

Сильноточный циклотронный комплекс для электроядерного метода получения энергии (предложение для проектирования)

Ю.Г. Аленицкий, С.Б. Ворожцов, А.А. Глазов, В.П. Дмитриевский Н.Л. Заплатин, В.В. Калинин, Н.А. Морозов, Л.М. Онищенко, Н.А. Русакович
Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

Обсуждаются перспективы развития электроядерного метода получения энергии. Предварительные оценки показывают, что использование ускорителей с мощностью пучка протонов 1–10 МВт дает возможность получать тепловую мощность подкритической сборки до 1 ГВт. В этом случае в качестве делящихся материалов используются Th^{232} [1] или U^{238} [2], запасы которых существенно превышают запасы элементов, используемых в ядерной энергетике в настоящее время (U^{235} , U^{233}). Долгоживущие осколки, полученные в ядерных реакциях деления в подкритической сборке, остаются в нейтронном поле, что способствует их распаду.

Предлагаемый ускоритель – циклотронный комплекс – в настоящее время является самой дешевой и надежной установкой для получения протонных пучков мегаваттной мощности. Максимальный ток ускоренных протонов на циклотроне PSI (Швейцария) составляет 1.8 мА ($E = 590$ МэВ), что говорит о том, что для получения таких пучков на циклотроне принципиальные физические проблемы решены.

Основные параметры выбраны с учетом опыта создания в 80–90-е годы проекта “Суперциклотрон”. Предлагаемый комплекс состоит из трёх изохронных циклотронов с конечными энергиями протонов соответственно равными 15; 60 и 800 МэВ. Магнитные и ВЧ-системы первых двух циклотронов аналогичны – 4-секторные С-образные теплые электромагниты с четырьмя в первом и двумя во втором ускоряющими Δ -электродами. В третьем циклотроне магнитная система состоит из десяти теплых секторных электромагнитов, а ускоряющая – из шести плоских однозональных резонаторов на основной гармонике и двух резонаторов на третьей гармонике ускоряющего напряжения.

I. Электроядерный метод получения энергии

1.1. Введение

Ограниченные запасы топлива на планете (нефть, газ, уголь) определяют необходимость использования ядерных технологий для получения энергии, у которых теплотворная способность в десятки тысяч раз превышает теплотворные возможности органического топлива.

Несмотря на то, что использование ядерных технологий неизбежно приводит к появлению радиоактивного загрязнения среды, уже в настоящее время ядерный энергетический ресурс развитых стран составляет от общего энергопотребления: во Франции – 75%, в Бельгии – 60%, в Швеции – 46%, в Германии – 33%, в Японии – 26%, в США – 21%, в России – 14% [3].

Основой ядерной технологии является процесс деления трансураниевых элементов, при котором выделение тепловой энергии составляет ~ 0.8 МэВ/нукл., что соответствует изменению энергии связи нуклонов в ядре при делении. Учитывая, что масса нуклона равна $1,67 \cdot 10^{-24}$ г, а $1 \text{ МэВ} = 1,6 \cdot 10^{-13}$ Дж, указанное тепловыделение соответствует $7,66 \cdot 10^{10}$ кДж/кг, или $1,83 \cdot 10^7$ ккал/кг (тепловыделение при сжигании 1 кг угля равно $\sim 8 \cdot 10^3$ ккал).

Эффективность ядерного топлива определяется типом ядерной реакции. Так, например, для термоядерной реакции синтеза (d,T) полное энергосодержание составляет 17,6 МэВ на пять нуклонов [4], участвующих в процессе, т. е. $3,52$ МэВ/нукл., что более чем в четыре раза превышает энергосодержание процесса деления. Однако так как в реакции синтеза нейтрон уносит 14,1 МэВ, то это энергетическое преимущество, по сравнению с реакцией деления, может быть реализовано только при использовании этих нейтронов в реакции деления. Технологические трудности при создании долгоживущей, плотной высокотемпературной плазмы не преодолены полностью, несмотря на многочисленные исследования во многих физических лабораториях.

Исследование возможности использования, получаемых на ускорителях μ^- -мезонов для реакции синтеза ($\mu^- d, T$) показали, что энергетический баланс на современном этапе исследований малоэффективен, так как затраты энергии на получение одного μ^- -мезона составляют (5 ± 1) ГэВ [5], а количество реакций синтеза за время жизни μ^- -мезона не превышает 160.

Таким образом, ядерная энергетика в обозримом будущем будет базироваться на процессах деления трансураниевых элементов. *Центральными научными проблемами*, которые придется решать в ядерной энергетике, будут:

- Безопасность ядерных реакторов при использовании цепной реакции.
- Переработка или захоронение радиоактивных отходов (экологическая безопасность).

Первая проблема связана с разработкой новых типов реакторов с повышенной степенью безопасности или полным отказом от самоподдерживающейся цепной реакции (подкритические сборки, электро-ядерный метод).

Вторая – решается путем ядерной переработки радиоактивных отходов с помощью нейтронных генераторов, которые базируются на ускорителях заряженных частиц или на ядерных реакторах.

1.2. Электроядерный метод

Электроядерный метод получения энергии базируется на процессе деления ядер в подкритических сборках ($k < 1$, где k – коэффициент размножения нейтронов) при наличии внешнего источника нейтронов. При делении одного ядра выделяется ~ 190 МэВ ($3,04 \cdot 10^{-11}$ Дж) энергии в качестве кинетической энергии осколков деления, которая превращается в тепловую на длине их пробега (~ 100 м).

Для получения тепловой мощности 1 ГВт (10^9 Дж/сек) необходимо произвести $10^9 / 3,04 \cdot 10^{-11} = 3,29 \cdot 10^{19}$ актов деления, что соответствует захвату в процесс деления $3,29 \cdot 10^{19}$ нейтр. /сек.

Действующие протонные ускорители на энергию до 1 ГэВ (см. табл. 1) имеют в настоящее время максимальные интенсивности протонов 1–2 мА ($6 \cdot 10^{15} - 1,2 \cdot 10^{16}$ р/сек). Количество испарительных нейтронов, которые можно получить при таких интенсивностях не превышает 10^{18} н/сек. Видно, что даже без учета поглощения нейтронов ядерными процессами, сопутствующими делению, для создания энергетической установки указанной мощности (~ 1 ГВт) необходимо дополнительное усиление внешнего источника нейтронов в десятки раз.

Таким дополнительным усилителем нейтронного потока может служить подкритическая сборка. Если известен коэффициент размножения нейтронов в такой сборке ($k < 1$), то точечный баланс накопления мгновенных нейтронов описывается следующим уравнением:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{k-1}{\tau} n + q, \quad (1)$$

где n – плотность нейтронов; q – интенсивность внешнего источника нейтронов, τ – время жизни нейтрона в подкритической сборке. Стационарное решение уравнения (1) при $t \gg \tau$ имеет вид

$$n = \frac{1}{1-k} * q \tau, \quad (2)$$

что указывает на увеличение нейтронной плотности за счет подкритичности на множитель $\frac{1}{1-k}$. Несмотря

на то, что уравнение (1) написано для однородной или точечной подкритической сборки, этот коэффициент обычно с успехом используется для произвольных реакторных структур при определении подкритичности с помощью внешнего источника нейтронов. Эффект увеличения плотности нейтронов позволяет рассматривать возможность разработки электроядерных генераторов с тепловой мощностью 1 ГВт при интенсивности протонных пучков ускорителя в интервале $1 \div 10$ мА с энергией ($0,8 \div 1,0$ ГэВ).

Основной физической проблемой, которая должна быть решена до определения необходимой интенсивности пучков ускоренных частиц, является теоретическое и экспериментальное исследование подкритических сборок с целью определения оптимальной подкритичности, и изменение этой подкритичности во времени при работе установки.

Экономическая целесообразность таких исследований связана с возможностью использования для ядерной энергетики таких “неделящихся” элементов, как Th²³² [1] или U²³⁸ [6], запасы которых существенно превышают запасы элементов, используемых в ядерной энергетике в настоящее время (U²³⁵, U²³³). Также появляется возможность сжигания накопленного плутония. Исследования и предложения по исследованию подкритических сборок имеются во многих физических институтах [7, 8, 9, 10].

В качестве пучков заряженных частиц для получения первичного пучка нейтронов рассматриваются не только протоны, но и дейтроны [11], многозарядные ионы [12] и даже электроны, что возможно при высокой степени подкритичности ($\Delta k = 0,03 - 0,04$).

Наряду с подкритичностью не менее важной проблемой современной ядерной энергетики является необходимость утилизации радиоактивных отходов. Предлагаемые ядерно-физические методы базируются на нейтронной обработке этих отходов при помощи специальных нейтронных генераторов или в самой подкритической сборке за счет существенного увеличения срока её работы.

Широкий спектр элементов радиоактивных отходов и большой диапазон сечений захвата нейтронного потока потребует многочисленных исследований для решения этой проблемы.

2. Современные нейтронные генераторы

2.1. Параметры пучков и ускорители, применяемые в нейтронных генераторах

Основные параметры протонных пучков в существующих нейтронных генераторах показаны в табл. 1 [13]. Там же показаны параметры пучка фазотрона ОИЯИ, который работает в настоящее время в ЛЯП ОИЯИ.

Таблица 1.

	IPNS Аргона США	KENS КЕК Япония	MLNSCE Лос-Аламос США	ISIS Англия	SINQ PSI Швейцария	- ОИЯИ РФ
Ускоритель	50 МэВ линак +синхротрон	40 МэВ линак +синхротрон	800 МэВ линак +накопитель	70 МэВ линак +синхротрон	72 МэВ циклотрон +циклотрон	680 МэВ фазотрон
Энергия p (МэВ)	450	500	800	800	590	680
Ток пучка (мкА)	15	4.6	70	200	1500	3.2
Мощность пучка (кВт)	6.8	2.3	56	160	885	2.2

Анализируя данные табл. 1 и публикации по вопросам создания сильноточных ускорителей, можно сделать следующие выводы:

1. На пучке фазотрона ОИЯИ вполне можно сделать генератор нейтронов, для проведения экспериментов со сборками, реализующими электроядерный метод получения энергии.

2. Протонный пучок максимальной мощности получен на циклотроне PSI и, по последним данным, ожидается увеличение мощности пучка [14].

3. Протонный пучок на линаке (Лос-Аламос США) получен значительно меньшей мощности, а величина тока пучка ограничивается потерями при ускорении, есть предложения по уменьшению потерь, но это требует изучения и проведения фундаментальных экспериментов.

В настоящее время, как отмечается в работах [3, 15] и др. необходимо приступить к разработке экспериментального комплекса ускоритель – подкритическая сборка для моделирования промышленной установки на небольшом 50 – 500 МВт уровне мощности. В ближайшие годы в качестве ускорителя для такого эксперимента нужно использовать каскад циклотронов, так как только циклотрон обладает требуемыми параметрами [16].

Современное понимание влияния пространственного заряда на динамику пучка в циклотроне демонстрирует реальную возможность увеличения тока ускоряемого пучка до уровня 10 мА и более [14]. При этом становится очевидной целесообразность использования циклотронов, как наиболее экономичных, надежных, компактных и, что немаловажно, относительно дешевых установок на всех стадиях ускорения пучка.

2.2. Предлагаемая схема и основные параметры сильноточного циклотронного комплекса

В настоящее время в лабораториях мира изучается несколько схем циклотронных комплексов для управления подкритическими сборками [17]. Все схемы имеют три ступени ускорения, что обусловлено, в основном, возможностью оптимизировать структуры магнитной и ускоряющей систем в зависимости от энергии с учетом влияния пространственного заряда.

Основой для выбора параметров настоящего проекта являются результаты работ по проектированию суперциклотрона в ЛЯП ОИЯИ, которые были выполнены в начале 80-х годов [18], где в качестве инжектора выбран линейный ускоритель с конечной энергией пучка 50 МэВ. Тогда были сделаны модели двух секторов магнита циклотронной части комплекса и резонатора в масштабе 1:5. Результаты моделирования магнитной системы суперциклотрона показали, что сформированное магнитное поле обеспечивает частоту аксиальных колебаний Q_z в пределах 1.35 – 1.45 на всех радиусах.

Предлагаемая в настоящее время схема 3-стадийного циклотронного комплекса – драйвера на конечную энергию протонов 800 МэВ с током в пучке 10–30 мА состоит из:

- 4-секторного циклотрона – инжектора на энергию протонов 15 МэВ;
- 4- секторного изохронного циклотрона ускоряющего протонный пучок до энергии 60 МэВ;
- 10-секторного изохронного циклотрона с максимальной энергией протонов 800 МэВ.

Основные параметры циклотронов, представленные в табл. 2, могут быть изменены в процессе оптимизации всего комплекса.

При выборе параметров всех трех ступеней ускорения несущая частота высокочастотных систем принималась равной 49.5 МГц.

Особое внимание при проработке проекта будет уделено вопросу исключения потерь пучка, как в процессе ускорения, так и особенно при инжекции и выводе частиц.

Таблица 2. Основные параметры сильноточного циклотронного комплекса.

№		ЦИ-15	Ц-60	Ц-800
1	Энергия инжекции - вывода, МэВ	0.5-15	15-60	60-800
2	Радиус инжекции - вывода, м	0,2-1,36	1.36-2.62	2.62-6.5
3	Зазор магнита, см	3	5.0	9.0
4	Число секторов	4	4	10
5	Угол сектора вх/вых, град	30/36	32/36	11/14
6	Угол спиральности вх/вых, град	0	0	-20/+50
7	Частота ВЧ-системы, МГц	49.5	49.5	49.5
8	Гармоника ускорения	8	8	8
9	Число основных резонаторов	4	2	6
10	Напряжение на резонаторе (инж./вывод), кВ	100–150	125–250	750
11	Мощность ВЧ-потерь в резонаторе, МВт	0.04	0.03	1.0
12	Число доп. (flat-top) резонаторов	-	2	2
13	Гармоника	-	18	18
14	Набор энергии за оборот (инж./вывод), МэВ	0,8-1,4	0.5-1.0	4.5
15	Мощность пучка, МВт	0.15	0.6	8
16	Мощность питания магнита, МВт	0.14	0.45	2.0

Литература

- [1] С. Rubbia. Contribution to the Las- Vegas Conf. 1994.
- [2] В.П. Дмитриевский, Н.В. Сергеева. “Уран-238 как источник получения энергии электроядерным методом”, Краткие сообщения ОИЯИ, №5,6[97]- 99, с. 85-91.
- [3] В.И. Субботин. “Ускорители могут сделать ядерную энергетику более безопасной”, ОИЯИ, Р1-99-97.
- [4] Л.А. Арцимович. “Управляемые термоядерные реакции”, Москва, 1961, с. 6.
- [5] Ю.В. Петров. Материалы XIV зимней школы, Ленинград, 1979, с. 139.
- [6] А.М. Балдин. Частное сообщение.
- [7] F. Carminati, C. Geles, R. Klapish at al. CERN/AT/93-47(ET), 1993.
- [8] S. Andriamonje at al. CERN/AT/94-45(ET), 1994.
- [9] П.Н. Алексеев, А.Г. Асеев и др. ИАЭ – 6110/3, 1998.
- [10] V.S. Barashenkov, A. Polanski, I.V. Puzynin, A.N. Sisakian. JINR , E-2-99-206 ,1999.
- [11] Yu.G. Alenitsky et al. “High current deuteron cyclotron complex...”, JINR, E9-96-370, Dubna, 1996.
- [12] К.Д. Толстов. Краткие сообщения ОИЯИ, 5[62]-93, Дубна, 1993.
- [13] I.S.K. Gardner. “A review of spallation neutron source accelerators “ ,Proc. of the EPAC 98, p 98-102.
- [14] Т.Н. Stammbach . “High intensity problems...”, Proc.of the 15th Conf. Of Cycl. and their Applic, p. 369-376, Caen 1998.
- [15] В.Н. Михайлов. “Мощные пучки нейтронов с использованием ускорителей”, Краткие сообщения ОИЯИ, № 6(80) – 96, с. 17-22.
- [16] Ю.Г. Аленицкий. ”Изохронные циклотроны для электроядерных циклотронов”, Труды II научного семинара памяти В.П.Саранцева, Дубна, Д9-98-153, с 89-96.
- [17] М.К. Graddock. “Critical Beam Intensity...”, Proc.of the 15th Conf. Of Cycl. and their Applic, p 377-380, Caen, 1998.
- [18] А.А. Glazov et al. Proc. of the V Conf. On the Accelerators, Dubna, 1976, vol.1, p.123 , Science, 1977.