

УДК 621.384.6

**ВАРИАНТЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОННОГО
УСКОРИТЕЛЯ SALO В КАЧЕСТВЕ ДРАЙВЕРА ПОДКРИТИЧЕСКОЙ СБОРКИ****И.С. Гук¹, А.Н. Довбня¹, С.Г. Кононенко¹, М. ван дер Вил², Я.И.М. Ботман²,
Ф.А. Пеев¹**¹*Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»**Украина, 61108, Харьков, ул. Академическая, 1*²*Technische Universiteit Eindhoven**Den Dolech 2, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands*

Поступила в редакцию 10 июля 2007 г.

Рассматривается возможность создания в ННЦ ХФТИ электронного ускорителя с нейтронообразующей мишенью (драйвера) для управления подкритической сборкой, использующего сверхпроводящую ускоряющую структуру TESLA. Первый вариант предполагает использование в качестве драйвера части оборудования разрабатываемого проекта ускорительного комплекса SALO. Используется сверхпроводящая ВЧ пушка, канал транспортировки и инъекции пучка в ускоряющую структуру, шесть ускоряющих модулей и магнитная система первой арки рециркулятора. Предполагается получить пучок с энергией 130 МэВ и средней мощностью в пучке 130 кВт. Рассмотрены возможные каналы вывода пучка на подкритическую сборку. Анализируются варианты фокусировки пучка на мишени. Второй вариант предполагает создание линейного сверхпроводящего ускорителя с выводом пучка в существующий зал, где можно разместить подкритическую сборку. Этот вариант позволяет полностью исключить капитальное строительство, что существенно уменьшит стоимость установки.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рециркулятор, ускоритель электронов, подкритическая сборка, сверхпроводящая ускоряющая структура, канал транспортировки.

В большинстве промышленно развитых стран мира ядерная энергетика занимает существенную долю в общем производстве электроэнергии, а в Японии и Франции превышает 50%. С вводом в эксплуатацию новых энергоблоков на Хмельницкой и Ровенской атомных электростанциях в Украине этот порог был также превышен с 2004 года [1]. Основные проблемы, связанные с эксплуатацией существующих атомных электростанций, определяются надкритическим режимом работы реакторов, требующим сложной и надёжной системы управления, и наработкой большого количества радиоактивных отходов, имеющих большое время жизни. В связи с рядом инцидентов на атомных станциях стимулируется поиск более надёжных вариантов ядерных энергоустановок, использующих распад тяжёлых ядер.

Один из таких вариантов [2-5] предполагает использовать ядерные установки с подкритическими сборками, для управления которыми используются источники нейтронов на основе ускорителей протонов. Такие установки позволяют реализовать так называемый ториевый топливный цикл, проводить трансмутацию радиоактивных изотопов, сжигать нарабатываемый в реакторах с тепловыми нейтронами плутоний. Типичные параметры ускорителя протонов, драйвера подкритической сборки: энергия — 1÷1,7 ГэВ, ток — более 10 мА [3,5,6]. Линейный ускоритель протонов, являющийся наиболее перспективным вариантом драйвера, с такими параметрами пучка будет иметь длину около одного километра. Одной из главных проблем создания такого ускорителя является активация оборудования ускорителя из-за потерь пучка, что может привести к невозможности прямого обслуживания систем из-за высокой степени радиационного облучения персонала. Стоимость линейного ускорителя протонов на энергию 1 ГэВ и средним током 1,4 мА для нейтронного источника SNS, строительства которого закончено в 2006 году в США [7], составляет около 1 млрд. долларов.

В связи с этим важно проверить основные принципы, заложенные в основу таких огромных по стоимости проектов, на установках, значительно меньших масштабов. Такая возможность существует при создании управляющего подкритической сборкой источника нейтронов на основе ускорителя электронов.

В работе [8] показано, что для получения потоков менее 10^{17} н/с фотоядерные процессы предпочтительнее реакций, индуцированных протонами, а стоимость ускорителя, без затрат на капитальное строительство и зарплату, для ускорителя электронов на порядок ниже.

В мире имеется опыт по использованию подкритическихборок, управляемых электронными ускорителями, для создания импульсных источников нейтронов. Так в Дубне (Россия) достаточно долго эксплуатировался нейтронный источник, состоявший из линейного ускорителя электронов LUE-40 на энергию 40 МэВ и подкритического реактора IBR-30 [9]. В настоящее время там же планируется запустить источник нейтронов на основе линейного ускорителя на 200 МэВ [10]. Средняя мощность пучка электронов - 10 кВт, частота повторения импульсов 150 Гц, длительность импульса 100 нс.

Начаты работы по изучению взаимодействия электронного пучка с подкритической сборкой в университетах США [11, 12]. В Idaho Accelerator Center of the Idaho State University используется линейный ускоритель электронов на энергию 30 МэВ со средней мощностью в пучке менее 1 кВт, частота посылок 7 Гц, длитель-

ность импульса 10 нс. В Texas A&M University для экспериментов используется 20 МэВ ускоритель с частотой посылок 180 Гц, средняя мощность в пучке 2 кВт, длительность импульса 2 мкс. Программой исследований предполагается создание новых ускорителей на энергию 19-33 МэВ, частота посылок до 360 Гц, длительность импульса 8 мкс, мощность в пучке до 42 кВт.

В ННЦ ХФТИ также рассматривается возможность создания подкритической сборки, управляемой электронным ускорителем [13 - 17]. Предлагается два варианта электронного драйвера. В качестве первого рассматривается импульсный ускоритель на энергию 85-130 МэВ, мощностью до 100 кВт в пучке, частота повторения импульсов 100-150 Гц, длительность импульса 3-16 мкс [14]. Другой вариант драйвера предполагает использование сверхпроводящей ускоряющей структуры TESLA, работающей в непрерывном режиме. Максимальная энергия электронов - 130 МэВ, мощность в пучке 130 кВт, частота повторения импульсов 1 и 13 МГц. Длительность импульсов 5-25 пс [13, 16-17]. Эти проекты имеют существенно большую мощность пучка, взаимодействие с подкритической сборкой, поэтому импульсная структура пучка этих драйверов может оказать существенное воздействие на некоторые наиболее подверженные влиянию пучка элементы установки.

Целью настоящей работы является анализ возможности использования в составе драйвера сверхпроводящего линейного ускорителя электронов для создания в ННЦ ХФТИ модели энергетической установки. Такая установка должна состоять из ускорителя, системы транспортировки пучка к мишени, нейтронообразующей мишени и подкритической сборки из топливных элементов.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ДРАЙВЕР

Использование ускорителя для управления подкритической сборкой предъявляет к нему ряд требований, часть которых были сформулированы и обсуждены в ходе семинара «Установка с подкритической сборкой, управляемая ускорителем частиц» [9].

Энергия электронов в ускорителе должна быть заключена в интервале 100...200 МэВ, это обеспечивает достаточно большой выход нейтронов на один ускоренный электрон, а с другой стороны, объём нейтронной мишени будет достаточно большим для уменьшения плотности энерговыделения и улучшения условий охлаждения мишени. Для демонстрации основных принципов взаимодействия драйвера с управляемой подкритической сборкой поток нейтронов должен быть максимальным. Наибольший ток можно получить на линейных ускорителях электронов. Существующие источники высокочастотного питания ускорителей и инжекторы позволяют получить средний ток на выходе такого ускорителя в нужном диапазоне энергии электронов, близкий к 1 мА. Таким образом, средняя мощность в пучке может быть близка к 100 кВт, что выдвигает очевидные требования на поперечные размеры пучка на мишени, связанные как с радиационной стойкостью материала, так и со съёмом тепла.

Принципиально важным является вопрос о временной структуре пучка ускорителя. В установке с подкритической сборкой предполагается использование хорошо отработанных технологий изготовления и эксплуатации топливных элементов. Они предполагают работу твэлов в условиях постоянных или медленно меняющихся во времени тепловых и радиационных нагрузках, поэтому естественным является требование продолжительной и надёжной работы ускорителя с непрерывным во времени пучком. Этому условию не отвечает вариант использования в качестве драйвера «тёплого» ускорителя, т.е. ускорителя, ускоряющая структура которого работает при температурах, близких к «комнатной». Высокочастотные источники такого ускорителя работают в импульсном режиме, частота следования импульсов мощных клистронов не превышают 150 Гц, а длительность импульса находится в интервале 1...10 мкс. Это означает, что нейтронообразующая мишень и твэлы подвергаются воздействию импульсного потока нейтронов и тепловыделения, превосходящих более чем в 10^4 раз среднее значение этих факторов. Данные по эксплуатации этих элементов установки в указанных условиях отсутствуют, результаты воздействия такого пучка на механические и физические свойства не изучены. Данные по источнику нейтронов в Дубне [10], создаваемого на основе твэлов из металлического плутония, могут быть получены только через несколько лет и неприменимы для используемого в нашей установке топлива на основе низкообогащенного урана. Кроме того, средняя мощность в нашей установке в 15 раз превышает мощность в установке ИРЕН. Возможно, что исследование воздействия указанного фактора на эти свойства может стать предметом исследования на будущей установке, но в таком случае «тёплый» ускоритель должен обеспечивать как непрерывный, так и импульсный характер воздействия пучка, что принципиально невозможно. По нашему мнению, линейный ускоритель на основе сверхпроводящих ускоряющих структур в настоящее время наиболее отвечает требованиям, предъявляемым к драйверу экспериментальной установки.

Проведенный нами ранее анализ работы ускорителей, используемых для работ по ядерной физике, показал [15], что ускорители, работающие в непрерывном во времени режиме, обладают наибольшей стабильностью характеристик во времени. Так, на установке МАМІ коррекцию параметров пучка в ходе многочасовых экспериментов делают не чаще одного раза в 10 часов.

Рассмотрим варианты использования сверхпроводящего линейного ускорителя разрабатываемого в ННЦ ХФТИ ускорительного комплекса «SALO» [15] в качестве драйвера подкритической сборки.

РАСПОЛОЖЕНИЕ УСТАНОВКИ

Рециркулятор предполагается разместить в помещении мишенного зала существующего в ННЦ ХФТИ комплекса линейного ускорителя ЛУ 2000. Такое размещение комплекса не потребует проведения капитального строительства, позволит использовать существующую инженерную инфраструктуру ускорителя ЛУ 2000. Имеющиеся вводы мощности позволят осуществить питание всех систем комплекса. Размещение нового оборудования возможно после демонтажа существующего оборудования и проведения ремонта помещения.

При использовании линейного ускорителя ускорительного комплекса «SALO» для работы с подкритической сборкой возможны четыре направления канала вывода пучка на нейтронообразующую мишень: $N1$, $N2$, $N3$ и $N4$ (см. рис. 1).

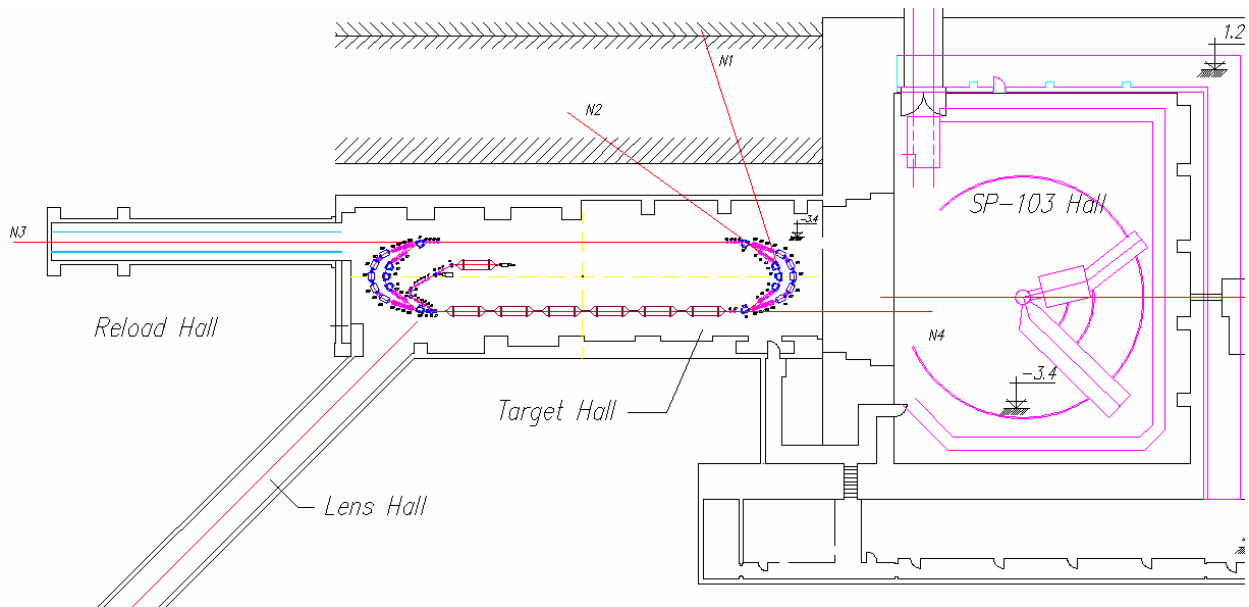


Рис. 1. Экспериментальные помещения на выходе ЛУ-2000.

В конце любого из каналов в направлении $N1$, $N2$, $N3$ имеется возможность построить здание [13, 15], в котором должны размещаться система формирования пучка на мишени, нейтронопроизводящая мишень с подкритической сборкой, отражателем, а также вспомогательное оборудование, необходимое для обеспечения работы установки, и экспериментальные каналы для использования нейтронных потоков в различных областях исследований. Ближайшее расстояние этого здания от жилой зоны превышает 480 м.

В режиме работы с подкритической сборкой будут использоваться высокочастотный инжектор, система формирования инжекционного пучка, ускоряющая система и система формирования пучка в канал транспортировки (см. рис. 2).

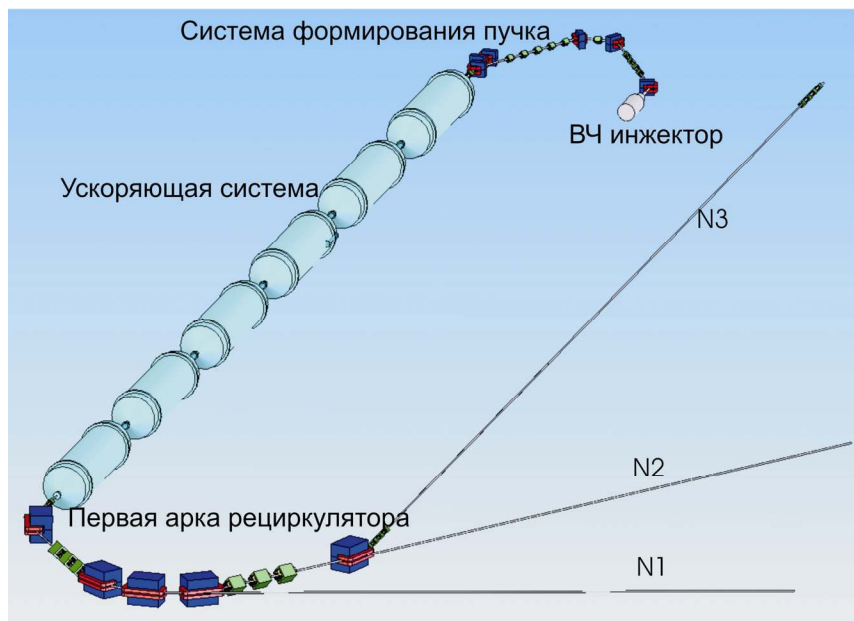


Рис. 2. Элементы комплекса, используемые в режиме драйвера.

ИНЖЕКТОР

Для работы в качестве драйвера для подкритической сборки предполагается использование сильноточного инжектора, аналогичного описанному в [18], и обеспечивающего параметры пучка: номинальная энергия 9,5 МэВ, средний ток 1 мА, необходимые для работы в составе драйвера. Инжектор представляет собой высокочастотную пушку со сверхпроводящей ускоряющей системой на основе ускоряющей структуры TESLA. Режим работы — непрерывный, частота посылок 1 и 13 МГц, обусловленная используемым лазером.

Инжектор на протяжении нескольких лет разрабатывается в центре ELBE в Розендорфе (Германия) [19]. Ускоряющая структура инжектора изготовлена фирмой ACCEL (Германия) [20]. Предполагается изготовление серии инжекторов после проведения испытаний головного образца. Проектные параметры инжектора представлены в таблице 1.

Таблица 1. Проектные параметры инжектора

Параметр	ELBE режим	Режим большого заряда
Частота ВЧ		1,3 ГГц
Мощность ВЧ		10 кВт
Номинальная энергия пучка		9,5 МэВ
Средний ток		1 мА
Режим работы		Постоянный
Частота повторения	13 МГц	1 МГц
Заряд в сгустке	77 пикокулон	1 нанокулон
Поперечный эмиттанс	0,5 мм·мрад	2,5 мм·мрад
фотокатод		Cs ₂ Te
Длина волны управляющего лазера		262 нм
Квантовая эффективность		□1 %
Мощность лазера		0,5 Вт
Длительность импульса лазера	5 псек	15 псек

СИСТЕМА ИНЖЕКЦИИ ПУЧКА

Расчёты магнитооптической системы рециркулятора проводились с помощью широко используемых в мировой практике программ MAD8, TRANSPORT и разработанной в НИЦ ХФТИ программы DECA [15]. На рис. 3 показана магнитооптическая система канала инжекции электронного пучка из высокочастотной пушки в ускоряющую секцию.

Магниты b_2 , b_3 , b_4 , b_7 и квадрупольные линзы $q_4 - q_{16}$ обеспечивают проводку пучка от инжектора до входа в ускоряющую систему. Линзы $q_4 - q_{14}$ обеспечивают необходимые поперечные размеры пучка и ахроматичность и изохронность прямолинейного промежутка, где расположена ускоряющая система. Линзы $q_{15} - q_{18}$ (см. также рис. 6) обеспечивают проводку пучка с указанным выше поперечным эмиттансом через ускоряющую структуру и фокусируют его на входе в магнит B_1 . На рис. 4 показаны поперечные размеры пучка на тракте инжекции.

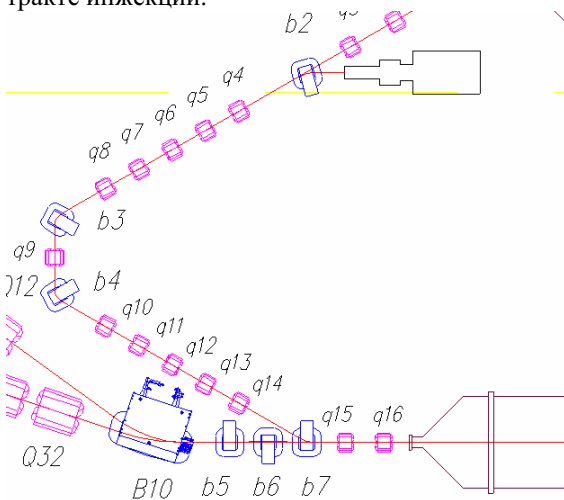


Рис. 3. Магнитооптическая система тракта инжекции.

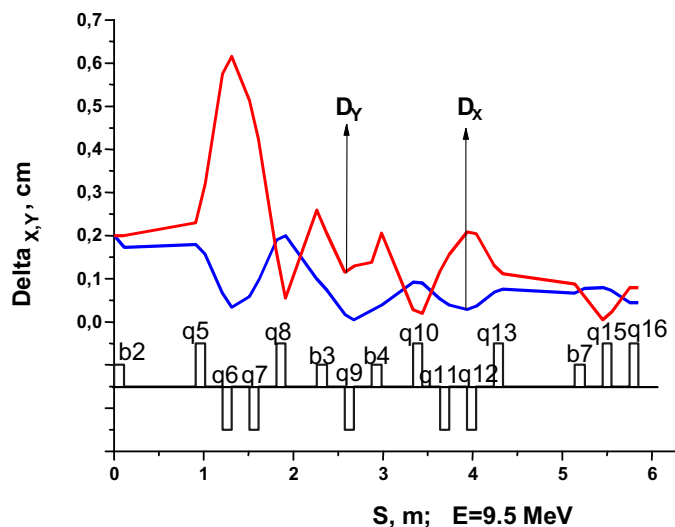


Рис. 4. Размеры пучка на тракте инжекции.

УСКОРЯЮЩАЯ СИСТЕМА

Сверхпроводящие СВЧ системы обладают существенными преимуществами по сравнению с «теплыми»

системами. Вследствие крайне низкого поверхностного сопротивления сверхпроводящих СВЧ структур, рассеиваемая мощность в структуре низкая и более высокие ускоряющие градиенты могут быть легко получены. Это упрощает конструкции узлов для подавления высших типов колебаний в структурах. Малое число требуемых резонаторов и лучшее подавление высших типов колебаний увеличивает порог возникновения пучковых неустойчивостей. Полное энергопотребление сверхпроводящих СВЧ систем является достаточно низким, учитывая даже энергопотребление криогенных установок, необходимых для получения «гелиевых температур», при которых работают ускоряющие структуры.

В настоящее время наиболее пригодными для реализации нашего проекта параметрами обладает сверхпроводящая ускоряющая структура TESLA, разработанная в DESY [21]. Отработана технология массового производства секций, несколько методик обработок поверхности секций, которые позволяют получать в структуре ускоряющий градиент до 35 МВ/м при работе в непрерывном режиме [15, 21]. В реально работающих установках с несколькими секциями в непрерывном режиме получен средний ток 1 мА, что существенно расширяет возможности использования их для решения специфических задач [15], требующих больших средних токов. Характеристики секций стабильны во времени и не снижают параметров при условии соблюдения технологических требований по эксплуатации.

Разработаны и изготовлены несколько типов криомодулей для различного числа секций. Для реализации проекта нами выбран модуль для двух секций, который производится малыми сериями фирмой ACCEL [22]. Модуль разработан на основе конструкции работающего несколько лет в Розендорфе (Германия) ускорителя ELBE. Общий вид модуля приведен на рис. 5. Такой модуль позволяет получить прирост энергии 20 МэВ для среднего тока 1 мА. В линейном ускорителе ускорительного комплекса «SALO» будет использоваться шесть таких модулей. Таким образом, максимальная энергия пучка на выходе ускорителя будет близка к 130 МэВ.



Рис. 5. Ускоряющий модуль [23].

Криомодуль разработан для работы в непрерывном режиме ускорения пучка. Резонаторы располагаются так, что волноводы, подводящие ВЧ мощность, находятся в центре модуля, а узлы настройки каждого резонатора - в противоположных концах модуля. ВЧ мощность для каждого резонатора подается в криомодуль по волноводу и попадает в резонаторы через коаксиальные согласователи с фиксированным коэффициентом связи. Имеется возможность перестраивать коэффициент связи с помощью трехступенчатого поршня, расположенного в волноводе. Непрерывную ВЧ мощность 10 кВт обеспечивают клистронные усилители VKL7811St, изготовителем которых является фирма CRI. Один такой 1,3 ГГц усилитель имеет коэффициент усиления 37 дБ и полосу пропускания 4 МГц.

Модули поставляются фирмой в исполнении «под ключ».

СИСТЕМА ТРАНСПОРТИРОВКИ И ФОРМИРОВАНИЯ ПУЧКА НА МИШЕНИ

Для транспортировки пучка на мишень будут использоваться магнитные элементы первой арки рециркулятора, представленные на рис. 6. Три 36°-ных магнита $B1$, $B2$, $B3$, характеристики которых приведены в работе [15], поворачивают пучок на 108° и направляют пучок в канал $N1$. Расположенные между магнитами $B1$, $B2$ квадрупольные линзы $Q1 - Q3$ обеспечивают ахроматичность пучкового тракта до входа в магнит $BV1$ (изменение размеров пучка вдоль канала представлены на рис. 7-9). Магниты $B4$ и $B5$ используются для вывода пучка в

каналах $N2$ и $N3$. На рис. 7 показаны поперечные размеры электронного пучка на участке от входа в ускоряющую секцию до выхода из магнита $B3$ (на всех рисунках отсчёт расстояния ведётся от точки входа пучка из инжектора в магнит $b2$).

Дипольные магниты, из которых состоит арка $B1 - B5$, и квадрупольные линзы, удовлетворяющих по своим параметрам характеристикам линз $Q1 - Q,6$, переданы в ННЦ ХФТИ Эндховенским университетом [15] и не требуют изготовления. В качестве источников питания этих элементов могут быть использованы существующие машинные агрегаты после модернизации и оснащения их новой системой стабилизации.

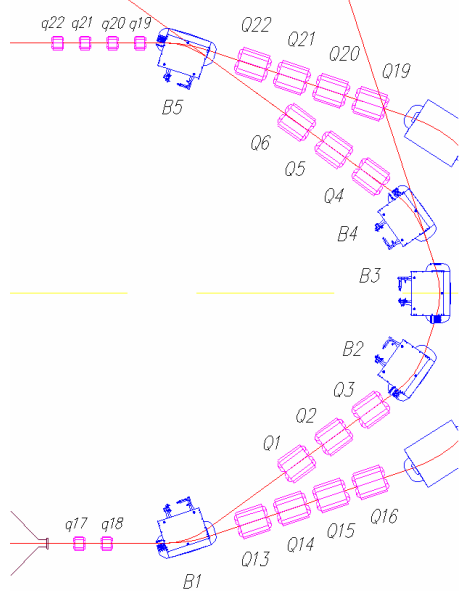


Рис. 6. Магнитооптическая структура первой арки.

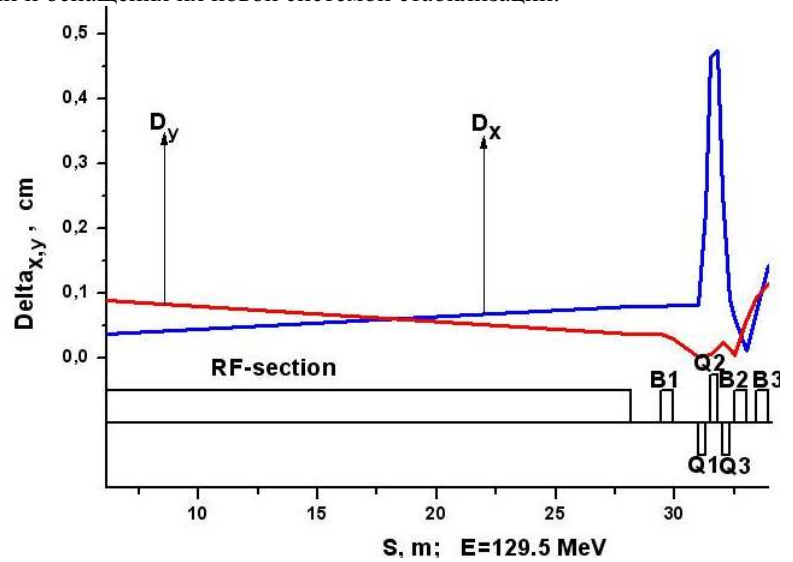


Рис. 7. Поперечные размеры пучка на тракте транспортировки от входа в ускоряющую секцию до выхода из рециркулятора.

Возможные каналы транспортировки $N1, N2, N3$ пучка на подкритическую сборку, показанные на рис. 1, кроме длины, не имеют принципиальных различий, поэтому достаточно рассмотреть транспортировку пучка по одному из них, например, по каналу $N1$.

Два квадрупольных триплета ($N1Q1 - N1Q6$) обеспечивают проводку пучка от магнита $B3$ до магнита $BV1$ на расстояние ~ 58 м со следующими параметрами: максимальный горизонтальный размер $\approx 1,7$ см, максимальный вертикальный размер $\approx 0,25$ см (см. рис. 8 и рис. 9).

Два 45° -ных магнита $BV1, BV2$ (см. рис. 9 и рис. 10) поворачивают пучок на 90° в вертикальной плоскости. При этом сечение пучка на входе в первый поворачивающий магнит минимально и близко к круглому, что обеспечивает минимальную вертикальную апертуру поворачивающих магнитов. Затем пучок электронов мощностью около 130 кВт необходимо провести на нейтронообразующую мишень, расположенную на расстоянии 1,9 м от края магнита $BV2$ (расстояние определяется размерами емкости, в которой предполагается монтировать подкритическую сборку). При этом размеры пучка на мишени должны быть такими, чтобы не допустить перегрева мишени и одновременно минимизировать потери пучка на стенках электропровода. При диаметре мишени 6 см диаметр пучка на ней должен быть равен 5 см. В этом случае потери пучка на стенках вакуумной камеры не превысят 1%.

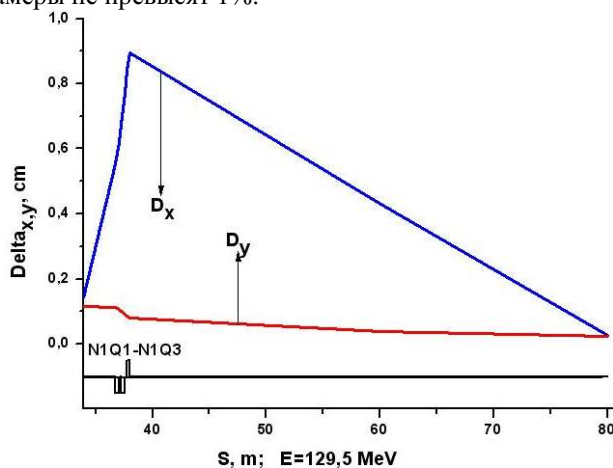


Рис. 8. Поперечные размеры пучка на тракте транспортировки от выхода из рециркулятора до входа в триплет $N1Q4-6$.

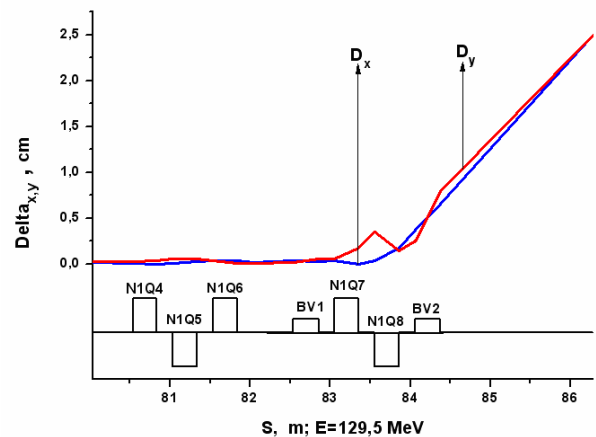


Рис. 9. Размеры пучка на оконечном участке тракта транспортировки пучка на мишень.

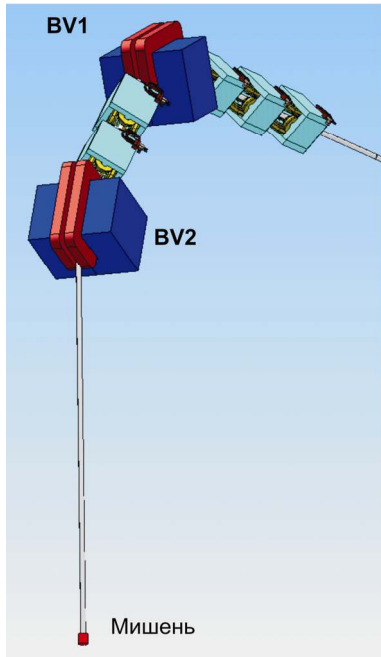


Рис. 10. Поворот пучка на мишень.

Результаты численного моделирования прохождения пучка через магниты *BV1* и *BV2* показали, что при обеспечении требуемых размеров пучка на мишени с помощью только двух триплетов *NIQ1* – *NIQ6* размер пучка в *BV1* магните составляет ~ 4 см, что требует вертикальной апертуры магнитов не менее 5 см. Использование в *BV*-магнитах краевой фокусировки позволяет уменьшить вертикальную апертуру, однако при этом утрачивается возможность регулировки размеров пучка на мишени. В связи с этим, наиболее целесообразно, на наш взгляд, регулировать размеры пучка на мишени с помощью двух линз *NIQ7* и *NIQ8*, расположенных между магнитами *BV1* и *BV2*. В этом случае промежуток за магнитом *BV2* является неахроматическим. При $\Delta E/E \approx 10^{-4}$, как это имеет место в нашем случае, вклад энергетического разброса в размеры пучка на мишени не превышает 1 мм. На рис. 9 приведены поперечные размеры пучка при прохождении участка канала транспортировки от линзы *NIQ4* до нейтронообразующей мишени. Данные кривые и соответствующая им магнитооптическая структура являются типичными для всех предполагаемых каналов.

Проведенные исследования по влиянию стабильности питания магнитных элементов показали, что изменение тока в пределах 10^{-4} , что достижимо реально, не изменяет положения пучка на мишени более, чем на 5 мм.

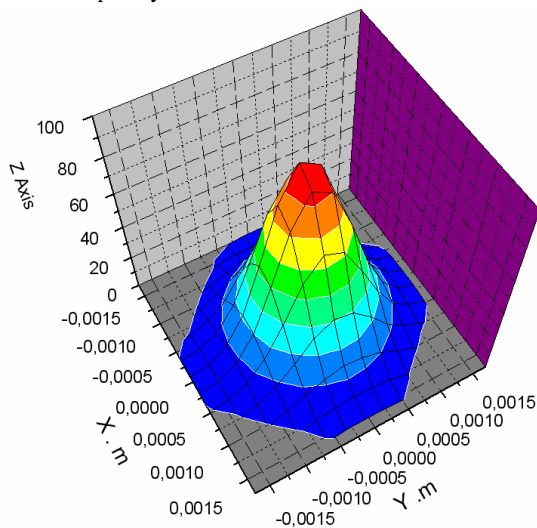


Рис. 11. Распределение плотности пучка на выходе ускоряющей системы.

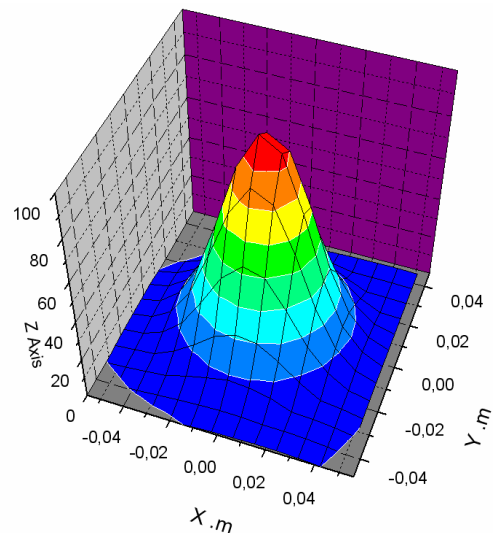


Рис. 12. Распределение плотности пучка на поверхности мишени.

На рис. 11 и рис.12 представлены рассчитанные по программе DECA распределения плотности пучка перед входом в магнит *BV1* и на нейтронообразующей мишени, расположенной на выходе канала транспортировки *NI*.

ВЫВОД ПУЧКА В ЗАЛ SP-103

Наиболее привлекательным, с точки зрения уменьшения стоимости создания установки, является вариант вывода пучка в существующий зал SP-103 в направлении *N4* (см. рис. 1). Размеры зала SP-103 – 29 м на 23,2 м и высота 10 м позволяют разместить систему формирования пучка на мишень, нейтронообразующую мишень, подкритическую сборку и все необходимое для обслуживания сборки и мишени оборудование [13] и полностью исключить капитальное строительство. Радиационная защита стен зала имеет толщину около 6 м, толщина защиты потолка – 2 м. В случае необходимости, после прохождения амбразуры в защите, расположенной на высоте 1,8 м от пола, пучок с помощью дополнительного магнита может быть направлен под углом к плоскости рециркулятора, что позволит увеличить высоту размещения бака с подкритической сборкой по вертикали по отношению к существующему полу помещения. Зал имеет подъемное оборудование, позволяющее перемещать грузы весом до 50 тонн. Для энергоснабжения установки может быть использовано оборудование расположенное рядом энергокомплеса, ранее использовавшегося для питания выходных залов ускорителя ЛУ2000. На расстоянии 50 и 200 м от зала расположены два гелиевых ожижителя, которые могут быть использованы для запуска и наладки оборудования.

Все рассмотренные ранее варианты предполагали использование для работы установки линейного ускорителя комплекса SALO. На рис. 13 представлен самый простой вариант реализации модели энергетической установки на основе существующих залов и электромагнитного оборудования. Сверхпроводящий ускоритель будет состоять из инжектора и 6 ускоряющих модулей, и легко может быть вписан в существующий мишенный зал. Там же будут размещаться клистроны, являющиеся источниками ВЧ питания ускорителя. Для диагностики мощного пучка будут использованы имеющиеся дипольные магниты, которые смогут повернуть пучок на необходимый угол в существующем мишенном зале (см. рис. 14), квадрупольные линзы будут использоваться для формирования пучка на мишени.



Рис. 13. Линейный ускоритель в мишенном зале.

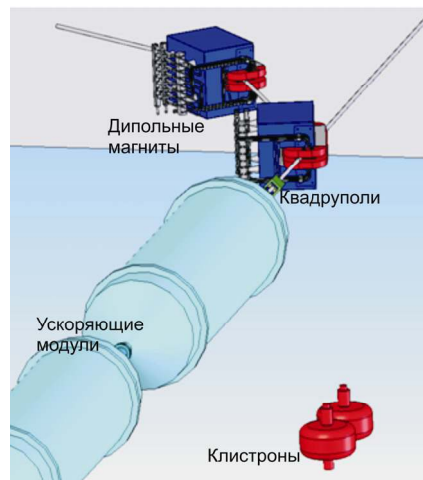


Рис. 14. Система анализа пучка.

ПОТЕРИ ПУЧКА И АКТИВАЦИЯ ОБОРУДОВАНИЯ

Как видно из приведенных выше данных, как горизонтальные, так и вертикальные размеры пучка в системе инжекции, транспортировки и формирования пучка не превышают нескольких миллиметров. При этом вертикальная апертура будет ограничена размером вакуумной камеры в магнитах, которая будет составлять около 22 мм, горизонтальный размер камеры будет не меньше 44 мм. Таким образом, потери пучка в этих трактах будут значительно меньше 1%. Минимальный размер резонатора ускоряющей структуры 70 мм, поэтому потери пучка в ней пренебрежимо малы. Каналы транспортировки пучка будут иметь апертуру не менее 44 мм, поэтому потери пучка будут малы, менее 1%. Наибольшие потери пучка на стенках камеры будут происходить на электропроводе перед мишенью. Для получения минимальной плотности пучка на мишени размеры пучка должны быть максимально близки к размеру мишени. При распределении пучка близком к гауссовскому, часть пучка будет попадать на электропровод вблизи мишени, что легко увидеть из рис.12. Однако существенного вклада в активацию материала канала это не внесёт, поскольку эта часть канала уже находится в поле излучения центральной зоны подкритической сборки. Для уменьшения влияния возможных потерь на активацию оборудования каналов транспортировки в качестве конструкционного материала необходимо выбрать алюминий как материал, при облучении которого не образуются долгоживущие изотопы.

СТОИМОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ

Для оценки стоимости оборудования были проведены прямые консультации с фирмами - производителями оборудования. Стоимость наиболее простого варианта линейного ускорителя с инжектором и источниками ВЧ питания, описанного выше, составила около 10600 тыс. евро. В неё включена также стоимость вакуумной системы, системы транспортировки и формирования пучка, гелиевого рефрижератора.

Для сравнения приведем оценку стоимости оборудования двух «теплых» ускорителей с энергией 21 МэВ 11 кВт, ускоряющая частота 2,8 ГГц, длительность импульса 2 мксек, частота повторения импульсов 170 Гц, - 2450 тыс. долларов и импульсного ускорителя на частоту 1300 МГц, частота повторения импульсов 360 Гц, длительность импульса 8 мксек, энергия 33 МэВ с мощностью в пучке 42 кВт - 2645 тыс. долларов. Ускорители с такими параметрами предполагается использовать для создания исследовательской установки в Idaho Accelerator Center [24].

ВЫВОДЫ

Рассмотренный в работе линейный ускоритель электронов со сверхпроводящими ускоряющими структурами позволит получить квазипрерывный электронный пучок с энергией 100...130 МэВ и средней мощностью пучка на мишени 100-130 кВт. Вместе с использованием нейтронообразующей мишени из обедненного урана такая установка позволяет получить эффективный драйвер для подкритической сборки с полным потоком 5×10^{14} нейтронов/с [17].

Авторы благодарят А.С. Тарасенко за активное участие в работе и обсуждении материалов работы.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. http://www.energoatom.kiev.ua/ua/about_nngc/nngc
2. Carminati F., Klapisch R., Revol J.P., Roche Ch., Rubio J.A., Rubbia C. An Energy Amplifier for Cleaner and Inexhaustible Nuclear energy Production Driven by a Particle Beam Accelerator // Geneva.: 1993. 72c. (CERN/AT/93-47 (ET)).
3. Roche C. and Rubbia C. Some preliminary Considerations on the Economical Issue of the Energy Amplifier, CERN/AT/95-45 (ET).
4. Rubbia C., Rubio J.A., Buono S. et al. Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. CERN/AT/95-44 (ET).
5. Аксёнов В.Л. Нейтронная физика на пороге 21 века // ЭЧАЯ. -2000. -Т. 31. -вып. 6. -С. 1303-1342.
6. Лазарев Н.В., Козодоев А.М. Сверхмощные линейные ускорители протонов для нейтронных генераторов и электро-ядерных установок // Атомная энергия. -2000. -Т. 89. -№6. -С. 440-454.
7. <https://www.sns.gov/aboutsns/aboutsns.htm>
8. Ridikas D., Safa H., Giacri M.-L. Conceptual Study Of Neutron Irradiator Driven By Electron Accelerator // 7th Information Exchange Meeting on Actinide and Fission Product P&T (NEA/OCDE), Jeju, Korea, 14-16 Oct., 2002.
9. <http://nfdfn.jinr.ru/about/history.html>
10. <http://nfdfn.jinr.ru/flnph/iren/iren.html>
11. <http://www.iac.isu.edu/workshops/ADSS2006.html>
12. Sean O Kelly, Brad Hurst, Taylor Green, RACE LP at The University of Texas: Lessons Learned, <http://www.iac.isu.edu/workshops/ADSS2006.html>
13. Матеріали українсько-американського семінару “Установка з підкритичною збіркою, керована прискорювачем часток”. Ukraine-USA Meeting “Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility”. Україна, Харків, 24-25 лютого 2005 / Під ред. Довбні А. М. ННЦ ХФТИ, Харків, 2005. - 246 с.
14. Ayzatskiy M., Dovbnaya A., Mytrochenko V. «Physical study of power electron linac for neutron source»// Proc. of Ukraine-USA Meeting “Accelerator Driven Sub-critical Assembly Facility”, Kharkiv, Feb. 24-25, 2005. - P. 47-66.
15. Arkatov Yu.M., Dovbnaya A.N., Glamazdin A.V., Guk I.S., Kononenko S.G., van der Wiel M., Botman J.I.M., Peev F.A., Tarasenko A.S.. “SALO” PROJECT, NSC KIPT, Kharkiv, 2005. - 104 c.
16. Guk I., Dovbnaya A., Kononenko S., Peev F., Tarasenko A., Jan Botman, Marnix Van der Wiel. Use recirculator "SALO" in the mode of the neutron source //Proceedings 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, Tennessee, May 16-20, 2005. - P. 2354-2356.
17. Bratchenko M.I., Gann V.V., Guk I.S., Dovbnaya A.N., Dyuldy S.V., Kononenko S.G., Peev F.A., Tarasenko A.S., M. van der Wiel, Botman J.I.M. Superconducting driver for sub-critical assembly, Proceedings of the International Conference “Current Problems in Nuclear Physics and Atomic Energy”, May 29 – June 03, 2006 Kyiv, Ukraine, 2007. - P. 622-632.
18. Teichert J., Buetting H., Evtushenko P., Janssen D., Lehnert U., Michel P., Moeller K., Schneider Ch., Stephan J., Lehmann W.-D., Will I., Volkov V. A Superconducting Photo Injector with 3+1/2-cell Cavity for the ELBE Linac //Proceedings of EPAC 2004, Lucerne, Switzerland. - P. 333-335.
19. Arnold A., Buetting H., Janssen D., Lehnert U., Michel P., Moeller K., Murcek P., Schneider Ch., Schurig R., Staufenbiel F., Teichert J., Xiang R., Matheisen A., B. v. d. Horst, Stephan J., Lehmann W.-D., Kamps T., Lipka D., Marhauser F., Volkov V. 1st RF-measurements @ 3.5-cell SRF-photo-gun cavity in Rossendorf //Proceedings of FEL 2006, BESSY, Berlin, Germany. - P.567-570.
20. http://www.accel.de/_struktur/rf_accelerating_units.htm
21. Lilje L. High-gradient superconducting radiofre-quency cavities for particle acceleration //Proceedings of EPAC 2006, Edinburg, Scotland. - P. 2752-2754.
22. Michael Pekeler, Hanspeter Vogel, Peter vom Stein Industrial production of superconducting 1.3 GHZ accelerator modules and components for FEL application //Proceedings of the 2004 FEL Conference. - P. 379-380.
23. Peter vom Stein, Stefan Bauer, Michael Pekeler, Hanspeter Vogel, Robert Bate, Carl David Beard, Douglas M. Dykes, Peter McIntosh, Brian Todd. Fabrication and installation of superconducting accelerator modules for the ERL prototype (ERLP) at DARESBURY //Proceedings of EPAC 2006, Edinburg, Scotland. - P. 178-180.
24. Frank Harmon Accelerators for High Power RACE //Proceedings Fourth Annual Idaho Workshop on Accelerator-Driven Sub-critical System (ADSS) Experiments, April, 11-14, 2006 at Texas A&M University, <http://iac.isu.edu/workshops/ADSS2006.html>

VARIANTS OF USE SUPERCONDUCTING ELECTRON ACCELERATOR SALO AS A DRIVER OF SUBCRITICAL ACCEMPLY

I.S. Guk¹, A.N. Dovbnaya¹, S.G. Kononenko¹, M. van der Wiel², J.I.M. Botman², F.A. Peev¹

¹National Science Centre “Kharkov Institute of Physics and Technology”

1 Academicheskaya St., Kharkov, 61108, Ukraine

²Technische Universiteit Eindhoven

Den Dolech 2, P.O. Box 513, 5600 MB Eindhoven, The Netherlands

The opportunity of making in NSC KIPT the driver using superconducting accelerating structure TESLA is considered. The first variant guesses use as the driver part of equipment of the accelerating complex SALO project. The superconducting RF gun, the channel of transportation and injection of a beam in the accelerating structure, six accelerating modules and magnetic system of the first recirculator arch are used. It is supposed to gain beame with energy 130 MeV and a mean power 130 kw. Possible channels of beam transportation on subcritical assembly are viewed. Variants of focusing beam on a target are analyzed. The second variant guesses framing the linear superconducting accelerator with beam shift in an existing hall where it is possible to dispose subcritical assembly. This variant allows to exclude capital construction completely that will essentially reduce cost of facility.

KEY WORDS: recirculator, electron accelerator, subcritical assembly, superconducting accelerating structure, channel of transportation.