

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

P9-97-333

Ю.Г.Аленицкий*

ИЗОХРОННЫЕ ЦИКЛОТРОНЫ
ДЛЯ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

*E-mail: alen@nusun.jinr.dubna.ru

1997

Изохронные циклотроны для электроядерных технологий

Рассматриваются основные требования к ускорителю, как к части производственного ядерно-энергетического комплекса. Предложен диапазон параметров пучка ускоренных протонов или дейтронов, для получения которых выгодно использовать изохронный циклотрон. Кратко описаны проекты циклотронных установок, разрабатываемых в ЛЯП ОИЯИ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ.

Сообщение Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1997

Перевод автора

Alenitsky Yu.G.

P9-97-333

Isochronous Cyclotrons for Electronuclear Technologies

The main requirements to an accelerator as a part of an electronuclear power plant are considered. The range of the parameters of the accelerated proton and deuteron beams, for which the isochronous cyclotron is the most profitable is proposed. The cyclotron installation projects under development at LNP JINR are briefly described.

The investigation has been performed at the Laboratory of Nuclear Problems, JINR.

1. Введение

Различные концепции управляемых ускорителем ядерных технологий для получения энергии и переработки долгоживущих радиоактивных отходов ядерных реакторов разрабатываются в мире уже более 40 лет /1/. Ускоренный пучок заряженных частиц является дополнительным источником нейтронов для управления реакцией деления. В исследуемых в настоящее время ядерных технологиях требования к пучку ускоренных протонов или дейтронов находятся в широких пределах по току от нескольких единиц до сотен миллиампер при энергии ~ 1 ГэВ и более. Такие пучки можно получить на циклотроне с разделенными магнитными секторами или на линейном ускорителе.

Ускорители в основном использовались как приборы для проведения физических экспериментов. Включение ускорителя в производственный комплекс ускоритель - реактор накладывает особые требования на его технические характеристики, надежность, срок работы, режим эксплуатации, режим ввода в эксплуатацию на низкой и полной мощности, а также на стоимость изготовления установки.

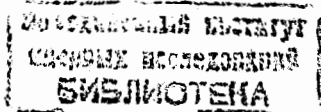
Ниже рассмотрены основные требования к ускорителю, как к части производственного комплекса производства энергии или переработки отходов, и определен диапазон параметров пучка ускоренных частиц, где наиболее выгодно использовать в этих целях циклотрон. Автор не претендует на законченность указанных требований и на полное обсуждение каждого из них, т.к. такие значительные исследования могут быть сделаны только при создании рабочего проекта. Однако по указанным проблемам ниже приводятся данные, которые общепризнаны, в некоторых случаях получены экспериментально и опубликованы в материалах конференций или обзора последних лет.

Кратко описаны также проекты циклотронных комплексов, разработанных в ЛЯП ОИЯИ.

2. Основные требования к ускорителю

2.1. Физико-технические параметры установок

Энергия и интенсивность пучков ускоренных частиц, которые требуются для различных электроядерных технологий, обсуждались во многих работах. По расчету в /2/ требуемый ток пучка протонов составляет $I \approx 18/T$ (мА), где T (ГэВ) - энергия пучка, причем требования на величину тока меняются в пределах $0.6I < I < 1.3I$ в зависимости от изменения коэффициента подкритичности K реактора во времени. На рис.1 представлена зависимость мощности требуемого пучка протонов от K для различных мощностей реактора, взятая из /2/. Здесь пунктирной линией показано положение рабочего пучка циклотрона PSI (1.8 мА, 0.59 ГэВ) и ожидаемого (5мА). Также изображено положение пучка циклотрона ДЦ, разрабатываемого в ЛЯП ОИЯИ (о котором сказано ниже). Видно, что комплекс типа ДЦ вполне удовлетворяет требованиям промышленной установки на мощность ~ 1 ГВт, а на начальном этапе эксплуатации он



может быть использован для работы с реактором мощностью до 100 МВт при К реактора $\sim 0.94 \div 0.96$. Этот результат был получен для твердой (Th или U-Pu) реакторной сборки. В работе /3/ показано, что энергетический усилитель на быстрых нейтронах также требует пучок протонов энергией ~ 1 ГэВ и ток до 10 мА для установки мощностью ~ 1.75 ГВт. В работе /4/ для подпитки каскадного жидко-солевого реактора предлагается использовать циклотрон с мощностью пучка $(1 \div 10)$ МВт. Трансмутация военного плутония, непосредственно на пучке ускоренных протонов, требует интенсивность до 200 мА /5/.

Сильноточный протонный циклотрон секторного типа (PSI, Швейцария) с энергией пучка 590 МэВ работает в настоящее время с током пучка 1.8 мА. На линейных ускорителях получен экспериментально ток ускоренных протонов в импульсе до 300 мА. Принципиально линейные ускоряющие структуры позволяют ускорять значительные токи, однако при непрерывной их работе возникают проблемы погонных потерь, которые не позволяют пока получать требуемые значения среднего тока. Тем не менее на настоящем этапе развития ускорительной техники считается, что для получения тока ускоренных протонов ~ 100 мА и более в одной установке можно использовать только линейный ускоритель, так как максимально достижимый ток в циклотроне (~ 10 мА) ограничен вследствие потерь частиц в процессе вывода. К такому заключению пришли участники семинара ускорительщиков, проходившего на конференции ADTT (г.Калмар, 1995 г.). Такие же параметры циклотронов обсуждаются на последних ускорительных конференциях /6/.

Отметим, что в ЕрФИ предложено разработать так называемый кольцевой коаксиальный циклотрон, который содержит шесть магнитных дорожек одна в другой (коаксиально) с низким уровнем ведущего магнитного поля и большое количество резонаторов (120 шт.), которые создают набор энергии 20 МэВ/оборот. В этом случае ограничение интенсивности по формулам, приведенным в работе /7/, составляет 25 мА и если ускорять параллельно три пучка, то ускоренный ток может достигать 75 мА /8/. В работе /9/ также предложено использовать многорезонаторную систему ускорения со сверхпроводящими магнитами с разделенными функциями фокусировки и поворота. В процессе проработки этих проектов предполагается изучение физико-технических и технологических возможностей создания этих установок.

2.2. Экономическая эффективность

Коэффициент преобразования мощности от сети в мощность ускоренного пучка протонов при токе пучка ~ 100 мА для линака составляет ~ 0.8 , однако при уменьшении тока пучка эффективность значительно падает и при токе пучка 10 мА уже не превышает 0.3 /10/. При этом длина ускорителя определяется требуемой энергией протонов и составляет ~ 1000 м для $E \approx 1$ ГэВ.

Этот же коэффициент для циклотрона составляет $0.5 \div 0.7$ при токе пучка 10 мА /9/, что связано с большей загрузкой током высокочастотного резонатора. Площадь производственного помещения такого циклотрона в несколько раз меньше, чем для линака. Известно, что циклотрон и его

обслуживание намного дешевле линейного ускорителя с аналогичной энергией пучка. Например, циклотрон PSI, построенный в 1974 году, стоил 35 MSFr, а вся установка ~ 134 MSFr /11/. Цена линейного ускорителя LAMPF составляет ~ 1000 M\$ USA. Такая разница в цене связана с тем, что линак оснащен несравненно большим количеством дорогостоящего высокочастотного оборудования. Таким образом, при мощности протонного пучка до 10 МВт, циклотрон является более дешевой установкой, чем линак.

2.3. Экологическое воздействие (потери в процессе ускорения)

Вопрос потерь частиц в процессе ускорения и вывода исключительно важен для токов пучка в миллиамперной области и требует фундаментального компьютерного исследования и экспериментального моделирования. Для пучков ~ 1.8 мА по экспериментальным данным /6/ потери не превышают 0.8 μ А, и активация узлов ускорителя незначительна. Эти экспериментальные результаты получены в PSI, где в ближайшее время планируется увеличить ток пучка до 5 мА путем увеличения напряжения на резонаторах.

В электроядерных процессах, где ток пучка требуется порядка нескольких мА с энергией до 1 ГэВ, вопрос потерь в настоящее время является технологической задачей и требует высокой культуры работы и управления циклотроном, что не тривиально для ускорителя с такими параметрами пучка и вырабатывается в течение многих лет реальной работы с пучком высокой интенсивности.

2.4. Надежность работы и эффективность обслуживания установки

Считается, что срок работы производственного комплекса ускоритель-реактор составляет ~ 50 лет. Циклотрон состоит из двух основных систем - магнитной и высокочастотной, а также из вспомогательных систем управления и обслуживания. Для повышения надежности установки, вспомогательные системы могут быть дублированы. Опыт работы магнитных систем (PSI, TRIUMF, фазотрон ОИЯИ) показывает, что многие годы они работают надежно при соответствующем регламентном обслуживании. Основным источником отказов являются высокочастотные системы. В современных проектах циклотронов используется от 4 до 10 резонаторов с мощными генераторами /5/. В линейном ускорителе таких систем около ~ 300 /10/, что понижает надежность и повышает стоимость обслуживания установки.

Для надежной работы ускорителя требуются остановки для регламентного обслуживания, возможны также аварийные остановки. Вопросы остановок ускорителя требуют изучения в каждом конкретном случае, однако очевидно, что если производственный процесс требует непрерывного производства, то надо иметь "горячее" запасное оборудование. Если один ускоритель не обеспечит непрерывный процесс производства, надо делать несколько установок на один реактор. Например, в проекте Лос-Аламоса /5/ рассматривается работа одного линака на несколько мишеней, но высказывается сомнение по поводу

технологичности и надежности применения в промышленности такой схемы в связи с возможными отказами работы линака.

В работе /12/ отмечается, что с целью равномерного распределения внешних нейтронов по активной зоне и уменьшения мощности пучка одного источника можно, используя несколько ускорителей, вводить ускоренные пучки с разных сторон. Это также повысит надежность работы установки в целом.

2.5. Сроки изготовления и ввода в эксплуатацию

Циклотронный комплекс можно начинать изготавливать в ближайшее время без значительных фундаментальных исследовательских работ. Как отмечалось выше, циклотрон с близкими характеристиками пучка уже работает. В ОИЯИ (НЭОНУ ЛЯП) проведены значительные работы по разработке проектов "Суперциклотрон" и "ДЦ" /13,17/, что позволяет приступить к рабочему проектированию сильноточного циклотрона с мощностью пучка от 1 до 10 МВт. Это даст возможность создания экспериментального ускорителя и реактора с малой мощностью и позволит приступить к отладке и исследованию всего комплекса. Циклотроны позволяют наращивать в процессе своего развития как энергию установки (добавляя следующую ступень), так и ток ускоренных протонов (дейтронов), увеличивая мощность ВЧ-питания.

Из анализа современного технического состояния и возможностей использования ускорителей в электроядерных технологиях следует, что циклотрон:

- наиболее дешевая установка для получения пучков ускоренных частиц мощностью до 10 МВт;
- решены фундаментальные научные проблемы для создания первой промышленной электроядерной установки;
- обладает возможностью увеличения мощности ускоренного пучка в процессе отработки технологии работы всего комплекса;
- при увеличении количества циклотронов и реакторов в одном комплексе появится возможность, перебрасывая пучок с одного объекта на другой, проводить плановые и ремонтные работы при сохранении работоспособности и надежности работы всего комплекса.

3. Проекты секторных циклотронов ЛЯП ОИЯИ

3.1. Суперциклотрон

В ЛЯП ОИЯИ много лет ведутся работы по созданию сильноточных циклотронных комплексов для нейтронных источников. Технический проект ускорительного комплекса "Суперциклотрон", разработанный в ЛЯП ОИЯИ /13/, предназначен для ускорения интенсивных пучков протонов до энергии 800 МэВ. Комплекс состоит из линейного инжектора на энергию 50 МэВ и релятивистского изохронного циклотрона с жесткой фокусировкой.

В качестве инжектора рассматривался линейный ускоритель с квадрупольной высокочастотной фокусировкой /14/. Аналогичный ускоритель протонов УРАЛ-30, является инжектором бустера ускорителя У-70 в ИФВЭ (г.Протвино) и работает с током в импульсе ~100 мА.

Общая схема циклотронной части суперциклотрона с элементами коррекции магнитного поля для создания эффекта расширения орбит и вывода показана на рис.2. Магнитная система суперциклотрона состоит из восьми секторных С-образных электромагнитов со спиральными полюсными наконечниками. Моделирование магнитного поля циклотрона было проведено на одном секторе в масштабе 1 : 15 и на двух секторах в масштабе 1 : 5. Основные результаты моделирования изложены в работе /15/. По результатам моделирования составлено задание на рабочее проектирование ускорителя. Ускоряющая система ускорителя состоит из 4-х прямоугольных резонаторов. На модели резонатора в масштабе 1 : 5 исследовался вопрос возбуждения резонатора несколькими петлями связи. Было показано, что сложение высокочастотной мощности можно осуществить непосредственно в резонаторе. Подобные резонаторы в настоящее время работают на установке PSI и обеспечивают ускоряющее напряжение 730 кВ, разрабатывается резонатор с напряжением ~1МВ.

Основные параметры суперциклотрона и соответствующие параметры PSI приведены в таблице 1.

Таблица 1. Параметры суперциклотрона и циклотрона PSI

	суперциклотрон	PSI
Энергия ускоренных протонов (МэВ)	800	590
Ток ускоренных протонов (мА)	1 и более	1.4 (1995г.)
Энергия инжектируемых протонов (МэВ)	50	72
Частота радиальных колебаний (Qr)	1.15÷1.9	1.05÷1.55
Частота аксиальных колебаний (Qz)	1.35÷1.45	0.9 ÷ 0.8
Среднее магн. поле на конечном рад. (Т)	0.75	0.87
Набор энергии за оборот (МэВ)	2.0	2.2 - (4.0)
Количество резонаторов	4	4
Напряжение на основном резонаторе (кВ)	500	550 (1000)
Мощность ВЧ-потерь в резонаторах(МВт)	1.0	0.8
Число секторов	8	8
Вес магнитной системы (т)	5000	1990
Мощность питания магн. сист. (МВт)	1.76	0.67

Решение проблемы экологической чистоты циклотрона практически состоит в разработке высокоэффективного вывода пучка, при котором теряется не более ~5 мкА ускоренных протонов при любом токе основного пучка. Для суперциклотрона рассматривался метод вывода, основанный на эффекте расширения замкнутых орбит /16/, который создается специально сформированным магнитным полем. Система корректирующих и отклоняющих магнитов для создания эффекта расширения орбит показана на рис.2. На рис.3 представлены результаты численного расчета динамики

протонного пучка для эмиттансов $\epsilon_T = 2\pi$ мм×мрад и $\epsilon_Z = 8\pi$ мм×мрад. Из расчета следует, что в созданном магнитном поле и при наборе энергии 2 МэВ/оборот эмиттансы пучка разделяются на несколько сантиметров в течение 2÷3 оборотов почти без искажения их формы, что позволит установить в указанном месте отклоняющий септум и вывести пучок без потерь.

Видно, что в основном параметры циклотронов близки, т.к. проекты выполнены в 70-х годах. В настоящее время считается /7/, что для увеличения тока пучка и вывода без потерь нужно увеличивать набор энергии на оборот, поэтому в современных проектах увеличивается, как правило, количество секторов и резонаторов.

3.2. Дейтронный циклотрон (ДЦ)

В проекте “Дейтронный циклотрон” (ДЦ) предполагается ускорять дейтроны до энергии 1600 МэВ /17/. Циклотронный комплекс состоит из трех ускорителей: линейного инжектора на 15 МэВ и двух секторных циклотронов на 90 и 1600 МэВ со сверхпроводящими обмотками /18/. Схема циклотронного комплекса приведена на рис.4, основные параметры в таблице 2.

Таблица 2. Основные параметры циклотронного комплекса ДЦ1-ДЦ2

Параметры пучка	ДЦ-1	ДЦ-2
Энергия инъекции/вывода (МэВ)	15 / 100	100 / 1600
Радиус инъекции/вывода (м)	0.47 / 1.11	2.42/6.6
Частота радиальных колебаний	1.22 ÷ 1.25	1.11 ÷ 2.0
Частота аксиальных колебаний	1.13 ÷ 1.32	1.39 ÷ 1.43
Орбитальная частота (МГц)	12.375	6.187
Магнит		
Максимальное/среднее поле на радиусе вывода (Т)	4.26 / 1.53	4.0 / 1.59
Число секторов магнита	4	10
Угол спирали на радиусе вывода (°)	0	49
Ускоряющая система		
Гармоника ускорения	6	12
Число резонаторов/зазоров на оборот	2 / 4	6 / 6
Набор энергии на оборот (МэВ)	1.0	2.4 ÷ 4.2
Максимальное напряжение (кВ)	300	600
Потери энергии на резонатор (кВт)	60	500

Магнитная система первого циклотрона представляет собой четыре С-образных магнита со сверхпроводящей овальной обмоткой, намотанной на ферромагнитный сердечник и уложенной в корпус из нержавеющей стали. Общий вид одного сектора приведен на рис.5. В настоящее время заканчивается подготовка экспериментальной установки, содержащей макет секторного магнита с двумя (из восьми) токовыми модулями. В экспериментальном зале также расположены системы криообеспечения,

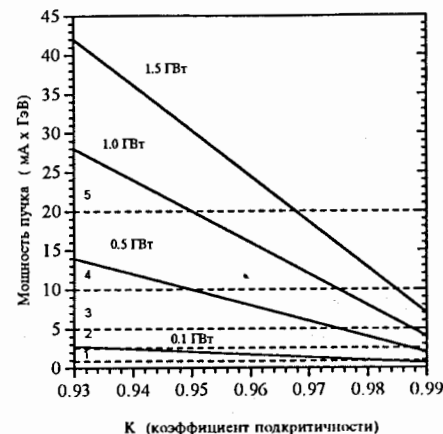


Рис.1. Зависимость мощности пучка от коэффициента подкритичности для реакторов различной мощности (сплошные линии). Пунктирные линии соответствуют мощности пучка циклотронов: 1 - PSI (1.8 мА, 0.59 ГэВ); 2 - PSI (5.0 мА, 0.59 ГэВ); 3 - ДЦ (2.5 мА, 1 ГэВ/нукл); 4 - ДЦ (5.0 мА, 1 ГэВ/нукл); 5 - ДЦ (10.0 мА, 1 ГэВ/нукл)

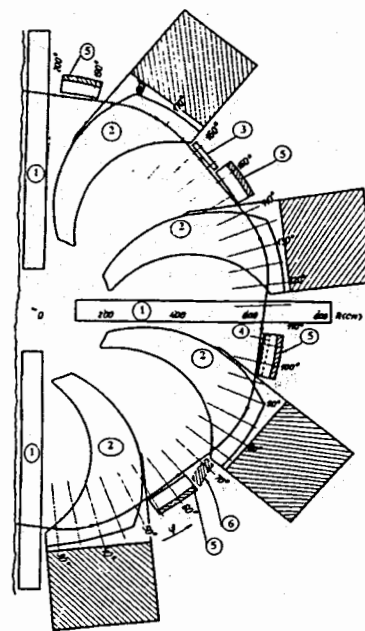


Рис. 2.Схема ускорителя проекта “Суперциклотрон”. 1 - резонаторы, 2 - секторные магниты, 3,4,5,6 - элементы системы вывода

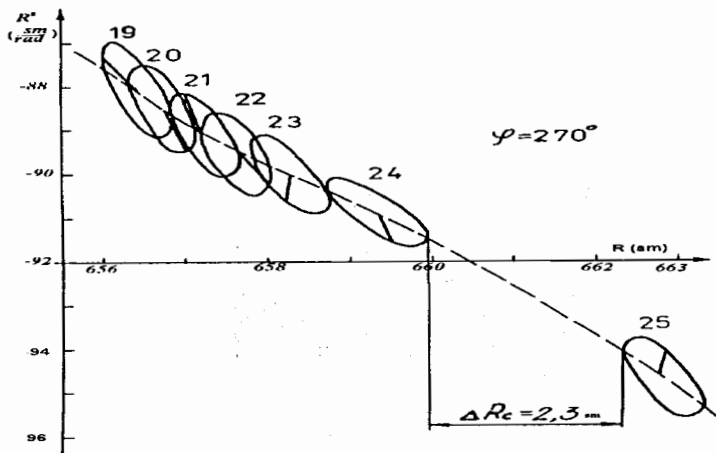


Рис. 3. Численный расчет эмиттанса пучка в зоне вывода на азимуте 270° .
Числами указаны расчетные номера оборотов

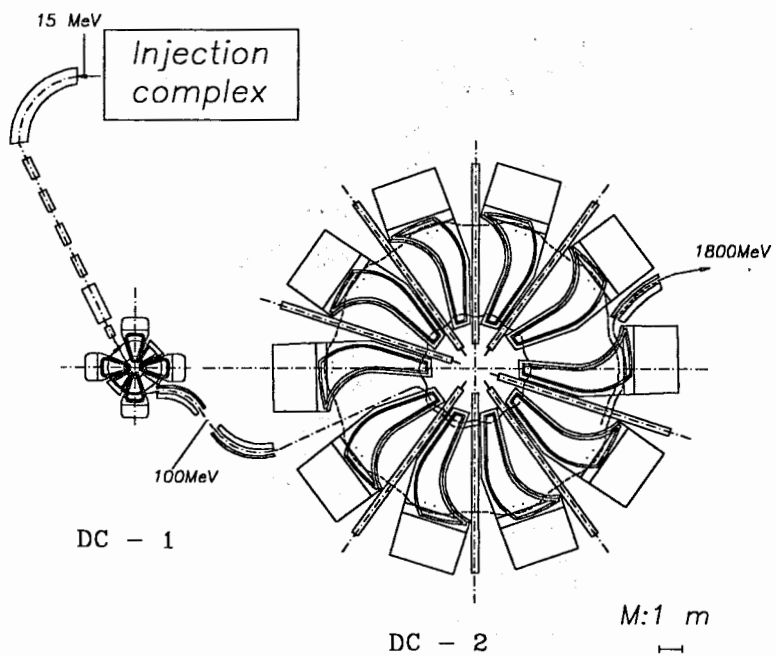


Рис.4. Схема дейтронного циклотронного комплекса ДЦ-1 ÷ ДЦ-2

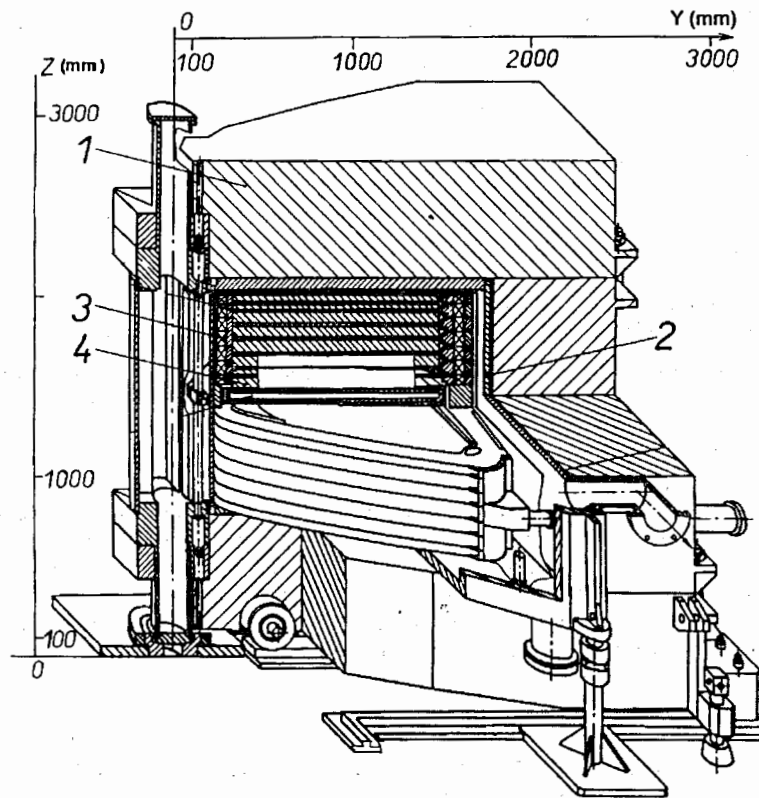


Рис. 5. Схема секторного магнита. 1 - ярмо, 2 - вакуумная камера,
3 - корпус обмотки, 4 - сверхпроводящая обмотка

электропитания и диагностики с управлением от ЭВМ. На этой установке проводятся экспериментальные работы по захлаживанию, запитке током и выводу энергии. Также предполагается экспериментально проверить методику формирования требуемого магнитного поля.

Из работы /19/ следует, что на один ускоренный дейтрон рождается примерно в 2.2 раза нейтронов больше, чем на ускоренный протон с одинаковой энергией на нуклон. Другими словами, ускоренный пучок дейтронов с током 10 мА по выходу нейтронов эквивалентен ускоренному пучку протонов с током 20 мА при одинаковой дефокусировке пространственным зарядом. Это есть одна из основных причин, по которой предложено ускорять дейтроны. Естественно, в этом случае жесткость магнитной системы ($B \times R$) должна быть увеличена в два раза. Что привело к решению использовать сверхпроводящие обмотки при температуре 4.5 К.

В заключение отметим, что, по нашему мнению, многолетний спор о лидерстве линака или циклотрона для электроядерных установок не состоялся. Дело в том, что эти ускорители дополняют, а не исключают друг друга. В настоящее время, как отмечается в работе /12/, необходимо приступить к разработке экспериментального комплекса реактор - ускоритель для моделирования промышленной установки на небольшом уровне мощности. В ближайшие годы это должен быть реактор - циклотрон, так как только циклотрон может быть изготовлен за несколько лет с пучком небольшой мощности для отработки технических вопросов. Начало работы по этим проблемам и успешные эксперименты дадут дополнительный импульс к развитию сильноточных ускорителей.

Литература

1. В.Г. Васильков, В.И. Гольданский, В.П. Джелепов, В.П. Дмитриевский, АЭ, 1970, т.29, вып.3, с.152.
2. C.Rubbia, J.A.Rubio "A tentative program towards a full scale energy amplifier" CERN/LHC/9-11(EET) and CERN/LHC/97-001(EET)
3. В.П. Дмитриевский, "Электроядерный метод получения энергии" ЭЧАЯ, 1997, т.28, вып.3, с.815-836.
4. П.Н. Алексеев, В.В. Игнатъев и др. "Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности" Атомная энергия, т.79, вып.5, ноябрь 1995.
5. F. Venneri, "The Physics design of ADT system", Working material "Status of the accelerator - driven system (ADS)", Reproduced by the IAEA, Vienna, Austria, 1996, 622-I3-CT2065, p.348.
6. U.Schryber et al., "High power operation of the PSI - accelerators". Proceedings of the 14-th Int. Conf. on Cyclotrons, Cape Town, South Africa, 1995.
7. W.Joho, 9-th Int. Conf. on Cyclotrons, Caen, France, 1981, p. 337-347.
8. A.Tumanian et al, "Coaxial ring cyclotron as a perspective nuclear power engineering machine", preprint YRPHI-1995(6)-95, Yerevan, 1995.

9. И.А. Шелаев, "Сверхпроводящий циклотрон с разделенными орбитами для электроядерного реактора", Краткие сообщения ОИЯИ, 5[62]-93, Дубна, 1993.

10. G.P. Lawrence, "Los Alamos High-Power proton linac designs", Proceedings of ADTT-1 Conf., Las-Vegas, USA, 1994.

11. Proceedings of the 14th Int. Conf. on Cyclotrons, Cape Town, South Africa, 1995, List of Cyclotrons Num. C-57, p.752.

12. В.Н. Михайлов, "Мощные пучки нейтронов с использованием ускорителей", Краткие сообщения ОИЯИ, No.6(80)-96, стр 17-22.

13. A.A. Glazov et al., Proceed. of Y Conf. of Accelerators, Dubna, 1976, vol.1, p.123, M., Science, 1977.

14. I.M. Kapchinskiy, V.A.Tepliakov, PTE, №2, 19, 1970.

15. N.L. Zaplatin, E.V. Samsonov, A.F. Chesnov, preprint JINR 9-11533, 1978, and preprint JINR 9-83-289, 1983.

16. V.P. Dmitrievsky et al, 9th Int. Conf. on Cyclotrons, Caen, France, 1981. p. 505-508.

17. Yu.G. Alenitsky et al., "High current deuteron cyclotron complex", Dubna, 1996, E9-96-370. Submitted to Int. Conf. (ICENES 96), June 24-28, 1996, Obninsk, Russia.

18. Yu.G. Alenitsky et al., "Superconducting C-shaped magnet for deuteron cyclotron DC-1", ICEC 15 Proceedings, Cryogenics, 1994, Vol 34, p.667-671.

19. Dyachenko V.N. et al., JINR Rapid Communications, 2[53]-92, Dubna, 1992, p.5.

Рукопись поступила в издательский отдел
5 ноября 1997 года.