

Сильноточные линейные ускорители для электроядерной энергетики с использованием сверхпроводящих устройств

Г.И. Бацких, Б.П. Мурин

Московский Радиотехнический институт, Россия

И.В. Чувило, О.В. Шведов

Институт теоретической и экспериментальной физики, Москва, Россия

А.А. Васильев

Министерство РФ по атомной энергии, Москва, Россия

Изложены концепции построения двух типов сильноточных линейных ускорителей протонов (ионов) для электроядерной энергетики с выходной энергией протонов порядка 1 ГэВ и токами в непрерывном режиме до 30 мА (первый тип) и до 250 мА (второй тип). В обоих случаях в качестве главных проблем рассматриваются проблемы обеспечения высоких эффективности и надежности ЛУ, а также их радиационной чистоты. Показано, что в первом типе ЛУ хорошие характеристики получаются при применении сверхпроводящих ускоряющих резонаторов (СПУР), во втором — ЛУ — при использовании сверхпроводящих фокусирующих соленоидов (СПФС) и сверхмощных усилителей ВЧ-мощности типа “Реготрон”.

Введение

В настоящее время в России, США, Японии и ЦЕРНе проводятся исследования с целью создания электроядерных энергетических установок (ЭЯЭУ) нового типа, включающих в качестве основных принципиальных узлов сильноточный ЛУ протонов, нейтронопроизводящую мишень и секционированный подкритический бланкет. Предполагается, что такие ЭЯЭУ позволят в ближайшем будущем создать безопасную ядерную энергетику и уменьшить радиационную загрязненность окружающей среды. Рассматриваются варианты ЭЯЭУ с упором на различные основные цели:

1. Использование оружейного плутония для промышленной энергетики.
2. Использование природного тория для получения энергии и воспроизводства дефицитных делящихся материалов.
3. Трансмутация долгоживущих радионуклидов отходов атомных реакторов в короткоживущие.
4. Нарботка в промышленных масштабах трития.

Различные задачи ЭЯЭУ формируют разные требования к пучкам ЛУ. Например для ЭЯЭУ — “Усилителей энергии” [1,2], в которых предполагается реализация целей 1 и 2, необходимы пучки протонов с энергией 1 ГэВ и средним значением тока до 30 мА. ЭЯЭУ для трансмутации отходов АЭС требуют пучки протонов с энергией 1 – 1,6 ГэВ при непрерывном токе 100–250 мА [6]. В США ведутся исследования [6], связанные с созданием ЭЯЭУ для наработки трития, для которой рассматривается ЛУ протонов с энергией 1,3 – 1,7 ГэВ при токе 100 мА. На всех типах ЭЯЭУ предполагается также вырабатывать электроэнергию. Требования к ЛУ меняются в зависимости от планируемой производительности ЭЯЭУ.

В связи с вышеизложенным ниже излагаются концепции построения двух типов ЛУ протонов непрерывного режима работы с энергией протонов порядка 1 ГэВ при токах до 30 мА и до 250 мА на основе работ, проведенных в МРТИ по ТЗ, выданных ИТЭФ. В основу концепций заложена следующая идеология:

– ЛУ должен иметь высокую надежность (коэффициент использования $> 85\%$), высокую эффективность (общий КПД $> 50\%$), время эксплуатации не менее 30 лет.

– ЛУ должен быть радиационно чистым, допускающим обслуживание без специальной манипуляционной техники [7].

– Схема и конструкция ЛУ должны допускать модернизацию при изменении требуемых характеристик пучка (увеличение тока пучка, одновременное ускорение протонов и отрицательных ионов водорода, использование пучка на нескольких параллельно работающих мишенях и т.п.) и быть оптимизированы на минимальную стоимость сооружения и эксплуатации. В них должны быть применены перспективные методы и материалы, опробованные на практике.

– В качестве прототипов используются ЛУ Московской мезонной фабрики (разработан МРТИ и эксплуатируется в ИЯИ РАН) [11], экспериментальный стенд СИУ (начальная часть сильноточного ЛУ протонов с фокусировкой сверхпроводящим соленоидом) [8], ускоритель со СПУР “СЕВАФ” [9].

1. Проблемы

Основные проблемы при создании ЛУ протонов рассматриваемого типа связаны с решением трех задач: обеспечение высоких экономических характеристик, надежности и радиационной чистоты ЛУ [10].

Экономические показатели ЛУ определяются тремя группами затрат: стоимостью сооружения, эксплуатационными расходами и эффективностью преобразования подводимой электроэнергии в энергию пучка.

Стоимость сооружения при прочих равных условиях зависит от оптимизации схемы ЛУ и его основных систем, в том числе:

– от темпа ускорения, который определяется компромиссом между стоимостью аппаратуры, зависящей от потребляемой ВЧ-мощности (система ВЧ-питания и т.п.), и стоимостью устройств, зависящей от длины ЛУ (ускоряющая, фокусирующая и вакуумная системы и т.п.);

– от выбора типов ускоряющих резонаторов и рабочих частот;

– от размеров апертуры ускоряющего канала, определяемых многими факторами и, в первую очередь, формированием пучка в инжекторной и начальной частях ЛУ;

– от количества каналов ВЧ-питания, которое зависит от типов и мощности применяемых ВЧ-усилительных приборов.

Эффективность и эксплуатационные расходы ЛУ определяют его рентабельность и, при прочих равных условиях, сильно зависят от коэффициента полезного действия (ЛУ) (η_y) и от надежности его систем. Под КПД понимается отношение энергии, переданной пучку, к энергии, подведенной к ЛУ от сети. В основном этот КПД характеризуется эффективностью преобразования ВЧ-энергии в энергию пучка протонов (КПД ускоряющего резонатора η_p) и эффективностью преобразования энергии сети в ВЧ-энергию (КПД генератора η_r):

$$\eta_y = \eta_p \cdot \eta_r.$$

Энергия, потребляемая другими системами ЛУ, составляет относительно малую долю. Для оценок можно принять КПД ВЧ-системы с использованием клистронов равный 0,7. КПД резонатора можно оценить по формуле

$$\eta_y = 1/[1 + E_y/I_n Z_{эф.} \cdot \cos^2 \varphi_s].$$

Здесь I_n — ток пучка; E_y — напряжение, определяющее прирост энергии протонов на 1 м; $Z_{эф.}$ — эффективное шунтовое сопротивление резонатора; φ_s — равновесная фаза. КПД сверхпроводящего ЛУ равен

$$\eta_{\text{спу.}} = P_{\text{п.}} / (P_{\text{с.вч}} + P_{\text{с.крио}}),$$

где $P_{\text{п.}}$ — мощность пучка протонов; $P_{\text{с.вч.}}$ — мощность сети, потребляемая системой ВЧ-питания; $P_{\text{с.крио.}}$ — мощность сети, потребляемая криогенной системой ЛУ.

Расчеты КПД ЛУ показывают, что при токах порядка 50 мА и ниже высокий КПД (не менее 50%) можно иметь только при использовании СПУР. При токах порядка 100 мА и более высокое значение КПД получается и при применении “теплых” резонаторов.

Проблему надежности ЛУ можно сформулировать как проблему обеспечения коэффициента использования установки не менее 0.85. Анализ простоев в сильноточных ЛУ показал, что основными причинами простоев являются неисправности в высоковольтных инжекторах и в системах ВЧ-питания. При прочих равных условиях надежность системы ВЧ-питания снижается пропорционально числу ВЧ-каналов. Нетрудно видеть, что для решения проблемы надежности необходимо выполнить по крайней мере два условия: работы, чтобы число ВЧ-каналов не превышало несколько десятков; отказаться от высоковольтных инжекторов.

Проблема радиационной чистоты. Суть проблемы состоит в ограничении потерь пучка до уровня, допускающего обслуживание ЛУ без применения специальной манипуляционной техники. В работе [7] критерий допустимых потерь пучка определен в виде

$$W \cdot q = 1 \text{ ГэВ} \cdot \text{нА/м.}$$

Здесь W — энергия протона и q — допустимые потери пучка на длине 1 м. При темпе ускорения 1 МэВ/м в высокоэнергетической (основной) части ЛУ второго типа (диапазон энергии 0,1 – 1 ГэВ) суммарные допустимые потери пучка составят, согласно этому критерию, 3 мкА, что при токе 250 мА соответствуют относительным потерям порядка 10^{-5} . При токе 30 мА суммарные потери не должны превышать 10^{-4} . Столь малые допустимые потери требуют применение в ЛУ специальных мер, разработанных в МРТИ [10] и примененных, в частности, в сильноточном ЛУ Московской мезонной фабрики ИЯИ РАН [11]. Среди этих мер особое значение имеют способы, обеспечивающие минимальный ореол пучка и достаточные запасы по пропускной способности ускоряюще-фокусирующего тракта ЛУ.

Ниже даны краткие описания двух сильноточных ЛУ протонов непрерывного режима.

2. Сверхпроводящий линейный ускоритель (СПЛУ) на энергию 1 ГэВ и ток 30 мА [3, 12]

Концептуальная схема СПЛУ на энергию 1 ГэВ и ток до 30 мА со СПУР показана на рис.1. Инжектор генерирует пучок протонов с энергий 60 кэВ. Далее протоны ускоряются в начальной части (НЧУ) — ускорителе с пространственно-однородной фокусировкой (RFQ). Четырехкамерный H-резонатор, возбужденный на волне Y_{211} и частоте 425 МГц, ускоряет протоны до энергии 3 ГэВ. Параметры НЧУ выбраны из условий обеспечения захвата частиц в ускорение близкого к 100%, адиабатического группирования и хорошего согласования с примыкающими частями ЛУ. Первая часть ЛУ построена на коротких четырехзачорных резонаторах с трубками дрейфа (DTL). В этой части энергия протонов повышается до 50 МэВ (эта цифра на последующей стадии будет уточнена). Разбиение ускоряющей структуры на короткие СПУР диктуется необходимостью размещения между ними квадрупольных фиксирующих линз на постоянных магнитах. Структура периода фокусировки ФОДО. Общее число резонаторов 28. Рабочая частота ~ 425 МГц.

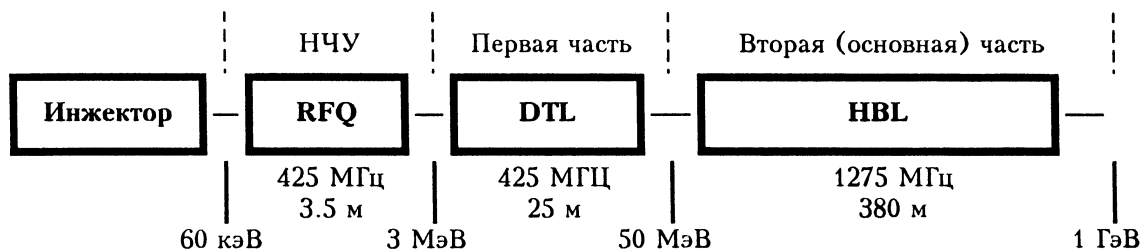


Рис. 1: Концептуальная схема ускорителя с СП резонаторами на энергию 1 ГэВ и ток 10–30 мА.

Основная часть ЛУ обеспечивает ускорение протонов до энергии 1 ГэВ. Ускоряющий канал состоит из 304 девятыячеечных СПУР с ячейками эллиптической формы, возбуждаемых на частоте 1275 МГц. Темп ускорения на чистой длине СПУР равен 5 МэВ/м. Усредненный по всей длине ЛУ темп ускорения составит при этом не менее 2,5 МэВ/м. Фокусировка пучка осуществляется между парами СПУР (рис.2).

Системы ВЧ-питания и автоматического регулирования строятся по классической для протонных ЛУ схеме с той лишь разницей, что для сокращения количества каналов в ВЧ-системе от каждого ВЧ-канала возбуждаются четыре СПУР. Число ВЧ-каналов в основной части 76, в НЧУ и в первой части — 8. В качестве ВЧ-генераторов используются усиленные клистроны с входной мощностью 500 кВт [12].

Для обеспечения сверхпроводимости медные резонаторы, на рабочую поверхность которых нанесена ниобиевая пленка, охлаждаются жидким гелием до 2К. По сравнению с СПУР из ниобия она должна быть менее подвержена возникновению “квенчей” и менее чувствительной к магнитным полям; СПУР выбранной конструкции должны иметь меньшую стоимость и более высокую добротность. В настоящих предложениях выбран вариант криосистемы, состоящей из типовых криомодулей. Криомодуль состоит из криостата, внутри которого расположены несколько СПУР с примыкающими к ним устройствами. Конструктивная схема фрагмента криомодуля показана на рис.2. Конструкция криостата сделана разборной. Верхняя часть его снимается.

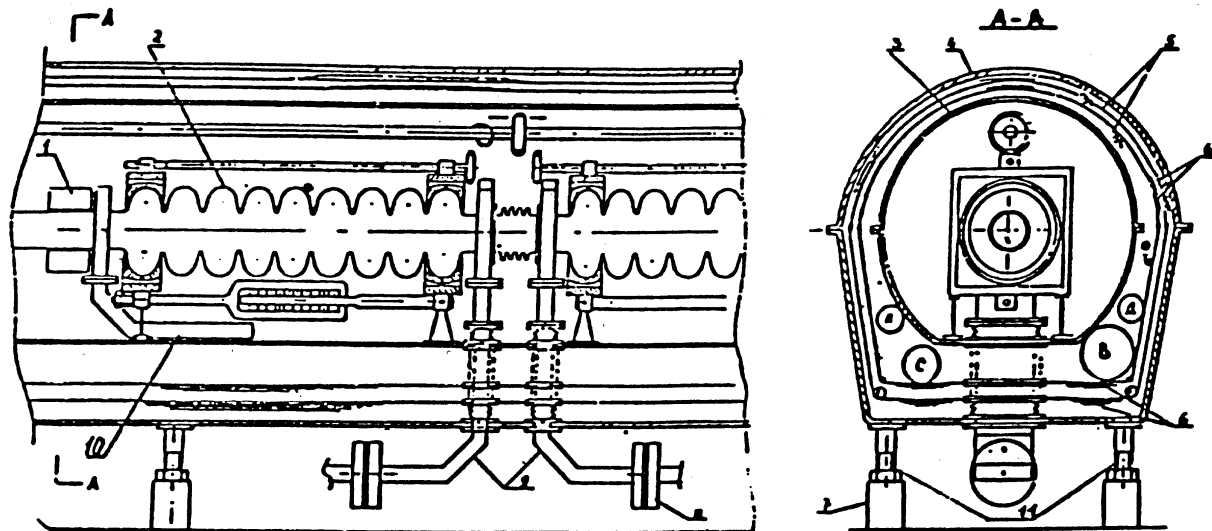


Рис. 2: Модуль основной части ускорителя с двумя СП-резонаторами и квадрупольной линзой с постоянными магнитами. 1 — квадрупольная линза; 2 — ускоряющий резонатор; 3 — гелиевый сосуд; 4 — оболочка криомодуля; 5 — тепловой (Θ_1) и радиационной (Θ_2) экраны; 6 — суперизоляция; 7 — основания; 8 — ВЧ-окно; 9 — входы ВЧ-системы; 10 — нагрузка для подавления высших мод; 11 — устройство юстировки резонатора; А, В, С, D, Е, F — система подачи гелия.

Идеология, связанная с количественными характеристиками снятия тепла гелием, принята следующей. Мощность ВЧ-потерь по гелию в СПУР составляет около 4000 Вт. Выделение в СПУР тепла по гелию из-за потерь пучка в радиационной чистой ЛУ составляет около 10% от ВЧ-потерь. Такая же величина принимается и для допустимого теплопритока из внешней среды через криостат.

Основные характеристики ЛУ показаны в табл.1. Капитальные затраты на создание ускорителя оцениваются примерно в 200 млн. долларов США.

В МРТИ проводятся исследования по оптимизации ЛУ. В частности, рассматривается вариант ЛУ, в котором в НЧУ в первой части используются “теплые” резонаторы.

Таблица 1:

Параметр	Начальная часть	Первая часть	Вторая часть
Энергия инъекции, МэВ	0.06	3	50
Выходная энергия, МэВ	3	50	1000
Частота ВЧ-поля, МГц	425	425	1275
Число резонаторов	1	28	304
Акцептанс, приведенный, π см·мрад	0.07-0.25	0.2-0.35	0.5-0.7
Эффективный эмиттанс, приведенный, π см·мрад	0.04-0.08	0.08-0.12	0.12-0.2
Равновесная фаза, град	90-45	45-30	30
Разброс по импульсам на выходе, %	0.4	0.08	0.025
Длина резонатора, м	3.2	0.25-0.85	0.35-0.93
Длина резонатора, см	15.6	49-45	24-21,6
Диаметр апертуры, мм	3-6	15-20	30-40
Длина ускорителя, м	3.5	25	380
Мощность на ускорение пучка, кВт	90	1410	28500
Потери, снимаемые гелием на части ускорителя, Вт	50	580	3400

3. Линейный ускоритель со сверхпроводящими фокусирующими соленоидами на энергию 1 ГэВ и ток 250 мА

Рассматриваемая концепция ЛУ с током протонов 250 мА является результатом дальнейшего развития технических предложений МРТИ по сверхмощным ЛУ непрерывного режима, предназначенных для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов ядерных реакторов [3,4,7,8,10]. В ЛУ также применена одноканальная схема ускорения, состоящая из четырех частей: инжектор с выходной энергией протонов 150 кэВ, НЧУ на структуре NILVILAS, первая часть на структуре DTL и основная часть на ускоряющих резонаторах с шайбами и диафрагмами (УРШИД). Фокусировка во всех частях ЛУ осуществляется с помощью СПФС. Диапазоны энергий и рабочие частоты показаны на схеме. Темп ускорения выбран равным 1 МэВ/м. Для обеспечения радиационной частоты в ускорителе предусмотрены следующие меры: большой запас по пропускной способности и по апертуре, применены специальные согласующие устройства на переходах от одной части ЛУ к другой и подавление продольных когерентных колебаний протонов на участке перехода на более высокую рабочую частоту; ускоряюще-фокусирующий тракт оптимизирован на ускорение пучка с минимальным ореолом и др. [3,4,10].

ВЧ-система ЛУ разветвляется по каналам на низком уровне мощности с целью применения быстродействующих систем автоматического регулирования амплитуд и фаз ВЧ-полей в УР. В качестве канальных усилителей ВЧ-мощности используются реготроны с выходной мощностью 5 МВт в непрерывном режиме. ЛУ имеет модульное построение. Ускорительный модуль включает УР и канал ВЧ-питания с системами автоматического регулирования. ЛУ управляется и диагностируется АСУ.

Основные параметры ЛУ приведены в табл. 2.

Таблица 2:

Параметр	Начальная часть	Первая часть	Вторая часть
Энергия инъекции, МэВ	0.15	3	100
Выходная энергия, МэВ	100	50	1000
Частота, МГц	350	350	1050
Длина, м	9	100	900
Ток, мА	250	250	250
Число УР	2	7	65
Мощность в пучке, МВт	0,7	24	255
Синхр. фаза, град.	90-40	30	30
Аксептанс, π см·мрад	2.5	3	7,5
Эффективный эмиттанс, π см·мрад	0.5	1	3
Диаметр апертуры, мм	10	10-20	20
$R_{\text{ап}}/R_{\text{пучка}}$	2	2	2

Ниже даются краткие пояснения к основным нововведениям.

Начальная часть ускорителя. Идея создания ускорителя со СПФС основана на следующих соображениях [8,10].

Для преодоления эффекта кулоновского расталкивания в пучке необходимо обеспечить одновременно сильное фокусирующее поле и сильные продольные электрические ВЧ-поля, группирующие сгустки частиц в продольном направлении. Из-за малых скоростей протонов в диапазоне энергий 50–100 кэВ размещение сильных фокусирующих линз внутри ускоряющей структуры не представляется возможным, и имеются только два пути реализации идеи: применение для фокусировки сильных ВЧ-полей; использования для фокусировки СПФС, расположенных вне ускоряющей структуры и охватывающих последнюю по всей длине.

Реализация первого способа возможна на основе системы RFQ. Однако в ней нельзя при приемлемой частоте ускорить пучки с интенсивностью более 100–150 мА. Реализация второго способа оказалась возможной на основе предложенного в МРТИ ЛУ [8,13], в котором фокусировка осуществляется СПФС, а ускорение — в резонаторе с малым поперечным размером, расположенном в теплой апертуре соленоида. Расчеты и математическое моделирование показали, что при ускоряющих ВЧ-полях 4–5 МВ/м и фокусирующем поле 5–8 Тл в таком ускорителе возможно ускорять пучки протонов с интенсивностью порядка 1 А, начиная с энергий 100–150 кэВ. В МРТИ создан экспериментальный ускоритель СИУ-1, построенный по этому принципу. В нем в качестве УР применен резонатор со встречными приборами [8]. В СИУ-1 на рабочей частоте 200 МГц был ускорен пучок протонов с током 400 мА в диапазоне энергий 180–1500 МэВ. В дальнейшем ЛУ такого типа получил название HILBILAC (High Intensive Low Beta Ion Linear Accelerator) [4].

Сверхмощный усилитель — реготрон. Для уменьшения числа ВЧ-каналов в ЛУ необходимо иметь каналные усилители ВЧ-мощности с параметрами: $P_{\text{вых}} \geq 5$ МВт при коэффициенте усиления не менее 40 дБ и КПД не менее 70%. Такой прибор был предложен и разработан в МРТИ под названием “Реготрон” [15,16]. В нем используется низкоперевансный пучок, клистронный группирователь и распределенная система отбора от пучка ВЧ-мощности. В последней системе за счет применения принципа автофазировки удается выводить во внешние нагрузки более 70% ВЧ-мощности, сосредоточенной в электронном пучке. Основные параметры реготрона (частота 1050 МГц) приведены ниже:

Напряжение	500 кВ
Ток	15 А
Количество выходов	7 (8)
Суммарная выходная мощность	5,3 МВт
Входная мощность	2 кВт
КПД	более 70%
Число резонаторов группирователя	3
Длина ВЧ-системы	8 м

Использование в реготроне распределенной системы отбора ВЧ-мощности с 7–8 выводами на нагрузку позволяет решить по крайней мере две задачи: транспортировать при достаточном запасе по электрической прочности более 5 МВт непрерывной ВЧ-мощности; вводить эту мощность распределенно в “длинные” (12–15 м) УР.

Модуль основной части ЛУ показан на рис.3. На восемь ВЧ-вводов мощность подается от соответствующих выходов реготрона (реготрон для простоты на рис.3 не изображен). Применение для фокусировки СПФС позволило применить длинные УР без разбиения их на секции, как это сделано в резонаторах ЛУ Лос-Аламоской и Московской мезонных фабрик для установки между секциями квадрупольных фокусирующих линз. Это позволило полностью использовать достоинство ускоряющей структуры ШиД (большой коэффициент связи между ячейками) на всей длине УР и обеспечить высокую стабильность распределения ускоряющих ВЧ-полей в резонаторах.

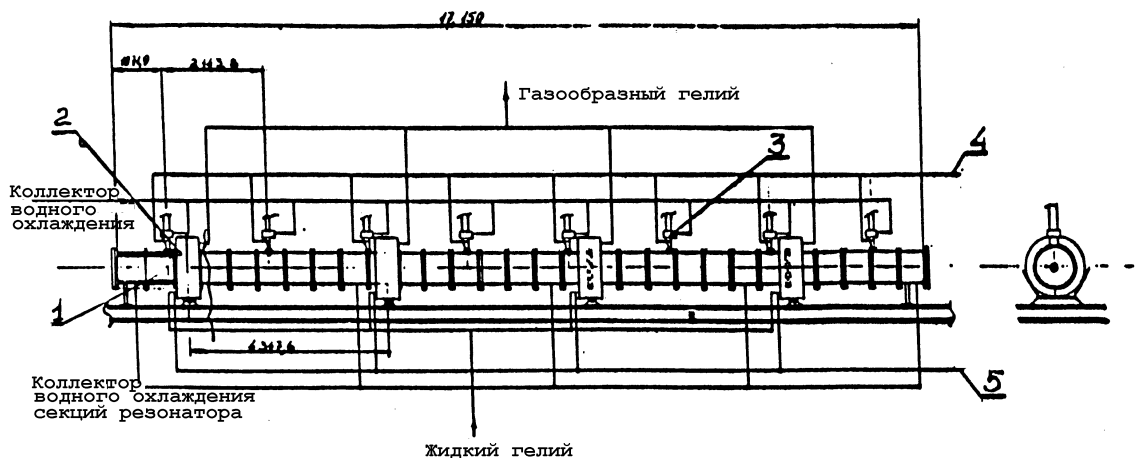


Рис. 3: Модуль основной части “теплого” резонатора со сверхпроводящими соленоидами. 1 — “теплый” резонатор; 2 — сверхпроводящий соленоид; 3 — узел ввода ВЧ-мощности; 4 — линии откачки резонатора; 5 — сверхпроводящий токовод.

Модуль первой части на структуре DTL также строится с использованием для фокусировки СПФС. Применение на всей длине ЛУ СПФС облегчает решение ряда проблем [3]:

а) однотипная фокусировка позволяет обеспечить хорошее согласование между разными частями ЛУ; б) замена квадрупольных линз на соленоиды уменьшает чувствительность канала к случайным возмущениям примерно на порядок (мат. моделирование).

Заключение

В докладе рассмотрены концептуальные проекты сильноточных ЛУ протонов с энергиями порядка 1 ГэВ и токами 30 и 250 мА в непрерывном режиме, предназначенных для использования в электроядерных энергетических установках нового типа. Показано, что их можно реализовать с хорошими эксплуатационными характеристиками на базе освоенных технологий.

Принятые в концепции ряд новых решений подтверждаются тенденциями развития концепций ЭЯЭУ рассматриваемого типа в зарубежных центрах, проявившимися в последнее время. Например в ЦЕРНе для “Усилителя энергии” вместо ускорителя из цепочки изохронных циклотронов [1] стали в качестве основного варианта рассматриваться СПЛУ с повышенным до 30 мА током протонного пучка [17]. Одноканальные схемы ЛУ со СПУР рассматриваются и в лабораториях США [5,6] и Японии [18].

Список литературы

- [1] R.Fernandez, P.Mandrillon, C.Rubbia, J.Rubio. A Preliminary Estimate of the Economic Impact of the Energy Amplifier. CERN/LHC/96-01 (EET). Geneva, 1996.
- [2] I.V.Chuvilo et al. Weapon Plutonium in Accelerator-Driven Power System. Second International Conf. On Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Application. 3-7 June 1996, Kalmar, Sweden.
- [3] B.P.Murin, G.I.Batskikh et al. The New Concepts in Designing the CW High Current Linacs. 1995 PAC and Int. Conf. on High-Energy Accelerators. Dallas, Texas, 1995.
- [4] G.I.Batskikh et al. Design of High-Energy High Current Linac with Focusing by Superconducting Solenoids. Internat. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Application. Las Vegas, NM, 1994, AIR Conf. Proc. 346.
- [5] St.O.Schriber. Developments of Linacs for ADTT in USA. Second Int. Conf. on ADTT and Appl., 3-7 June 1996, Kalmar, Sweden.
- [6] J.C.Browne et al. Status of the Accelerator Production of Tritium (APT) Project. Los Alamos Nat. Lab. USA, LA-UR 96-1991, 1996.
- [7] B.P.Murin, A.P.Fedotov. Towards a Radiation-Free Linacs of Meson and Neutron Generator Type. Proc. the Proton Linear Acc. Conf., Chalk River Nucl. Lab., Canada, 1976.
- [8] B.P.Murib, V.M.Pirozhenko, O.V.Plink. High-Current Low Energy RF Ion Accelerator. 1990 Linear Acc. Conf., Albuquerque, New Mexico, 1990.
- [9] CEBAF DESIGN REPORT, May 1986, Newport News, Virginia.
- [10] Б.П.Мури́н. Перспективы создания мощных линейных ускорителей энергетического назначения. Препринт 9210, МРТИ, М., 1992.

- [11] Ускорительный комплекс для физики средних энергий (Мезонная фабрика). / Под редакцией Б.П.Мурина. Труды Радиотехнического ин-та АН СССР № 16, 1974.
- [12] Использование оружейного плутония в электроядерных системах. Отчет рабочей группы Минатома РФ. — Москва, февраль 1996.
- [13] Б.И.Бондарев и др. Применение сверхпроводящего фокусирующего соленоида для повышения предельного тока в линейном ионном ускорителе. Труды VI Всесоюзного совещания по ускорителям заряженных частиц, т. 1. Дубна, 1979.
- [14] Ф.А.Водопьянов, Б.П.Мурин. Способ генерирования ВЧ-колебаний при помощи пучка релятивистских электронов. Труды Радиотехнического ин-та АН СССР № 2 “Техника ускорителей”, 1975.
- [15] Б.П.Мурин и др. Торможение релятивистских электронных сгустков в протяженной системе резонаторов. Труды РТИ АН СССР “Теория и техника релятивистских СВЧ-генераторов”, 1988.
- [16] B.P.Murin et al. Super-Power RF Regotron-Type Generator for Linear Accelerator with High Mean Current. Spec. Meeting on Accelerator-Driven Transmutation Technology for Radwaste and Other Application. 14-28 June 1991, Stockholm, Sweden, LA-12205-C Conf. SKN Report, UC-940, iss. November 1991.
- [17] C.Rubbia and J.Rubio. A Tentative Programme Towards a Full Scale Energy Amplifier. CERN/LHC/96-11 (EET), Geneva, 15 July 1996.
- [18] JAERY-Review 96-012, Reactor Engineering Department Annual Report (April 1, 1995 — March 31, 1996), p.210-224.