

# КОМПЛЕКС УСКОРИТЕЛЬ-РЕАКТОР - БУДУЩЕЕ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

В.А.Бомко, И.М.Карнаухов

ННЦ Харьковский физико-технический институт

Приведен обзор новых разработок по созданию эффективных и безопасных электроядерных энергетических установок. Наиболее интересным и проработанным источником ядерной энергии в настоящее время является комплекс Усилитель мощности (Energy Amplifier), в основу которого положен реактор на быстрых нейтронах, работающий в подкритическом режиме под пучком протонов, ускоренных до энергий, обеспечивающих эффективное протекание ядерных реакций срыва (spallation) высокоэнергетичных нейтронов. Рассмотрены также проблемы уничтожения отходов ядерных реакторов путем их сжигания и трансмутации. Приведена информация о состоянии мирового уровня развития техники ускорения мощных пучков протонов. Материал обзора базируется на информации, опубликованных в препринтах ЦЕРН и трудах конференций по ускорителям и электроядерным энергетическим системам.

## Введение

В XX веке произошло стремительное нарастание потребления энергии человечеством, причем основным ее источником было углеводородное топливо. Следствием этого явилось недопустимое загрязнение окружающей среды и особенно повышение парникового эффекта на Земле.

Ядерная энергетика не дает ни тепличного эффекта, ни химического загрязнения (NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> и др.), ни пылевых частиц, ни даже радиоактивных частиц, освобождающихся при сгорании угля. Главные задачи, стоящие в настоящее время перед ядерной энергетикой следующие:

1. Максимально высокий уровень безопасности.
2. Минимальная наработка долгоживущих отходов и устранение сложных и дорогостоящих геологических захоронений.
3. Высокая безопасность по отношению к диверсиям.
4. Более эффективное использование широко доступного топлива, без необходимости изотопной сепарации.

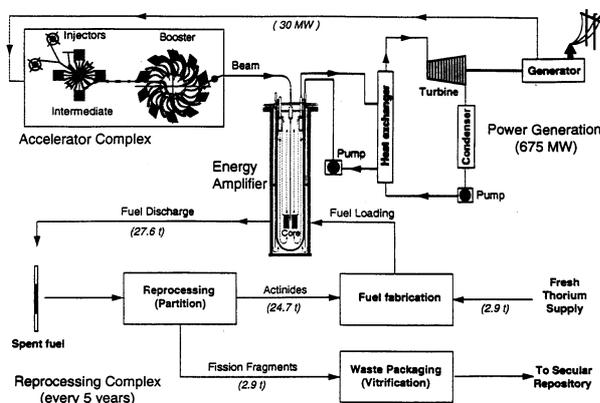


Рис.1. Концептуальная схема комплекса ЕА

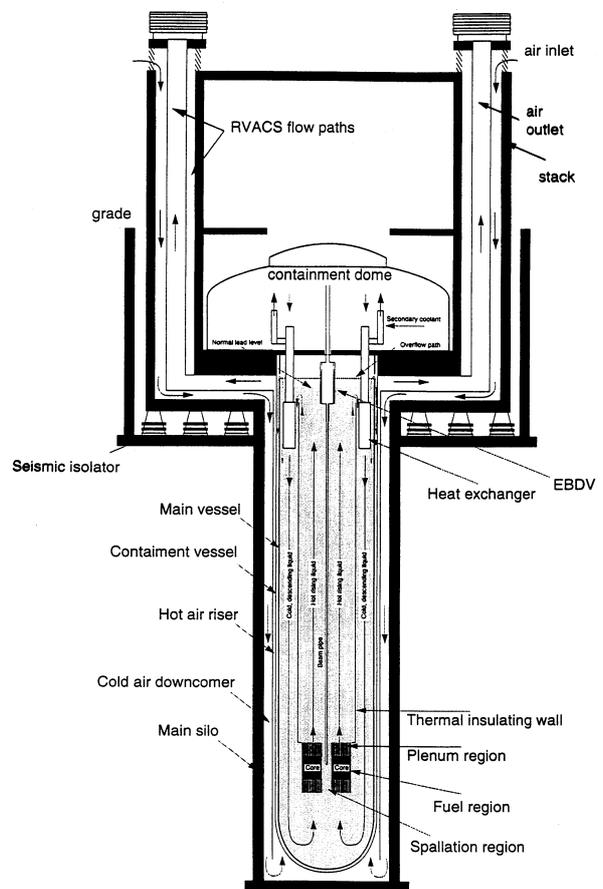


Рис.2. Общий вид реакторной части ЕА

5. Как можно более низкая стоимость производимого тепла и более высокая температура, чем в обычных ядерных реакторах для того, чтобы успешно конкурировать с ископаемым топливом.

В связи с вышесказанным, особый интерес представляют разработки новых электроядерных энергетических установок (ЭЯЭУ), получивших название в западных странах «Energy Amplifier» (ЕА),

предложенных группой CERN во главе с Carlo Rubbia[1]. Эти источники ядерной энергии по мощности и плотности мощности сравнимы с большими стандартными реакторами типа PWR (Preaturised Light Water Reactor).

### 1. Концептуальные особенности Energy Amplifier

Energy Amplifier – это подкритическая система, питаемая протонным ускорителем, работающая на быстрых нейтронах. Полное описание его приведено в серии отчетов CERN [1-7]. 10 тыс. тонн свинца используется как мишень для производства нейтронов в Spallation-реакции, как замедлитель, как носитель тепла

натуральной конвекцией и его отдачи, как среда для нахождения топливных блоков и поглощения радиоактивного излучения. В качестве топлива в EA используется смесь природного тория с различными делящимися материалами.

Общий вид комплекса EA, рассчитанного на тепловую мощность 1500 МВт, показан на рис.1 [1]. Здесь обозначены основные его элементы, количество и движение топлива в процессе циклической его перегрузки. Основные конструктивные параметры приведены в табл.1 [1]. Главная его часть (реакторная), рис.2 [1], состоит из основного контейнера (vessel) диаметром около 6 м и высотой 30 м, наполненного

Таблица 1. Основные параметры EA

1.	Тепловая мощность	1500 МВт
2.	Электрическая мощность	625 МВт
3.	Коэффициент размножения нейтронов, k	0,98
4.	Мощность, возвращаемая на ускоритель	30 МВт (~5 %)
5.	Номинальное усиление энергии	120
6.	Высота контейнера	30 м
7.	Диаметр контейнера	6 м
8.	Материал оболочки контейнера	НТ-9
9.	Толщина стенок	70 мм
10.	Вес контейнера	2000 т
11.	Вес расплавленного свинца	10000 т
12.	Средняя температура топлива	908°C
13.	Время между перезагрузкой топлива	5 лет
14.	Количество $^{233}\text{U}$ при выгрузке	242,7 кг
15.	Температура расплавленного свинца	700 °C
16.	Удельная мощность	100 ГВт/т

жидким свинцом. Этот контейнер является несущим для основного оборудования. Расположение оборудования подобрано так, чтобы обеспечить наилучшую конвекцию расплавленного свинца, несущего тепло в теплообменники. Объем внутри контейнера делится на три части: 1) мишень / топливо / бридер; 2) область конвекции и 3) область теплообмена.

Наличие внешнего источника нейтронов, благодаря ускорителю протонов с широким спектром энергии, получаемому при прохождении свинцового замедлителя, позволяет поддерживать подкритический режим с большими возможностями выбора топлива. Чистый торий не делится, но  $^{233}\text{U}$ , нарабатанный из  $^{232}\text{Th}$ , может вырабатывать энергию путем деления. Практически необходим «засев» для обеспечения деления при разгоне системы и для этих целей необходим делящийся элемент:  $^{233}\text{U}$  от предыдущей топливной нагрузки или  $^{235}\text{U}$ , выделенный из природного урана, или военный  $^{239}\text{Pu}$ , или просто «грязный» плутоний, т.е. смесь трансурановых элементов (ТРУ), являющая собой именно ту часть отходов, которую необходимо разрушить. Таким образом, в процессе сжигания ТРУ выделяется значительное количество энергии, что является экономически выгодным. Разрушение ТРУ дает около

40% той энергии, которую производит PWR в процессе их наработки.

Торий является привлекательным топливом, потому что он содержится в больших количествах в земной коре (почти в 5 раз больше, чем уран). Он изотопно чистый, поэтому нет необходимости в обогащении и сжигается полностью. При работе EA в режиме «засева» трансуранами захват нейтронов ядрами тория в 5 раз превышает захват ядрами ТРУ, поэтому происходит наработка  $^{233}\text{U}$  по схеме  $^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{Pa} \rightarrow ^{233}\text{U}$ , сопровождающаяся сжиганием ТРУ.

Характерной особенностью EA является его режим работы на быстрых нейтронах. Выбор свинца в качестве замедлителя определяет жесткий энергетический спектр нейтронов, получаемый из spallation-реакции при облучения ядер свинца высокоэнергетичным пучком протонов. В процессе многократного упругого столкновения нейтронов с ядрами свинца происходит адиабатическое их замедление. Широкий диапазон энергий быстрых нейтронов благоприятен для получения максимальной вероятности деления ТРУ.

Концепция EA предусматривает коэффициент размножения (k), близкий к 0,98 для нейтронов,

производимых пучком протонов в процессе spallation реакции. Это обеспечивает сохранение подкритичности все время, что исключает возникновение аварии типа Чернобыля. В случае  $\text{Th} \rightarrow \text{Pu}$  топливной загрузки его величина на протяжении топливного цикла удерживается примерно постоянной потому, что потеря массы актинидов и увеличение количества осколков деления компенсируется ростом количества  $^{233}\text{U}$ , поэтому продолжительность цикла будет определяться, главным образом, появлением радиационных повреждений материалов и тем фактом, что превращение  $^{239}\text{Pu} \rightarrow ^{233}\text{U}$  становится менее эффективным, так как часть  $^{233}\text{U}$ , сгорающая в ЕА, растет со временем, поэтому выбирается предельное значение наработки энергии 120 ГВт дней/т. При этом работа ЕА будет управляться изменением тока пучка протонов из ускорителя, в результате чего мощность ЕА сохраняется на уровне 1500 МВт.

Усиление энергии в системе,  $G$ , определяемое как отношение производимой энергии к энергии, затраченной на пучок, может быть представлено как  $G = G_0/(1-k)$ , при  $G_0 = 3$ . (Отсюда возник термин «Energy Amplifier»).

Нынешняя ускорительная техника может обеспечить требуемую мощность пучка (от 10 до 20 мА при 1 ГэВ) как с помощью линейного ускорителя, так и

циклотронов. В обоих случаях в подкритической системе, питаемой от ускорителя, необходимо около 5% электрической мощности, вырабатываемой ЕА, возвращать на питание ускорителя.

Пучок протонов током (10...20 мА) после ускорения и транспортировки попадает в Energy Amplifier через систему сопровождения пучка и  $90^\circ$  магнит. При выключении отклоняющего магнита пучок протонов безопасным образом направляется в могильник. Конструкция канала пучка позволяет выполнить отклонение пучка за время порядка 1 мс, которое является незначительным по сравнению с инерциальным характером работы пучка. Пучок фокусируется обычными квадрупольями, проходит по ионопроводу и выпускается в мишень жидкого свинца через вольфрамовое окно толщиной 3 мм. Вольфрам выбран благодаря его качествам: высокой температуре плавления ( $3410^\circ\text{C}$ ), прекрасной теплопроводности, высокой механической прочности и подходящим характеристикам по отношению к активации. К тому же он не подвергается коррозии жидким свинцом.

Наиболее интересный вариант ядерной энергетики, представленный в [2], являет собой комплекс, объединяющий PWR и ЕА. Общая схема его представлена на рис.3.

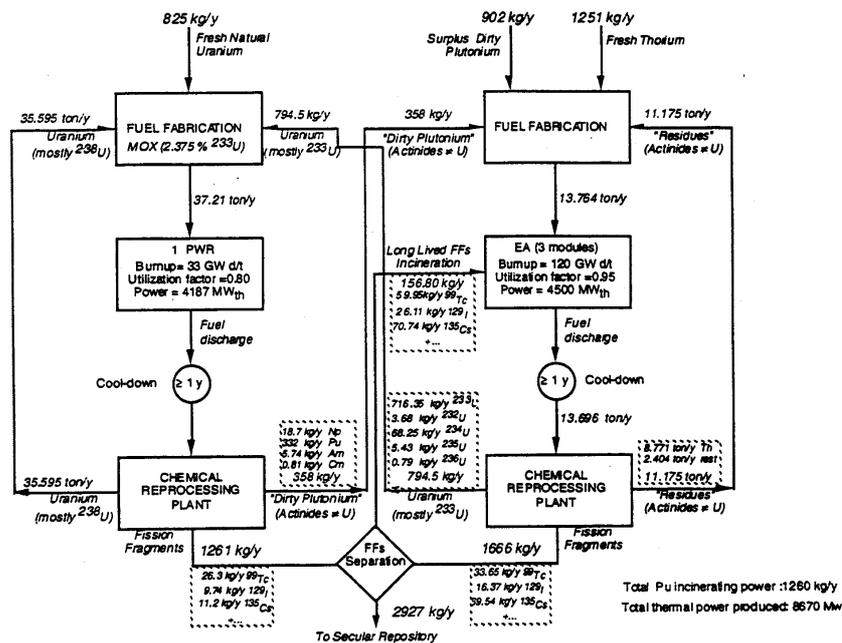


Рис.3. Общая схема комплекса PWR-ЕА. Представлен поток массы топлива за год эксплуатации

В этом случае цепочка ядерных реакций, протекающих в PWR, дополняется другой

$$^{238}\text{U} + n \rightarrow ^{239}\text{U} \rightarrow ^{239}\text{Np} \rightarrow ^{239}\text{Pu}.$$

Этот плутоний, перенесенный в ЕА, производит дополнительную энергию при сгорании и способствует наработке  $^{233}\text{U}$  по цепочке

$$^{232}\text{Th} + n \rightarrow ^{233}\text{Th} \rightarrow ^{233}\text{Pa} \rightarrow ^{233}\text{U}.$$

Последний может быть использован для «засева» новых циклов ЕА или в реакторах PWR.

Комплекс ЕА-PWR является очень эффективным при сжигании накопленного военного плутония [3]. Два комплекса по 3 ЕА тепловой мощностью по 4500 МВт и электрической мощностью 1870 МВт могут сжечь 100 т плутония за 45 лет. При этом ЕА будут работать в режиме «усиления», в котором будет

нарабатываться из Pu - Th смеси «паразитное» топливо  $^{233}\text{U}$  в количестве 86,18 т, которое пойдет на обогащение топлива  $^{238}\text{U}$  -  $^{233}\text{U}$  массой 86,18/0,02375 = 3629 т. Этого топлива достаточно для работы стандартного PWR электрической мощностью 100 МВт на 100 лет.

## 2. Трансмутация отходов ядерного топлива

В составе отходов топливной смеси PWR содержится 1,1% трансуранов и 4% осколков деления, которые являются источником высокой радиационной опасности [4]. Как отмечалось выше, все ТРУ становятся топливом ЕА и на протяжении нескольких циклов полностью сжигаются, уменьшая тем самым радиацию почти в 20000 раз.

Для иллюстрации описываемого метода трансмутации долгоживущих отходов выбран стандартный PWR мощностью 1000 МВт, проработавший 40 лет [5]. Химическая сепарация отходов дает следующую картину:

- 1) несгоревший уран (874,49 т), который может быть возвращен в топливный цикл;
- 2) трансураны (10,178 т), которые будут сжигаться ЕА;
- 3) осколки деления (38,151 т), которые будут ниже рассматриваться с точки зрения селективной трансмутации.

Радиоактивность осколков деления с течением времени приведена на рис.4 [4].

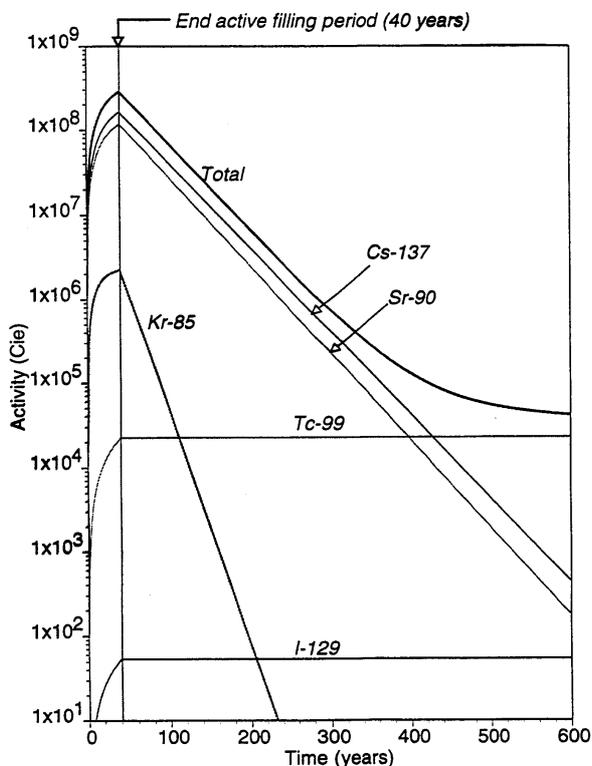


Рис.4. Полная радиоактивность в Кюри отходов одного PWR, проработавшего 40 лет  
Как видно, наиболее активными на протяжении

длительного периода являются  $^{99}\text{Tc}$  и  $^{129}\text{I}$ . К тому же они представляют наибольшую опасность попадания в биологический цикл и требуют большого объема захоронения (соответственно, 48181 и 4327 м<sup>3</sup> на реактор) [5]. По этим причинам они подлежат наиболее приоритетной трансмутации. Трансмутация других долгоживущих радиоактивных отходов, таких как  $^{93}\text{Zr}$ ,  $^{135}\text{Cs}$ ,  $^{126}\text{Sn}$ ,  $^{79}\text{Se}$ , затруднена либо вследствие малого сечения захвата нейтронов, либо наличием в химической смеси изотопов с высокой радиотоксичностью. К тому же, объем их захоронения небольшой и они не могут попасть в биологический цикл.

Практическая возможность трансмутации долгоживущих отходов предполагает наличие мощного источника нейтронов. Минимальное количество нейтронов, захваченных ядрами трансмутируемых изотопов, наработанных за 40 лет стандартным PWR представлено в табл.2 [5]. Согласно этим данным, для трансмутации только 3-х изотопов  $^{99}\text{Tc}$ ,  $^{129}\text{I}$  и  $^{79}\text{Se}$  потребуется 11,29 кг нейтронов (1 кг нейтронов соответствует  $5,97 \cdot 10^{27}$  нейтронов). В варианте, когда источником нейтронов является протонный пучок, потребуется ускоритель, рассчитанный на энергию протонов порядка или больше 1 ГэВ. В процессе spallation реакции, когда мишенью служит свинец, средняя энергия нейтронов составит 40 МэВ, тогда 1 кг нейтронов требует  $1,061 \cdot 10^9$  кВтч или 3,029 МВт средней мощности пучка на протяжении 40 лет. Предполагая КПД ускорителя 0,5, это соответствует 6,05 МВт электрической мощности. Следовательно, выработка 11,29 кг нейтронов потребует 68,40 МВт электрической мощности за весь период работы PWR, т.е., 6,8% от выработанной им мощности [5]. Если включить еще вероятность захвата и другие факторы, то для трансмутации долгоживущих отходов потребуется около 10% производимой мощности.

Описана и другая методика трансмутации долгоживущих осколков деления с помощью быстрых, как их называют, «убегающих» или «паразитных» нейтронов, которая может применяться прямо в ЕА [5]. В этом случае трансмутируемые отходы в блоках окружают топливную зону на расстоянии как можно меньшем для наиболее эффективного использования «убегающих» нейтронов.

Таблица 2. Количество нейтронов, необходимое для полной трансмутации долгоживущих осколков деления после 40 лет работы PWR

Элемент	Масса изотопа		Масса элемента		Нейтроны, кг	
	кг	% от всех осколков	кг	% от всех осколков	Изотоп	Элемент
<sup>99</sup> Tc	843	2,215	843	2,215	8,51	8,51
<sup>129</sup> I	196,2	0,515	255,42	0,671	1,52	1,98
<sup>93</sup> Zr	810,4	2,129	4198,4	11,03	8,71	45,14
<sup>135</sup> Cs	442,2	1,162	2502,8	6,577	3,27	-
<sup>126</sup> Sn	29,48	0,077	95,70	0,251	-	-
<sup>79</sup> Se	6,57	0,017	63,33	0,166	0,083	0,802

### 3. Ускорительный комплекс

Эффективное производство энергии на электроядерных энергетических установках (ЭЯЭУ) типа Energy Amplifier возможно, если такую систему непрерывно питать мощным пучком протонов, ускоренных до энергий, рождающих в процессе spallation-реакции в среде свинца быстрые нейтроны в количестве, многократно превышающем исходное количество протонов. В процессе spallation-реакции максимальное количество рождаемых нейтронов приходится на диапазон энергий от 800 до 2000 МэВ. В варианте Energy Amplifier, предложенном Carlo Rubbia [1], рассчитанном на 1,5 ГВт тепловой мощности (670 МВт электрической), требуемая мощность пучка должна находиться в пределах 10 - 30 МВт. При выбранной энергии протонов (около 1 ГэВ), как видно из рис.5 [2], величина тока пучка должна соответственно составлять 10 - 30 мА.

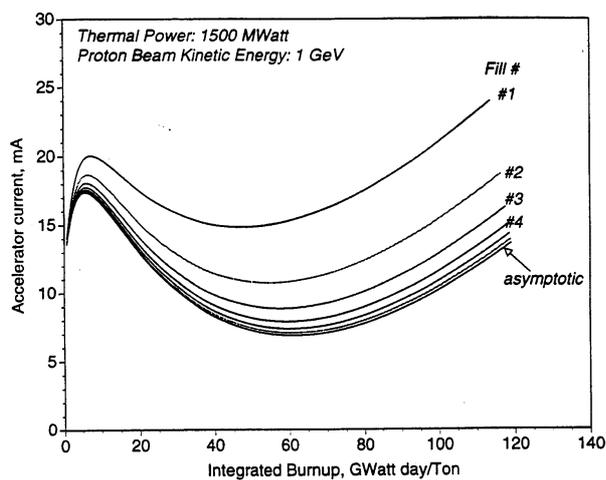


Рис.5. Ток пучка протонов, ускоренных до энергии 1 ГэВ, необходимый для сохранения постоянной мощности ЕА на уровне 1,5 ГВт, для последовательности циклов загрузки топлива

Задача ускорения интенсивных пучков протонов в настоящее время может решаться двумя вариантами ускорителей: циклотронным или линейным методами ускорения. Первоначально в структуре Energy Amplifier, разрабатываемой в ЦЕРН, ставка делалась на использование циклотронного метода. При этом имелось ввиду, что в ЕА, работающем в режиме быстрых нейтронов, захват осколками деления значительно меньше, чем в режиме тепловых нейтронов. Считалось, что в этом случае токи пучка 10 или 12,5 мА являются приемлемыми, зато такой циклотрон будет иметь сравнительно невысокую стоимость и компактные размеры.

Основываясь на опыте разработок высокоинтенсивных циклотронов, в частности, циклотрона на энергию протонов 600 МэВ (PSI), работающем в Цюрихе [8], был выбран вариант 3-х каскадов циклотронов, которые изображены на рис.2. Как видно, в общую схему ускорительного комплекса входят: 1) два инжекционные циклотрона на энергию 10 МэВ и ток пучка по 5 мА ионов Н<sup>+</sup>; 2) промежуточный 4-х секторный циклотрон (ISSC), принимающий совмещенный пучок после обдирки отрицательных ионов водорода и ускоряющий протоны до энергии 120 МэВ; 3) конечный бустерный циклотрон (BSSC) с десятью отдельными секторами и шестью резонаторами, доводящий энергию протонов до 1 ГэВ.

Главные параметры двух циклотронов - каскадов ускорительного комплекса - приведены в Табл.3 [8]

Оценивая КПД ВЧ-генераторов мощности в 70%, полный КПД, то есть отношение мощности пучка ускоренных протонов к потребленной электрической мощности, будет несколько превышать 40%.

Работа ускорительного комплекса в структуре ЕА требует высокой надежности работы всех его систем. Как отмечают авторы проекта [8], опыт работы с подобными машинами и возможность их дальнейшего совершенствования позволяет надеяться, что незапланированные остановки ускорителя могут удерживаться на уровне 3-5 % общего времени.

Таблица 3. Основные характеристики промежуточного и бустерного циклотронов

Параметр	ISSC	BSSC
Энергия протонов на входе	10 МэВ	120 МэВ
Энергия протонов на выходе	120 МэВ	990 МэВ
Диаметр магнита	10,5 м	16 м
Вес железа магнита	1000 т	3170 т
Мощность магнита	0,6 МВт	2,7 МВт
ВЧ-мощность	1,54 МВт	12,5 МВт
Частота	42 МГц	42 МГц
Гармоника	6	6
Количество секторов	4	10
Количество резонаторов	2	6
Радиальный прирост за оборот	12 мм	10 мм

Ускорение интенсивных пучков предъявляет особые требования к эффективности их вывода из циклотронов. Для того, чтобы обеспечить успех, параметры циклотронов должны удовлетворять следующим условиям:

1. Энергия инжекции в промежуточный каскад ISSC, должна быть достаточно высокой для того, чтобы уменьшить продольное расталкивающее действие объемного заряда.
2. Секторные магниты должны иметь малый зазор (5 см), чтобы получить достаточную вертикальную фокусировку и возможность размещения в промежутках ускоряющих резонаторов устройств ввода и вывода пучка.
3. Для сглаживания вершины синусоидального распределения поля во времени применяются два дополнительные резонатора, работающие на третьей в ISSC, и 5-й в BSSC гармонике частоты основных резонаторов.
4. Однооборотный вывод. Требуется достичь достаточной радиальной сепарации орбит.
5. Согласование 3-х каскадов, обеспечивающее устранение потерь пучка. Это достигается за счет работы всех каскадов на одной частоте (42МГц) и выбором эффективных систем транспортировки и согласования параметров пучка.

Выполненное предварительное изучение [8] показало, что комплекс каскада циклотронов может обеспечить получение пучка мощностью 10...12,5 МВт для питания ЕА. Для этого требуются дополнительные исследования по динамике пучка, определяющие предельные токи инжектируемых пучков в условиях их совмещения, выходящих из двух циклотронов и поступающих на вход промежуточного циклотрона.

Основным недостатком циклотронного метода ускорения, как упоминалось выше, является ограничение по предельному току пучка протонов (10...12,5 мА). Это определяется малой допустимой фазовой длиной захватываемой части инжектируемого пучка (не более 30°), которая определяет удельную плотность объемного заряда. По этой причине в процесс ускорения захватывается менее 10% пучка.

По поводу возможности использования циклотронов для ускорения пучков протонов большой мощности в 1995 г. в Лос Аламосе (США) состоялась

совещание специалистов, на котором однозначно было высказано следующее заключение [9]: «Циклотроны на мощность пучка 2 МВт - хороший выбор, циклотроны на 5 МВт - требуют дополнительных научно-исследовательских и технических разработок, циклотроны на 10 МВт - требуют значительных инвестиций, исследований и разработок. В области более мощных пучков принципиальная возможность использования циклотронов сомнительна». В этом случае линейному ускорителю в настоящее время нет конкурента, так как в нем ограничения по току пучка сдвигаются как минимум на порядок по сравнению с циклотроном.

В последнее время, в связи с низким уровнем тока пучка протонов, которые можно ускорить на каскаде циклотронов, в ЦЕРН стали в качестве основного варианта рассматривать сверхпроводящий линейный ускоритель с повышенным до 30 мА током протонного пучка [10,11].

Основным преимуществом линейного ускорителя является большая величина предельного тока и отсутствие ограничений по энергии пучка ускоренных протонов. Трудности, связанные с увеличением энергии пучка, а следовательно и стоимость, находятся в линейной зависимости от его длины в то время, как в случае циклотрона они растут пропорционально кубу радиуса. В настоящее время в нескольких передовых странах созданию линейных ускорителей протонов на высокие энергии уделяется большое внимание. Назначение их разнообразное. Кроме рассматриваемого случая использования в ЕА, или как в зарубежных странах называют условно «Трансмутация, питаемая ускорителем» («Accelerator Driven Transmutation of Waste») [9], ускорители мощных пучков протонов предназначаются для наработки трития (проект АРТ в Лос Аламосе (США) на 1,7 ГэВ [12] и TRISPAL, 800 МэВ во Франции [9]), для исследования многих аспектов нейтронной физики и нейтронных технологий (КОМАК в Корею на 1 ГэВ [13], NSP-проект в Японии 1,5 ГэВ [14], SNS, Окридж, США на 1 ГэВ [15], СПЛУ на 30 мА и СПФСУ на 250 мА в России [16] и т.д.).

В последние годы выполнено много работ по исследованию различных аспектов физики и техники этих ускорителей, разработке и практическому конструированию систем. Учитывая, что конечной

целью их создания являются работы в промышленных комплексах, главное внимание обращается на следующие три проблемы:

1. Требуемая мощность пучка на один или два порядка выше достигнутой в настоящее время. При этом уровень потерь пучка должен находиться в пределах допустимых для безопасного доступа в условиях радиации.
2. Ускоритель должен быть в высшей степени надежным, непредвиденные остановки не должны превышать 2-3%, а общий коэффициент использования - больше 85 %.
3. Полная стоимость ускорителя и его эксплуатации должна быть как можно ниже.

По всем трем приведенным аспектам в настоящее время ведутся большие работы в различных ускорительных центрах. Можно обозначить основные направления этих разработок:

1. В принципиальном плане ускорение пучков с током 100 мА и выше проблема решена. В настоящее время имеются ускорители, в которых в импульсном режиме такие токи получены. Но дальнейшее увеличение полезного времени пучка на ускорителях, Мезонных фабриках Лос Аламоса (800 МэВ) [17] и Троицка (600 МэВ) [18] ограничивается допустимыми потерями пучка, приводящими к возрастанию радиационного фона. Как показал опыт их эксплуатации, допустимыми являются удельные потери пучка по длине ускорителя 0,2 нА/м. Поэтому средний ток ускоренного пучка в настоящее время на этих ускорителях не превышает 1 мА. Для устранения потерь пучка или уменьшения их до допустимого уровня при среднем токе 100 мА при создании новых ускорителей предполагается внедрение следующих разработок: а) дальнейшее совершенствование динамики пучка с целью нахождения причин образования «галло» («шубы») пучка, за счет которого происходят основные потери; б) предполагается значительно уменьшить или полностью устранить кратность частот на начальной и основной

частях ускорителя, это даст возможность улучшить согласование фазовых объемов сгустков ускоряемых частиц; в) применение в основной части ускорителя сверхпроводящих резонаторов позволяет наряду с увеличением темпа ускорения и значительным уменьшением потерь высокочастотной мощности существенно увеличить апертуру ускоряющего канала в резонаторах, что приведет к меньшему попаданию ускоряемых частиц на стенки.

2. Надежность ускорителя повысится, если будет обеспечен прямой доступ к его системам в результате уменьшения наведенной радиоактивности. Основным источником отказов среди систем ускорителя является ВЧ-питание. Появление мощных клистронов, работающих в непрерывном режиме и с большим сроком службы, позволяет увеличить время наработки на отказ. Система резервных генераторов, переключаемых в автоматическом режиме, уменьшит время остановки. Ведутся работы по совершенствованию других систем с целью увеличения их надежности.

3. Стоимость ускорителя состоит из двух частей - первоначальной стоимости сооружения и стоимости эксплуатационных расходов. Первоначальная стоимость линейного ускорителя, включающая разработку и сооружение в расчете на одну и ту же энергию пучка (например 1 ГэВ и ток 10 мА) несколько выше, чем описанного выше циклотронного варианта [8]. Однако в расчете на единицу мощности пучка при токе 100 мА стоимость будет в пользу линейного ускорителя. Использование сверхпроводимости в основной части линейного ускорителя позволит свести до минимума потери мощности в стенках резонаторов и с учетом большого тока пучка приведет к высокому КПД по пучку.

В табл.4 приведены основные параметры мощных линейных ускорителей в различных странах мира, разработка которых ведется уже на протяжении последних 5 лет.

Таблица 4. Основные параметры проектируемых мощных линейных ускорителей протонов

APT LANL, США	NSP JAERI, Япония	TRISPAL CEA, Франция	КОМАС, Корея
170 МВт протоны 100 мА непрер. 1,7 ГэВ	8 МВт протоны и H <sup>+</sup> 5,3 мА непрер. 1,5 ГэВ	24 МВт протоны 40 мА непрер. 600 МэВ	20 МВт протоны и H <sup>+</sup> 20 мА непрер. 1,0 ГэВ
350 МГц RFQ 6,7 МэВ	200 МГц RFQ 2,0 МэВ	352 МГц RFQ 5,0 МэВ	350 МГц RFQ 3,0 МэВ
700 МГц CCDTL 100 МэВ	200 МГц DTL 50 МэВ	352 МГц DTL 29 МэВ	700 МГц CCDTL 100 МэВ
700 МГц CCL 211 МэВ	200 МГц SDTL 100 МэВ	352 МГц SDTL 85 МэВ	700 МГц SCL 260 МэВ
700 МГц SCC 1700 МэВ	600 МГц SCC 1500 МэВ	352 МГц NC CCL 600 МэВ	700 МГц SCL 1000 МэВ

Некоторые из них уже сразу рассчитываются на непрерывный режим работы и большую мощность, а другие проектируются первоначально на импульсный режим с высоким полезным временем и в перспективе могут быть переведены в непрерывный режим работы. Первоначальное назначение большинства ускорительных комплексов заключается в научной разработке проблем нейтронной физики в различных диапазонах энергий нейтронов в процессе spallation - реакций и процессов адиабатической потери энергии нейтронами в высокодиффузной среде, которой является свинец, а также определение констант взаимодействий нейтронов с ядрами. Кроме решения указанных задач такие ускорители представляют большой интерес в области нейтронных технологий.

Концептуальная схема ускорителей большой мощности, параметры которых приведены в табл.4, примерно одинакова. В каждом из них после инжектора протонов, рассчитанного на сравнительно низкую энергию протонов или отрицательных ионов водорода (100...150 кэВ), следует ускоряющая система типа RFQ, формирующая пучки в ступки малой протяженности

(около 30°) и ускоряющая их до энергий нескольких МэВ. Исключение составляет проект СПФС [16], где применен оригинальный вариант структуры со встречными стержнями, в котором фокусировка осуществляется сверхпроводящим соленоидом, позволяющий ускорять пучки протонов с током нескольких сот мА.

Дальнейшее ускорение осуществляется в линке с трубками дрейфа со связанными ячейками (CCDTL) до энергий десятков МэВ, а затем до сотни МэВ в резонаторах с боковыми резонаторами связи (CCL). Этот участок ускорителя выполняется на «теплых» (не сверхпроводящих) резонаторах. Последующий участок ускорения (основная часть) до энергий 1; 1,5; 1,7 ГэВ как правило сооружается на сверхпроводящих резонаторах. На рис.6 для примера приведена концептуальная схема линейного ускорителя протонов АРТ, рассчитанного на энергию 1,7 ГэВ [12]. Обозначены энергия протонов на выходе из каждого участка ускорителя, рабочая частота, темп ускорения. Общая длина его 1220 м.

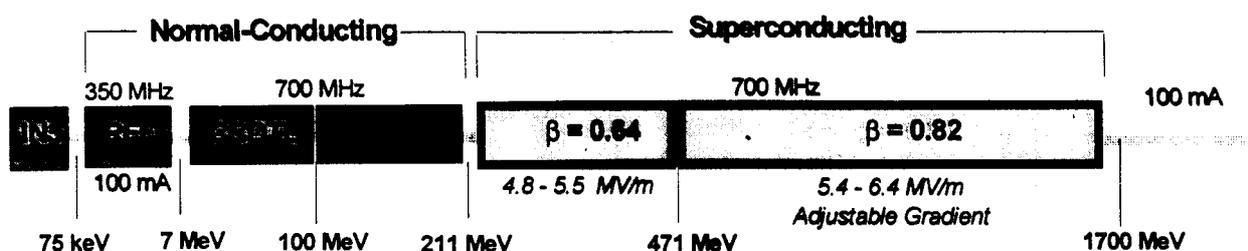


Рис.6. Концептуальная схема линейного ускорителя протонов на энергию 1 ГэВ (АРТ Лос Аламос)

Концептуальная схема сильноточного линейного ускорителя протонов для электроядерной энергетики, предложенная в России, несет в себе существенные отличия. Рассмотрены сразу два варианта ускорителей, рассчитанных на ток пучка протонов 30 и 250 мА и энергию 1 ГэВ. Первый из них имеет примерно те же параметры пучка, на которые рассчитан описанный выше блок Energy Amplifier с тепловой мощностью 1,5 ГВт. Отличительной особенностью его является использование сверхпроводящих на всех участках ускорения после участка с RFQ.

Главная отличительная особенность концепции линейного ускорителя, разрабатываемого в России, с током протонов 250 мА и энергией 1 ГэВ для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов ядерных реакторов [16] заключается в том, что на всех его участках используются только «теплые» (не сверхпроводящие) резонаторы, зато фокусировка пучка осуществляется сверхпроводящими соленоидами, СПФС. Малые поперечные размеры резонаторов на всех участках позволяют поместить их в сверхпроводящие соленоиды с сильными магнитными полями, сопровождающими пучок практически без потерь.

### Заключение

Приведенный материал дает возможность сделать следующие выводы:

1. Настоящий уровень развития физики и техники ускорителей позволяет ускорять пучки протонов до энергии 1 ГэВ и выше в непрерывном режиме, со средним током до 100 мА, достаточным для питания электроядерных энергетических установок. Для частного случая комплекса типа Energy Amplifier достаточны токи около 30 мА. Электроядерные энергетические установки для трансмутации отходов АЭС или наработки трития требуют пучков протонов энергией 1...1,7 ГэВ при непрерывном токе пучка 100...250 мА.

2. Среди возможных вариантов ускорителей такого уровня энергии и тока пучка, рассматриваются циклотроны и линейные ускорители. Общеизвестно, что циклотронный метод имеет ограниченные по предельному току пучки (10...12,5 мА), поэтому, несмотря на компактность циклотронов, предпочтение отдается линейным ускорителям, для которых предел может появиться при токах, больших сотен мА.

3. За последние годы работами многих научных коллективов много сделано в плане решения проблем, возникших на пути создания таких ускорителей:

а) Намечены пути снижения стоимости ускорительных комплексов и повышения КПД в процессе их эксплуатации. Применение сверхпроводящих резонаторов позволило значительно снизить потери ВЧ-мощности в процессе ускорения пучка.

б) Разработана оптимальная концептуальная схема ускорительного комплекса. На различных этапах ускорения применяются наиболее эффективные типы ускоряющих структур. Начальная часть ускорителя типа RFQ (или СИУ) формирует пучок и ускоряет до энергии, достаточной для эффективного захвата в структуры с трубками дрейфа ССДТ и в СДТ до энергии около 100 МэВ, а затем в сверхпроводящих резонаторах до энергии 1 ГэВ или выше.

в) Проблема потерь пучка, а следовательно, снижение радиации до уровня, позволяющего обслуживать ускоритель без специальной манипуляционной техники, решается в настоящее время путем совершенствования динамики пучка в ускоряюще-фокусирующем канале за счет эффективных фокусирующих систем (квадруполи и особенно сверхпроводящие соленоиды), увеличение апертуры ускоряющего канала, в результате применения сверхпроводящих резонаторов, а также оптимизации систем сопровождения пучка в линиях транспортировки.

г) Проблема высокой надежности (коэффициент использования не менее 85 %) решается применением эффективных генераторов ВЧ-мощности, их сроков службы и высокой мощности. Все остальные системы также рассчитаны на безотказную эксплуатацию.

д) В результате оптимизации всех элементов концептуальной схемы и применения новейших достижений ускорительной науки и техники стоимость такого сложного ускорительного комплекса оценивается на уровне 200 млн американских долларов, а КПД его работы - на уровне 50 %. Завершение сооружения таких ускорительных комплексов в некоторых центрах предполагается осуществить в конце 1-го десятилетия XXI века.

#### Литература

1. C. Rubbia, J.A.Rubio, S.Buono et al., Conceptual Design of a Fast Neutron Operated High Power Energy Amplifier. CERN/AT/95-44 (ET).
2. C.Rubbia, S. Buono, E.Gonsales, et al. A Realistic Plutonium Elimination Scheme with Fast Energy Amplifier and Thorium-Plutonium Fuel. CERN/AT/95-53 (ET).
3. J.Roud. Particle Physics Contribution to the Elimination of Nuclear Waste. CERN-SL/99-067 EET.
4. C.Rubbia, S. Buono, Y Cadi and J.A.Rubio. Fast Neutron Incineration in the Energy Amplifier as Alternative to Geologic Storage: the Case of Spain. CERN/LHC/97-01 (EET).
5. C.Rubbia. Resonance Enhanced Neutron Captures for Element Activation and Waste Transmutation. CERN/LHC/97-04 (EET).
6. C.Roche and C.Rubbia. Some preliminary Considerations on the Economical Issue of the Energy Amplifier, CERN/AT/95-45 (ET).
7. R.Fernandes, P.Mfndrilon, C.Rubbia and J.A.Rubio. A Preliminary Estimate of the Economic Impact of the Energy Amplifier. CERN/LHC/96-01 (EET).
8. N.Fietier. P.Mandrillon. A Three-Stage Cyclotron for Driving the Energy Amplifier. CERN/AT/(5-03 (ET).
9. J.M.Lagniel. A Review of LINAC and Beam Transport Systems for Transmutation, EPAC-98. p.93.
10. C Rubbia and J.A.Rubio. A Tentative Programme Towards a Full Scale Energy Amplifier. CERN/LHC/96-11 (EET).
11. D.Boussand et al., Preliminary Parameters of Proton Linacs Using the LEP-2 RF System when Decommissioning. CERN/SL-RF Technical Note 96-04, 1996.
12. S.O.Schriber. Developments of Linacs for ADT in USA. Second Intern. Conf. In ADTT and Appl. 1996, Kalmar, Sweden.
13. C.K.Park, H.E.Ahn, B.H.Choi, et al. The KOMAK-Projekt Accelerator and Transmutation Project in Korea. Proc. of the First Asian Particle Acceler. Conf. (APAC-98). KEK, Tsucuba, Japan, 1998. p. 319.
14. M.Micumoto, J.Kusano K.Hasekawa et al. A Proton Accelerator for Neutron Science Project at JAERI. APAC-98. p. 309.
15. R.A.Hardtcof, D.S.Stout, T.D.Stout. Project Status of the 1-GeV SNS LINAC. PAC 1999. p. 3597.
16. Г.И.Бацких, Б.П.Мурин, И.В.Чувилло и др. Сильноточные линейные ускорители для электроядерной энергетики с использованием сверхпроводящих устройств/ Совещание по ускорителям заряженных частиц. Протвино 1999. с. 203.
17. G.P.Lawrence. Los Alamos High Power Proton LINAC Design. Proceeding of the Intern. Conf. on ADT. Las Vegas, 1994. p.177.
18. Ускорительный комплекс для физики средних энергий (Мезонная фабрика)/ под редакцией Б.П.Мурина. Труды МПТИ АН СССР, № 16, 1979.