

P9-2002-224

Ю. Г. Аленицкий

**СИЛЬНОТОЧНЫЙ ЦИКЛОТРОН
ДЛЯ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ СБОРКОЙ**

**Направлено в оргкомитет конференции RUPAC'02,
г. Обнинск, 1–4 октября 2002 г.**

Введение

Приводятся некоторые новые данные в поддержку предложения создания сильноточного циклотронного комплекса для управления электроядерной сборкой, изложенного на XVII Совещании по ускорителям заряженных частиц [1].

Во многих работах (например, [1-3]) показано, что большую энергетику будущего необходимо строить на использовании ядерной энергии деления тяжелых ядер. По оценкам [2-5] разведанных запасов ядерного топлива на Земле для нужд человечества хватит на $\sim 4 \cdot 10^9$ лет в то время как углеводородное топливо будет исчерпано в ближайшие 100 – 300 лет.

По мнению, изложенному в докладе [5], ядерная энергетика экологически наиболее чистый способ производства энергии. Вместе с тем на современных реакторах в процессе работы используют только несколько процентов ядерного топлива и в отработанных топливных элементах получают долгоживущие актиниды, которые не перерабатываются.

Важнейшие научные проблемы, которые необходимо решать в ядерной энергетике, – это безопасность ядерных реакторов при использовании самоподдерживающейся цепной реакции и переработка долгоживущих радиоактивных делящихся веществ (РДВ), полученных в отработанном топливе.

Первая проблема связана с разработкой новых типов реакторов с повышенной степенью безопасности. Вторая решается путём ядерной переработки радиоактивных отходов с помощью нейтронных генераторов, которые базируются на ускорителях заряженных частиц.

1. Управляемые ускорителем ядерные сборки

Рассмотрим три технологии переработки РДВ, которые используют внешний источник нейтронов для управления ядерной реакцией:

- трансмутация (TR)– это помещение РДВ в нейтронный поток, полученный на мишенях непосредственно от ускоренного пучка [6];
- энергетические усилители (ЕА), где количество нейтронов, рожденных ускоренным пучком на мишени из тяжелых металлов, увеличивается в 30-100 раз при распаде тяжелых ядер (отметим, что в этих технологиях перерабатываются в основном твердые материалы — тяжелые металлы [U, Th, Pu]) [7];
- жидкосолевые каскадные сборки (MSR-B), в которых рабочим веществом являются фториды различных РДВ, у которых температура расплава ~ 600 °С (в расплав могут добавляться соли различных РДМ) [8].

Оценки требуемой мощности ускоренного протонного пучка для получения в сборке соответствующей тепловой мощности показаны на рис. 1 (данные для построения графика для каждой технологии взяты из работ [6,7,8], как отмечено на рис. 1), коэффициент подкритичности сборки при этом $K_{эфф} = 0.95$. Считается, что промышленное производство экономически выгодно, если мощность одного блока составляет $\sim 1 - 4$ ГВт, на верхней горизонтальной шкале "мощность сборки" выделена область промышленная зона (пром. зона). Предполагаем, что тепловая мощность экспериментальной установки должна быть в диапазоне 10 – 200 МВт – на рисунке выделена область экспериментальной зоны (эксп. зона). На шкале справа показана область мощности циклотронного пучка, на который можно рассчитывать в ближайшее время. Видно, что в зависимости от выбранной технологии ядерной сборки мощность циклотронного пучка достаточна как для экспериментальной установки, так и для промышленного производства энергии для жидкосолевой технологии.

Отметим, что топливный цикл продолжается несколько десятилетий и в течение всего этого времени ускоритель должен работать непрерывно и стабильно. Понятно, что ускоритель требует регламентного обслуживания, при котором необходимо выключать пучок, такую возможность можно обеспечить, если в промышленный комплекс входит два ускорителя, в этом варианте важнейшим параметром является стоимость ускорителя, которая для циклотрона значительно меньше, чем для линейного. К примеру – стоимость циклотрона PSI составляет ~100 млн долл. США (оценка сделана в 2002 году).

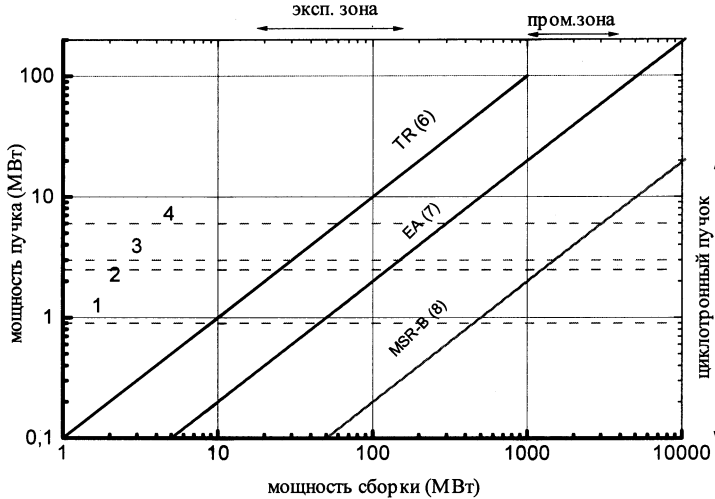


Рис 1. Зависимость требуемой мощности ускоренного пучка протонов от тепловой мощности сборки для трех технологий (см. текст). Пунктирными линиями показаны мощности пучков: 1- PSI (существующий пучок) 1.8мА, 0.5ГэВ; 2- PSI , 5.0 мА; 3- СЦД – 5 мА, 0.6ГэВ/нукл.; 4 – СЦД - 10мА

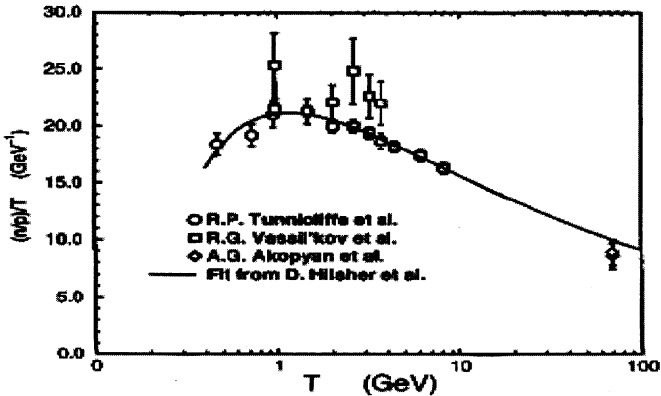


Рис.2. Количество нейтронов, полученных на один протон в зависимости от энергии налетающих протонов, нормированное на 1 ГэВ

В работе [9] показано, что выход нейтронов в зависимости от энергии ускоренного пучка протонов, нормированный на энергию 1 ГэВ, оптимальный при $E_p \sim 600$ МэВ, причем дальнейший рост нейтронного потока можно получить увеличением энергии или интенсивности пучка протонов (см. рис.2). Стоимость циклотронной установки, а особенно помещения значительно растет с увеличением конечной энергии, поэтому выгоднее несколько снизить конечную энергию и в соответствии с этим выбрать мощность экспериментальной сборки.

2. Некоторые результаты расчетного и экспериментального изучения влияния пространственного заряда пучка

В НЭОНУ ЛЯП, для увеличения интенсивности существующего фазотрона на энергию протонов $E_p = 680$ МэВ исследуется возможность инжекции протонного пучка с энергией $E_p = 5$ МэВ и интенсивностью $I_p = 30$ мА [10]. Для циклотрона инжектора было проведено численное моделирование влияния пространственного заряда пучка на динамику движения [11]. В результате показано, что вплоть до тока пучка 30 мА сохраняется радиальное разделение орбит на последнем обороте в циклотроне (рис.3). Вертикальная апертура пучка также сохраняется в допустимых пределах. Указанные работы расчетные и требуют дальнейшей оценки и экспериментальной проверки.

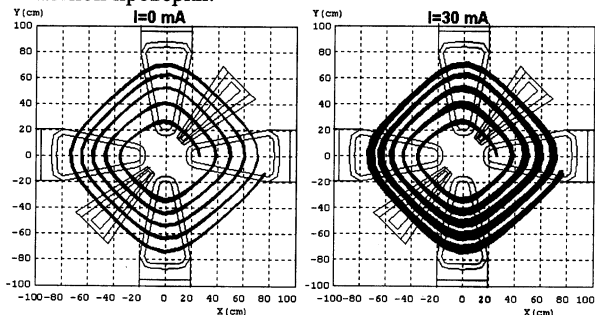


Рис.3. Вид в плане на орбиты 5000 частиц при разной интенсивности пучка

В работах [12,13], выполненных на циклотроне PSI, показано, что при определённых начальных условиях, для пучка протонов со средней интенсивностью 2 мА для каждого банча под влиянием сил магнитной фокусировки и объёмного электрического заряда возникает самофокусирующийся шаровой сгусток. В экспериментах на циклотроне PSI сформированный шаровой сгусток ускоряется в инжекторе PSI-2 до энергии 72 МэВ, при этом нет необходимости включать flat-top резонаторы. Более того, когда резонаторы третьей гармоники (flat-top) включали согласованно по фазе с основными ускоряющими резонаторами, то наблюдалось увеличение набора энергии пучка за оборот, при этом фазовая протяженность банча на выводе составляла 2° ВЧ.

3. Проекты сильноточных циклотронов

В настоящее время изучается несколько схем циклотронных комплексов для управления под критическими сборками.

3.1 Трехстадийный циклотрон — предложение CERN

Схема ускорительного комплекса (рис.4.) разработанного в CERN [14] состоит из трёх ступеней и предусматривает все три ступени - циклотроны. На начальном этапе

влияние пространственного заряда максимально и ожидаемое ограничение по току составляет 5 мА, поэтому предполагается одновременная работа двух циклотронов инжекторов.

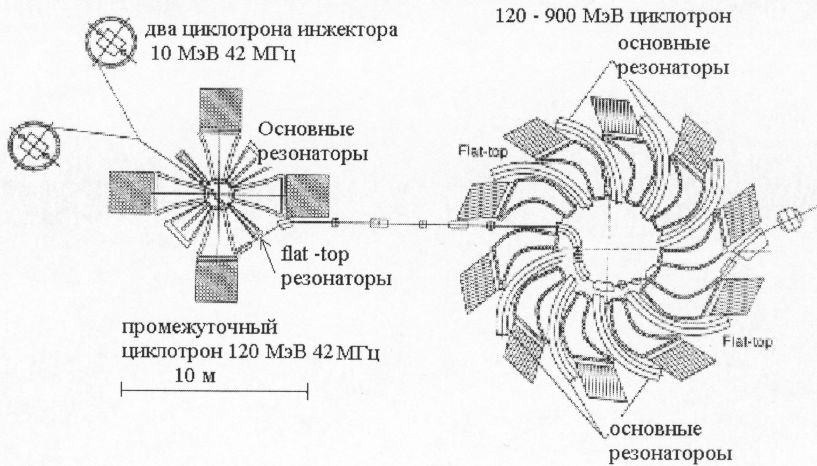


Рис.4.Схема циклотронной установки, предложенная в CERN

3.2 Циклотрон для ускорения H_2^+ - предложение из Италии

В работе [15] предполагается ускорять частицы H_2^+ до энергии 1ГэВ/нуклон, конечное циклотронное кольцо состоит из 12 сверхпроводящих секторных магнитов с S – образной обмоткой. Энергия связи электронов в ионах H_2^+ в 20 раз больше, чем в

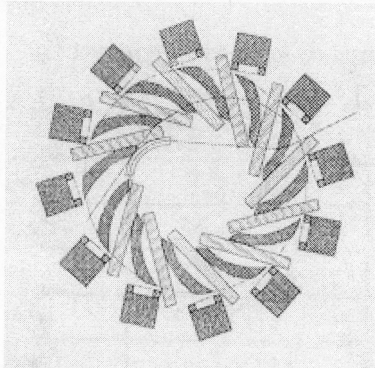


Рис.5.Схема конечного циклотронного кольца проекта, изучаемого в Италии

H⁺ ионе, что позволяет ускорять эти ионы в магнитном поле до 4 Т. Магнитная система рассчитана по трёхмерной программе, схема конечного циклотрона показана на рис 5. Многооборотный вывод с помощью диссоциации частиц H₂⁺ на тонкой мишени даёт возможность 100% вывода пучка ускоренных протонов, и не требует разделения орбит ускоренного пучка в зоне вывода.

3.3 Сверхпроводящий магнит с пятью зазорами - предложение США

В работе [16] предлагается, для управления ториевой сборкой с мощностью 1 ГВт, где требуется протонный пучок мощностью 10 МВт, в зазоре восьмисекторной магнитной системы создать пять параллельных областей для ускорения в каждой по одному пучку с интенсивностью 2 мА. Каждая область ускорения аналогична циклотрону PSI.

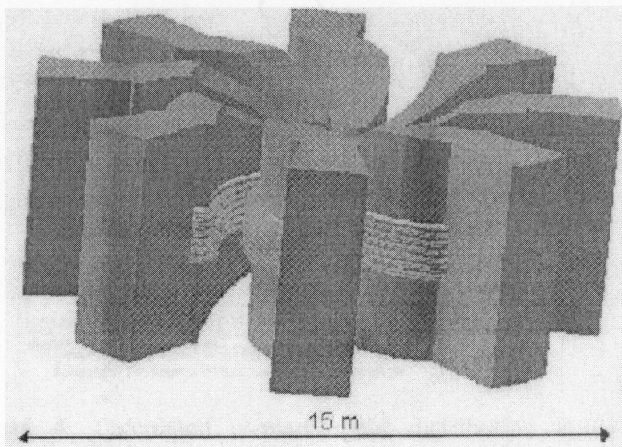


Рис.6.Схема конструкции конечного циклотрона, предложение США [15]

В работе проведен расчет такой магнитной системы по программе Opera 3D и показано, что можно создать в каждом зазоре изохронное магнитное поле. Общий вид конструкции показан на рис.6. Похожее предложение докладывалось И.А.Шелаевым несколько лет назад в работе [17].

3.4 Проект Отдела новых ускорителей ОИЯИ, Дубна

В Отделе новых ускорителей в Дубне предлагается приступить к проектированию [1] циклотронного сильноточного комплекса на энергию 600 МэВ и интенсивностью до 10 мА, схема показана на рис. 7. Если учесть результаты экспериментальных работ и расчетов в PSI, то число ускоряющих резонаторов надо увеличить до 8 шт при этом возрастёт набор энергии и допустимый максимальный ток частиц.

Заключение.

В настоящее время комплекс циклотронов в Швейцарии PSI является единственным ускорителем в мире, где получен пучок протонов со средней мощностью 1 МВт. Обнаруженный и исследованный там же эффект самофокусировки пучка с током 2 мА указывает, что на циклотроне возможно получить ускоренный пучок протонов до 10 МВт. В работах [12,15], и в других утверждается, что циклотроны являются наиболее надёжными и экономически выгодными ускорителями

для экспериментальной энергетической установки по управлению ядерной сборкой. Создание такого научно-производственного комплекса даст толчок к развитию сильноточных ускорителей разных типов и их использованию в энергетике.

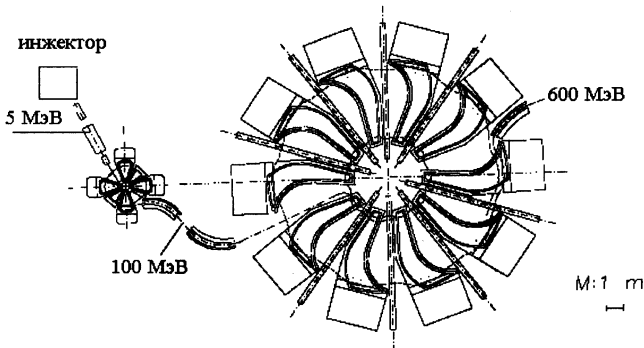


Рис. 7. Схема циклотронного комплекса, предложение ОНУ ОИЯИ, Дубна

Литература:

1. Ю.Г.Аленицкий, С.Б.Ворожцов, и др.” Сильноточный циклотронный комплекс для электроядерного метода получения энергии (предложение для проектирования)”, Материалы XVII Совещание по ускорителям заряженных частиц, окт. 2000г, ИФВЭ, Протвино,2001, Т.2,с.145 – 148.
2. Субботин В.И., Ускорители могут сделать ядерную энергетику более безопасной. ОИЯИ Р1-99-97.
C.Roche; C.Rubbia. Some preliminary Consideration on the Economical Issue of the Energy Amplifier, CERN/95 – 45 (ET).
3. В.А.Бомко, И.М.Карнаузов, В.И.Лапшин, “Усилитель мощности – основа ядерной энергетики XXI века”, обзор-Харьков, ННЦ ХФТИ, 2001.-52.
4. W. Gudovski. Why Accelerator – Driven Transmutation of Wastes Enables Future Nuclear Power?, XX Int.Linac Conf. Proceeding, Monterrey, California, 2000.
5. H.Blix. Nuclear Power in Perspective. Proc. of the II Int. Conf. on ADTT, June 1996, Kalmar, Sweeden vol.1,p.2-10.
6. Михайлов В.Н. Мощные пучки нейтронов с использованием ускорителей. Краткие сообщения ОИЯИ, №6[80]-96, 17 –22.
7. Дмитриевский В.П., Сергеева Н.В.. Подкритичность мишени из обогащённого урана изотопом 235, ОИЯИ, Р9-98-73, Дубна, 1998.
8. Алексеев П.Н., и др. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности. АЭ, том 79, вып.3, ноя, 1995, с.327-337.
9. J.M.Lagnier. Review of LINAC and Beam Transport Systems for Transmutation, EPAC-98,p.93.
10. О.Н.Борисов, Л.М.Онищенко, ОИЯИ, Р9-97-282, Дубна,1997.
11. Л.М.Онищенко, Е.В.Самсонов и др. Численное моделирование эффектов пространственного заряда в секторном циклотроне. Материалы международного семинара по динамике и оптимизации пучков, СПб, июнь 2002.(в печати).

12. Th.Stambach, S.Adam et al. The PSI 2mA beam and future application. Villigen, PSI, Switzerland, Proceedings of Cyclo2001,East Lansing, USA,p423.
13. PSI annual report 2000, Vol 6.
14. N.Fietier, P.Mandrelon. A Three – Stage Cyclotron for Driving the Energy Amplifier. CERN/AT/95-03(ET)
15. L.Calabretta et al. “ A superconducting ring cyclotron to deliver high intensity proton beams”, Catania, Italy, Proceedings of EPAC 2000,Vienna, Austria.
16. G.Kim et al. “A superconducting isochronous cyclotron stack as a driver for a thorium – cycle power reactor” , Texas A&M University, USA, Proceedings of Cyclo2001,East Lansing, USA,p,437.
17. И.А.Шелаев – Краткие сообщения ОИЯИ, N5[62]-93, Дубна, 1993, с.16.

Получено 27 сентября 2002 г.

Аленицкий Ю. Г.
Сильноточный циклотрон
для управления электроядерной сборкой

P9-2002-224

Обсуждается предложение по созданию сильноточного циклотронного комплекса для управления электроядерной сборкой, изложенное на XVII Совещании по ускорителям заряженных частиц. Рассматриваются некоторые изменения в основных проектных параметрах ускорителя с учетом новых результатов, полученных в работах последних лет. Показано, что циклотронный комплекс в настоящее время наиболее реальный и дешевый ускоритель для получения пучков протонов мощностью до 10 МВт. Изложены предложения по созданию сильноточных изохронных циклотронов для управления подкритическими сборками.

Для экспериментальной ядерной сборки, управляемой ускорителем, с тепловой мощностью 10–200 МВт, предлагается создать циклотронную установку с током пучка до 10 мА и энергией протонов $E_p \sim 600$ МэВ.

Работа выполнена в Лаборатории ядерных проблем им. В. П. Дзелепова ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2002

Перевод автора

Alenitsky Yu. G.
High-Current Cyclotron to Drive an Electronuclear Assembly

P9-2002-224

The proposal on creation of a high-current cyclotron complex for driving an electronuclear assembly reported at the XVII Meeting on Accelerators of Charged Particles is discussed. Some changes in the basic design parameters of the accelerator are considered in view of new results obtained in the recent works. It is shown that the cyclotron complex is now the most real and cheapest accelerator for production of proton beams with a power of up to 10 MW. Projects on design of a high-current cyclotron complex for driving an electronuclear subcritical assembly are presented.

For an experimental nuclear assembly driven by the accelerator with a thermal power of 10–200 MW it is proposed to create a cyclotron complex with a proton beam current of up to 10 mA and energy $E_p \sim 600$ MeV.

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

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2002

Редактор *М. И. Зарубина*
Макет *Н. А. Киселевой*

Подписано в печать 09.12.2002.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 0,44. Уч.-изд. л. 0,65. Тираж 280 экз. Заказ № 53655.

Издательский отдел Объединенного института ядерных исследований
141980, г. Дубна, Московская обл., ул. Жолио-Кюри, 6.

E-mail: publish@pds.jinr.ru
www.jinr.ru/publish/