные требования, предъявляемые к такой НЧУ: высокое качество пучка (эмиттанс пучка не более $1\pi \cdot \text{мм} \cdot \text{мрад}$), надежность и большой ресурс работы. Для реализации этих требований в условиях значительных ($\sim 100 \text{ кВт/м}^2$) тепловых нагрузок на элементы ускорителя необходимо рассмотреть вопросы электропрочности ускоряющей структуры, динамики частиц, электродинамики резонаторов, тепловых деформаций и организации системы ВЧ-питания.

Электрическая прочность должна обеспечивать минимальное число пробоев в системе электродов при рабочей напряженности электрического поля E . Напряженность ограничена снизу уменьшением предельного тока пучка, а сверху – увеличением числа электрических пробоев и возникновением электронной нагрузки [7]. Величину E принято выражать в единицах критерия Киллпатрика E_k [8]:

$$E = kE_k, \quad k \geq 1. \quad (1)$$

Из опыта эксплуатации ускорителей следует, что

$$\begin{aligned} k > 1,8 & \quad \text{– для импульсного режима,} \\ k = 1,6 \div 1,8 & \quad \text{– для непрерывного режима.} \end{aligned} \quad (2)$$

Максимальное значение k , при котором обеспечивается устойчивая работа ускорителя, определяется состоянием поверхности электродов, которое характеризуется наличием электронной нагрузки и уровнем рентгеновского излучения в резонаторах ускорителя [7].

Проведенные на ускорителях с ВЧК-фокусировкой измерения параметров электронной нагрузки, рентгеновского излучения и анализ полученных результатов позволили разработать методику очистки и поддержания высокого качества поверхности электродов при работе ускорителя. Применение этой методики привело к увеличению максимальной напряженности поля на поверхности электродов почти на 80%. Экспериментально полученное значение максимальной напряженности на электродах структуры с ПОКФ при работе в импульсном режиме при вакууме $5 \cdot 10^{-8}$ Торр составило $3,4 E_k$ [7].

Принимая во внимание (2) и достигнутое максимальное значение, можно выбрать рабочую напряженность поля E на поверхности электродов в создаваемом ускорителе $\leq 1,8E_k$.

В разрабатываемой НЧУ предлагается изменение формы модуляции электродов от синусоидальной в начале до трапецеидальной в конце ускорителя. Это увеличивает темп ускорения [9]. Увеличение темпа не только уменьшает длину структуры, но и обеспечивает условия согласования пучка по продольному движению с последующей ускоряющей секцией. Это особенно важно для ускорителя непрерывного режима так как уменьшает рост продольного эмиттанса.

Задание величины E и выбор формы модуляции электродов позволяет провести расчет параметров ускоряющей структуры. Выбор энергии инжекции W_0 обусловлен противоположными требованиями. С одной стороны, для повышения надежности работы ионной пушки в непрерывном режиме энергия W_0 должна быть минимальной. С другой, – при уменьшении W_0 уменьшается максимальный ток пучка, что при сохранении

величины рабочего тока приводит к росту поперечного эмиттанса. На рис. 1 приведена зависимость средне-квадратичного поперечного эмиттанса на выходе ускорителя от энергии инжекции при токе пучка 50 мА. Из графика следует, что при $W_0 < 80$ КэВ наблюдается увеличение роста эмиттанса. На основании полученных данных были проведены расчет параметров и оптимизация геометрии ускоряюще-фокусирующего канала по методике, разработанной в ИФВЭ. Результаты приведены на рис. 2 и в табл. 1.

ВЧ-напряжение на электродах ускоряющей структуры создается с помощью резонатора. В данном случае это может быть 4К- или 2Н-резонатор. Основным критерием выбора типа резонатора при работе в непрерывном режиме является возможность обеспечения стабильности поля ускоряюще-фокусирующего канала при значительных тепловых нагрузках.

В силу симметрии камер в 4К-резонаторе низшие типы дипольных колебаний близки по частоте к низшему квадрупольному (рабочему) типу. Относительная расстройка $\sim 10^{-3}$ [10, 11, 12]. Для устранения влияния дипольных типов в резонатор вводятся такие устройства как связывающие кольца, резонансные или стабилизирующие петли, что ухудшает радиотехнические параметры резонатора на рабочем типе колебаний. 2Н-резонатор является разноконтурным 4К-резонатором. Разноконтурность приводит к увеличению относительной частотной расстройки между рабочим и ближайшим к нему колебанием до величины $\sim 10^{-2}$. Таким образом, 2Н-резонатор не требует введения в свою конструкцию дополнительных устройств для стабилизации распределения поля, ухудшающих его радиотехнические параметры. Указанные свойства в совокупности с технологичностью изготовления дают основание для рассмотрения возможности применения 2Н-резонатора в ускорителе непрерывного режима.

На рис. 3 показано поперечное сечение 2Н-резонатора, в табл. 2 – его параметры, рассчитанные в двумерном приближении с помощью пакета программ PRUD-0 [13].

Таблица 1.

Таблица 2.

Параметры	Величина	Параметры	Величина
Энергия инжекции, $W_{инж}$, МэВ	0.08	Средний радиус канала R_0 (мм)	3,5
Выходная энергия $W_{вых}$, МэВ	5	Радиус скругления электродов R_c (мм)	3,0
Ток ускоренных протонов, мА	40	Угол раскрыва электродов α (град)	55
Напряжение на резонаторе, кВ	80	Смещение осей резонаторов Y_c (мм)	57
Рабочая частота ВЧ поля, МГц	297	Радиус контейнера R_{out} (мм)	130
Миним. радиус апертуры, R_a , мм	2.17	Внутренний радиус резонатора R_1 (мм)	36,5
Эффективность ускорения, η	0.01-0.65	Внешний радиус резонатора R_2 (мм)	51,5
Средний темп ускорения, МэВ/м	0.76	Общие погонные потери P (кВт/м)	74
Рабочая напряженность, кВ/см	300	из них:	
Токопрохождение пучка в канале, %	100	- на внутр. поверхности резонатора P_1	53
Эмиттанс пучка, μ мм·мрад	0.6	- на внешн. поверхности резонатора P_2	5
Длина ускорителя, м	6.6	- на электродах P_c	8
		- на внутр. поверхности контейнера P_{out}	8
		Погонная емкость C (пФ/м)	125
		Собственная добротность Q_0	10200

На основании решений задач теплопроводности и термоупругости, выполненных с помощью пакета программ HAST, был выбран вариант системы охлаждения медного резонатора и контейнера из сплава АМг-6. В резонаторе имеются 28 продольных круглых каналов диаметром 8 мм, равномерно расположенных в стенках (рис. 3). За счет введения в конструкцию промежуточного коллектора охлаждение осуществляется встречными потоками воды со скоростью 3,5÷5 м/сек. Система охлаждения контейнера содержит 16 круглых каналов диаметром 8 мм, расположенных в четырех противоположных гранях контейнера, внешняя поверхность которого выполнена в виде восьмигранника (рис. 3). Скорость протока воды в каналах контейнера 1,25 м/сек. Расчет термодформаций показал, что результирующее отклонение электродов от проектного положения в рассмотренном варианте не превосходит 20 мкм, что является допустимым. Из проведенного рассмотрения следует, что 2Н-резонатор может быть использован в ускорителе непрерывного режима.

Конструктивно ускоритель состоит из 3 секций длиной около 2,2 м. ВЧ-питание каждой из трех секций осуществляется отдельно. Структурная схема системы питания предполагает разветвление ВЧ-каналов на низком уровне мощности с отдельным регулированием амплитуды и фазы (рис. 4). Выходная мощность каждого из трех каналов до 300÷350 кВт. Системы автоматического регулирования амплитуды и фазы обеспечивают стабилизацию параметров ВЧ-поля при изменении тока пучка и воздействии медленных возму-

щающих факторов. Исполнительными органами систем авторегулирования являются электронные аттенуатор и фазовращатель.

Основной трудностью создания системы ВЧ-питания на частоте 297 МГц является отсутствие отечественного генераторного прибора на установленную мощность 300-400 кВт. Из зарубежных разработок известен тетрод ТН571В фирмы "Thomson", имеющий выходную мощность до 80кВт на частоте 500 МГц [14]. При наличии этих приборов оконечный усилитель может быть выполнен на четырех тетрадах со сложением мощности либо в секции, либо в питающем фидере. Способом сложения определяются количество и конструкция узлов ввода мощности. Отечественный генераторный прибор с требуемыми параметрами может быть создан на базе тетрода ГУ-101А, разработанного на объединении "Светлана".

В представленной работе показана возможность создания линейного ускорителя протонов непрерывного режима на частоте 297 МГц с увеличенным темпом ускорения на 2Н-резонаторе. Следующим этапом работы должна быть экспериментальная проверка полученных результатов расчетов и предложенных технических решений на экспериментальном образце НЧУ.

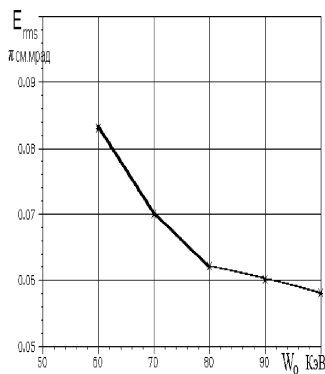


Рис. 1. Зависимость среднеквадратичного эмиттанса пучка от энергии инжекции.

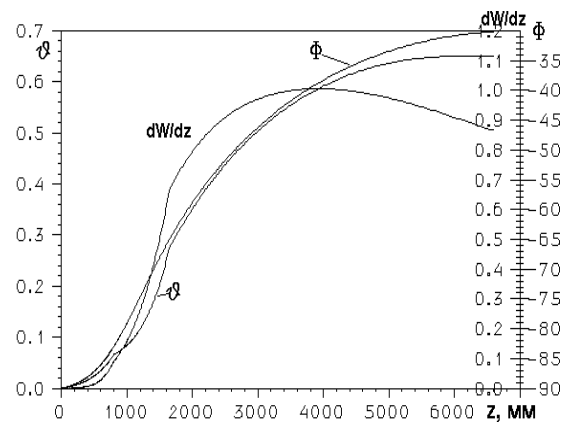


Рис. 2. Распределение основных параметров ПОКФ-RFQ по длине ускорителя.

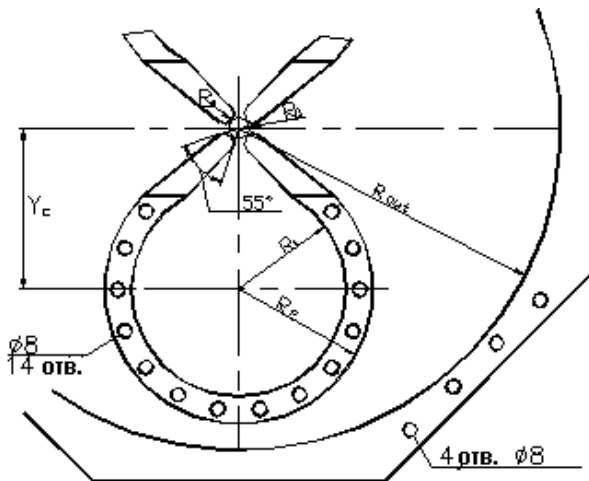


Рис. 3. Поперечное сечение 2Н-резонатора 300.

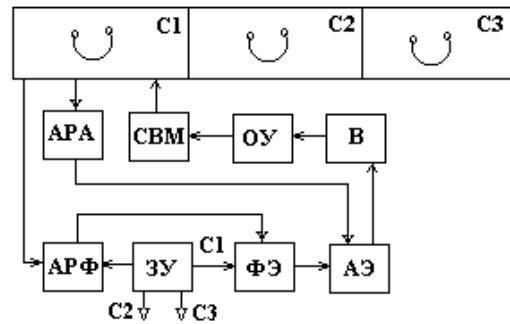


Рис. 4. Структурная схема системы ВЧ-питания секции ускорителя.

АРА-система авторегулирования,
 АРФ-система авторегулирования фазы,
 В-возбудитель, ОУ-оконечный усилитель,
 СВМ-система ввода мощности,
 С-секция ускорителя,
 АЭ-аттенуатор электронный,
 ФЭ-фазовращатель электронный,
 ЗУ-задающее устройство.

ЛИТЕРАТУРА

1. G.M.Arbiqve et al. – Proc. of the 1990 L.C., Albuquerque, NM.USA, 1990, p. 48.
2. H. Vernon Smith et al. – Proceedings of the 1998 L.C., Chicago, 1998.
3. V.A. Zenin et.al. - In: Proceedings of the 1994 Int. L.C. Tsukuba, Japan, 1994, v.1.p.158.
4. А.А. Боровиков и др. – В сб.: Труды XII ВС по УЗЧ. Дубна, 1992, т.2. с.120.
5. Линейный ускоритель ЛУСИ (ПЛ-10). Проспект на Международной научно-технической выставке-ярмарке идей и технологий “Будущее России” Протвино, 1994.
6. А.Ж. Атачкин и др. – Сборник научных трудов МИФИ. Москва, 1998, часть 3, с.161.
7. О.К. Беляев и др. Препринт ИФВЭ 2000-21. Протвино, 2000.
8. W.D. Kilpatrick. Rev. Scient. Instrum., 1957, v.28, 10, p.824.
9. A. Zherebtsov. – Proceedings of the Second Int. BDO Workshop, 1995, St.-Peterburg, 180÷187.
10. K. Hasegava et. al. – Proc. of the 1994 Int. L.C., Tsukuba, Japan, 1994, v.1, p.113.
11. N. Veda et al. – IEEE Trans. On NS, v. NS-32, 5, p.1985.
12. А.В. Васиченко и др. Препринт ИЯИ-1019/99, Москва, 1999.
13. А.Г. Дайковский и др. ЖВТ и МФ, 1986 т.26, 8, с. 1206.
14. G. Clerc et al. Thomson Tubes Electroniques. Report AT511.97.001, 1997.