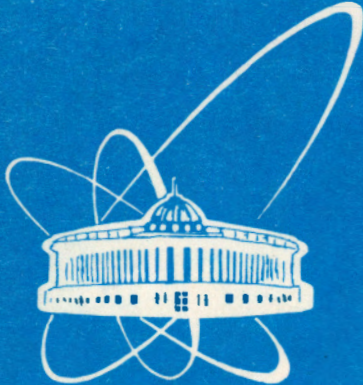


94-56



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P2-94-56

В.С.Барашенков

ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ  
ТЕХНОЛОГИИ

Направлено в журнал «Природа»

ОИЯИ  
БИБЛИОТЕКА

1994

Обсуждается современное состояние проблемы получения атомной энергии на основе гибридного использования ускорителя частиц и реактора-мишени на уране и тории. Таким образом, можно создать достаточно безопасный и практически неисчерпаемый источник энергии, который к тому же в процессе работы выжигает свои наиболее опасные радиоактивные «шлаки». Дополнительные резервы повышения его эффективности связаны с использованием в качестве «поджигающего факела» пучков тяжелых ионов и с утилизацией рождающихся мю-мезонов для катализа термоядерных реакций. Обзор рассчитан на широкий круг читателей, интересующихся проблемами атомной энергетики.

Работа выполнена в Лаборатории вычислительной техники и автоматизации ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 1994

Перевод автора

Barashenkov V.S.

P2-94-56

Problems of Electronuclear Technology

The present status of the problem of atomic energy production on the basis of a particle accelerator hybrid together with an uranium or thorium targetreactor is considered. In this way one can construct a rather safety and practically inexhaustible energy source which, moreover, «burns up» its most dangerous «slags». The additional reserves to increase the effectiveness of electronuclear plants are connected with the use of heavy ion beams as an «inflammatory torch» and with the utilization of created  $\mu$ -mesons in the process of the catalysis of thermonuclear reactions. The review is intended for readers interested in problems of modern atomic energetics.

The investigation has been performed at the Laboratory of Computing Techniques and Automation, JINR.

Запасы наиболее энергоемких и удобных для использования видов органического топлива – нефти и газа близки к исчерпанию. Оценки показывают, что их хватит лишь на несколько ближайших десятилетий. Более значительны запасы каменного угля. При современных темпах развития экономики они могут обеспечивать энергетику нашей планеты по крайней мере в течение пары сотен лет. Но это, к сожалению, связано с очень серьезными экологическими последствиями – с сжиганием значительной части, а по некоторым оценкам даже всего кислорода атмосферы, выбросом огромных количеств  $\text{CO}_2$ , серных окислов и т.д. Что касается возобновляемых источников энергии – гидроэлектростанций, ветряных двигателей, солнечных батарей, то их вклад, несмотря на большую важность и даже уникальность для некоторых специфических условий, весьма ограничен и не может стать определяющим<sup>1)</sup>.

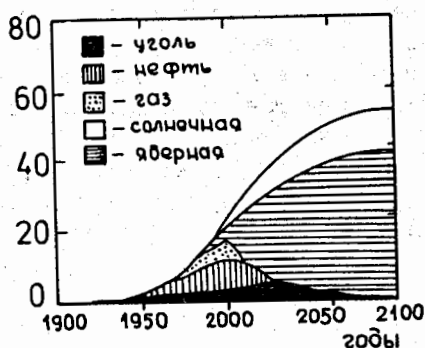


Рис.1. Оценки потребностей нашей планеты в электроэнергии. По данным Международного энергетического конгресса; в единицах  $10^6$  Гвт.

Радикальным решением проблемы, казалось бы, мог быть термоядерный синтез. Однако вопреки весьма оптимистическим первоначальным прогнозам на этом пути по-прежнему стоят еще чрезвычайно сложные

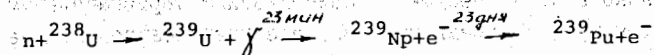
<sup>1)</sup> Существенные коррективы может внести создание мощных солнечных электростанций в космосе с транспортированием получаемой там энергии на Землю, но это – дело весьма далекого будущего.

научно-технические задачи. Специалисты-термоядерщики уже давно говорят о том, что в ближайшие 5-10 лет им удастся создать действующий прототип реактора, который покажет принципиальную возможность экономически выгодной управляемой термоядерной реакции, но эти сроки постоянно сдвигаются, и сегодня речь идет уже о начале XXI века. Ну а для создания промышленных установок потребуются, по-видимому, еще десятки лет. Однако и после того, как удастся зажечь "термоядерную горелку", ее энергетические запасы будут весьма ограниченными и использовать весь тяжелый водород, в изобилии содержащийся в земных океанах, не удастся - ведь кроме него в "горелку" все время следует добавлять тритий, которого в готовом виде на нашей планете нет. Для его наработки требуется литий ( $n+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He}+t$ ), добывать который трудно, поскольку в земной коре его мало и, кроме того, это - рассеянный элемент.

В принципе, возможно "горение" и чистого дейтерия, без примеси трития, но только при чрезвычайно высоких температурах из-за больших потерь на излучение. Огромные трудности связаны и с другими возможными термоядерными реакциями (например,  $p+d \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$ ,  $p+t \rightarrow {}^4\text{He}$ ). Как подобраться в них практически - пока совершенно не ясно.

Можно было бы надеяться на реакторы, в которых используется "противоположная" реакция - деление очень тяжелых, перегруженных нейтронами ядер урана. Таким путем сегодня в мире получают около 12% всей энергии, а в некоторых странах он стал уже основным. Например, во Франции на его долю приходится уже свыше 70%. Однако изотоп  ${}^{235}\text{U}$ , деление которого в реакторах как раз и дает львиную долю энергии, составляет в природном (натуральном) уране всего лишь 0.72%; другими словами, более 99% всего добываемого в мире урана идет в отвал. Повышение экономичности атомной энергетики и ее долговременные перспективы требуют разработки эффективных методов использования  ${}^{238}\text{U}$ , из которого в основном и состоит добываемый уран.

Один из путей в этом направлении - заставить атомный реактор работать в режиме, когда при каждом делении уранового ядра в среднем выделялось бы по крайней мере на один нейтрон больше, чем это требуется для поддержания обычной цепной реакции деления. За счет этого дополнительного нейтрона возможно образование легко выделяющегося ядра  ${}^{239}\text{Pu}$ :



Такой режим ядерных процессов (его называют бридингом) можно обеспечить в реакторах на быстрых нейтронах, а при некоторых специальных условиях (в так называемых тяжеловодных реакторах с примесью  ${}^{233}\text{U}$ ) и в области тепловых нейтронов. Однако образующееся при

этом число нейтронов лишь незначительно превышает минимально необходимое для бридинга, и переработка  ${}^{238}\text{U}$  в ядерное горючее в современных реакторах-наработчиках происходит весьма медленно. И все это время реактор для своей работы должен потреблять уже имеющиеся запасы  ${}^{233}\text{U}$ ,  ${}^{235}\text{U}$  или наработанного ранее плутония. Другими словами, переводу энергетики на реакторы-бридеры должен предшествовать еще длительный период "первоначального накопления капитала" - наработки больших количеств легко выделяющихся элементов.

Выход нейтронов резко возрастает при переходе к энергиям, много большим миллиона электрон-вольт. Этого нельзя добиться в цепных реакциях деления - высокоэнергетических нейтронов там мало, однако можно достичь с помощью непрерывной "подсветки" реактора очень быстрыми нейтронами от внешнего источника. Таким источником могла бы быть "термоядерная горелка", испускающая нейтроны с энергией 14 МэВ в окружающий ее урановый экран. Это - так называемый гибридный термояд. Им можно будет воспользоваться в будущем, когда удастся зажечь управляемую термоядерную реакцию.

Другая возможность - использовать для "подсветки" пучок заряженных частиц из ускорителя, конвертируемых в мишени в поток высокоэнергетических нейтронов. (О том, как это происходит - чуть ниже). Такой способ переработки  ${}^{238}\text{U}$  в плутоний получил название электроядерного метода. На кратком жаргоне специалистов его называют "электроядом". Наряду с реакторами деления и "термоядом" - это третий возможный путь развития атомной энергетики и, как мы увидим ниже, по-видимому, наиболее перспективный; во всяком случае, самый безопасный.

Казалось бы, найден замечательный метод получения атомной энергии, позволяющий утилизировать все запасы отвалного  ${}^{238}\text{U}$ . Для этого нужно только создать установку, состоящую из трех частей: достаточно мощного ускорителя протонов, урановой мишени, где происходит выделение тепла и накопление плутония, и электростанции, использующей выделяющееся в мишени тепло и питающей ускоритель. Такая трехзвенная установка будет сама снабжать себя энергией, а излишки в виде ядерного горючего или электроэнергии (или того и другого вместе) будут поставлять потребителям.

Впервые подобная идея была высказана Э. Лоуренсом, Э. Мак-Милланом и Н.Н. Семеновым еще в начале 50-х годов и вот уже более четырех десятков лет обсуждается физиками и энергетиками. На одном из последних советских совещаний, посвященных этой проблеме, в конце 80-х годов, я насчитывал представителей более 20 различных организаций. Регулярно проводятся международные конференции (последняя прошла осенью прошлого года в Японии). И вместе с тем до сих пор ни у нас, ни за рубежом не построено ни одного электроядерного реактора.

Когда речь идет о создании такой системы, сразу же возникает вопрос о том, а насколько она будет эффективной на практике? На примере термоядерной реакции можно видеть, как теоретически безупречная идея при ее практической реализации может столкнуться с огромными технологическими трудностями и ожидаемый "океан энергии" в течение многих лет останется недостижимой мечтой. Чтобы оценить потенциальные и практические возможности электроядерного метода, рассмотрим подробнее, что происходит, когда обладающая большой энергией частица попадает в урановую мишень.

Высокоэнергетическая частица дробит встречающиеся ей на пути ядра, передавая свою энергию из них протонам, нейтронам, а при высоких энергиях и рождающимся мезонам. В свою очередь эти частицы расщепляют другие ядра, увеличивая число распространяющихся в мишени частиц и т.д. Например, при столкновении с ядром урана протона, обладающего энергией в 1 ГэВ, рождается 25-27 быстрых и медленных частиц, в том числе около 20 нейтронов. Это в среднем в отдельных же столкновениях может родиться 30, 40 и более частиц. Множественность

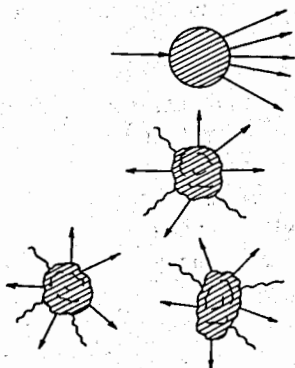


Рис.2. При столкновении высокоэнергетической частицы с атомным ядром из него вылетает большое число протонов, нейтронов и пи-мезонов. Сильно возбужденное остаточное ядро переходит в свое основное состояние путем "испарения" нейтронов и испускания гамма-квантов или может разделиться, а возбужденные осколки опять-таки теряют энергию, "испаряя нейтроны и испуская гамма-кванты"

испускаемых частиц быстро растет при увеличении энергии первичной частицы-снаряда. Если ее энергия порядка  $10^3$  ГэВ, то в ядерном столкновении могут родиться уже сотни вторичных частиц. В результате процесса многоступенчатого "размножения" в веществе мишени образуется мощный ливень протонов, нейтронов, мезонов и низкоэнергетических ядер-остатков.

Конечно, не всякое столкновение частицы с ядром сопровождается его расщеплением и вылетом новых частиц. Случаются и другие взаимодействия, когда, толкнув ядро, частица просто отскакивает от него, чтобы столкнуться со следующим. Однако, с учетом таких "холостых"

взаимодействий число распространяющихся в веществе частиц очень велико. Их траектории (треки) образуют в веществе мишени "каскадное дерево", от ствола которого отходит множество ветвящихся "сучков" и "сучечков". Например, когда в большой урановый блок попадает протон с энергией 300 МэВ, порождаемое им каскадное дерево состоит примерно из 700 веточек, а при увеличении энергии протона вдвое их число возрастает до трех тысяч.

Вылетающие из ядер заряженные частицы, протоны и мезоны, взаимодействуют с электронными оболочками атомов и, срывая с них электроны (ионизуя атомы), теряют значительную часть своей энергии. Поэтому они быстро замедляются. Протоны останавливаются, а мезоны распадаются. Иначе ведут себя нейтроны. У них нет электрического заряда, и они свободно проходят сквозь электронные оболочки атомов. Их энергия целиком уходит на ядерные взаимодействия. Развиваясь, ливень частиц в мишени все более обогащается нейтронами и постепенно превращается в интенсивный поток медленно диффундирующих нейтронов.

Под действием этих нейтронов в урановой мишени происходят такие же процессы деления и превращения ядер  $^{238}\text{U}$  в плутоний, как и в реакторе на быстрых нейтронах, только теперь эти процессы могут протекать в чистом  $^{238}\text{U}$ , никаких стартовых (затравочных) примесей легкоделящихся ядер не требуется, и скорость реакции несравненно больше.

Понятно, что такой процесс станет экономически выгодным в том случае, когда количество выделяющегося в урановом блоке тепла и энергия, которую можно получить путем "сжигания" образовавшихся ядер плутония, будут значительно превосходить энергию бомбардирующих протонов. Этого заведомо нельзя достичь при энергиях частиц, меньших нескольких сотен МэВ. В этой области особенно велики потери энергии на ионизацию атомов и протоны останавливаются, не успев образовать достаточно большого числа ливневых частиц. Положение спасает то, что число этих частиц, а следовательно, число образующихся ядер плутония и тепло, выделяющееся в мишени, возрастают намного быстрее, чем энергия бомбардирующих протонов. Это хорошо видно из Таблицы I, где приведены данные для большого блока натурального (не очищенного от примеси  $^{235}\text{U}$ ) урана. У же при 700-800 МэВ расход энергии покрывает затраты и процесс становится оправданным.

Интенсивность нейтронного ливня снижается поглощением его различными конструктивными деталями и теплоносителем, удаляющим тепло из активной зоны мишени. Выход плутония и количество получаемой энергии уменьшаются при этом приблизительно на 30-50%. Это иллюстрирует таблица II, где указаны данные для случая, когда мишенью является активная зона реактора на быстрых нейтронах (см.рис.3), и



Таблица I

T, ГэВ	n	N
0.3	12	12
0.5	34	32
0.7	57	59
I	89	81
2	180	164

t - энергия протона,  
n - число рождающихся нейтронов,  
N - число образующихся ядер плутония

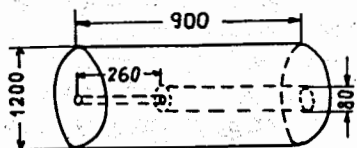
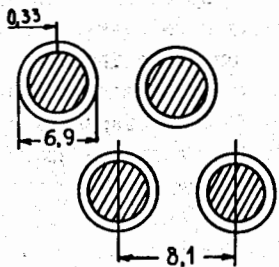


Рис.3

Активная зона электроядерного реактора. Уран в виде окиси  $UO_2$  запечатан в пены (тепловыделяющие элементы) с оболочкой из нержавеющей стали. Пространство между ними заполнено теплоносителем - жидким натрием. Пучок протонов поступает в осевую щель и встречает свинцовую заглушку. Все размеры в мм



используется обедненный уран из отвалов (примесь  $^{235}U$  в 2.5 раза меньше, чем в натуральном). Тем не менее выход энергии все равно остается достаточным для возмещения затрат на ускорение протонов и

для работы мощной электростанции<sup>2)</sup>.

Таблица II

Энергия протона, ГэВ	- I
Число родившихся нейтронов	- 43
В том числе вылетевших из мишени, %	- 26
Тепловыделение, ГэВ	- I.4

Оценки показывают, что на современном уровне ускорительной техники "электрояд" будет экономически наиболее выгодным при энергиях протонов 0.8-1.5 ГэВ, когда нейтронный ливень в мишени достаточно интенсивен, а стоимость ускорителя еще не слишком высока.

Наработку плутония и тепловыделение можно значительно увеличить, если в облучаемую протонами мишень с самого начала примешать немного легкоделящегося  $^{235}U$  или плутония. Так переход от чистого  $^{238}U$  к натуральному увеличивает выход плутония на 25%, тепловыделение - на 30%. Системы с такими добавками являются как бы промежуточной ступенью между реакторами на быстрых нейтронах и электроядерными установками с чистым  $^{238}U$ . Они позволяют перерабатывать и добываемый в природе уран, но в отличие от реакторов требуют для этого гораздо меньше "затравочного" ядерного горючего.

<sup>2)</sup> Следует особо остановиться на некоторых особенностях мишеней преобладание которыми часто приводит к недоразумениям при обсуждении КПД электроядерного метода. Размножение нейтронов, а, следовательно, и эффективность установки сильно зависят от размеров и плотности мишени. В небольших мишенях размножение нейтронов происходит значительно слабее благодаря их утечке через поверхность мишени. Однако в достаточно больших блоках через поверхность уходят практически уже не размножающиеся медленные нейтроны, поэтому дальнейшее увеличение размеров мишени существенно влияет на наработку плутония, но почти не сказывается на полном числе нейтронов. Например, переход к очень большой мишени в таблице II, снижающий утечку с 25% до нуля, увеличивает выход  $^{239}Pu$  с 37 до 54 ядер в то время, как полное число нейтронов возрастает всего на несколько процентов для таких мишеней; как и в случае реакторов, при этом следует использовать отражающие экраны. Следует также иметь в виду, что пучок ускоренных частиц должен вводиться через щель-углубление, т.к. иначе большая часть нейтронов, родившихся в первых ядерных столкновениях вблизи передней стенки, вылетает из мишени и оказывается потерянной.

Нужно заметить, что электроядерная технология, несмотря на свой 40-летний возраст, делает еще только первые шаги и тут много неиспользованных резервов. Вот только некоторые из них.

Выше говорилось о том, что протоны бесполезно растрчивают часть своей энергии, путаясь в "паутине" ионизационных процессов. Эффективность электроядерной установки можно было бы значительно повысить, если бы наряду с протонами в первичном пучке было много нейтронов. Такой сложный пучок можно получить, если вместо протонов ускорять атомные ядра, в состав которых входят нейтроны. Например, в пучке ускоренных дейтронов каждый протон "несет в себе" нейтрон. Сталкиваясь с мишенью, бомбардирующее ядро рассыпается на протоны и нейтроны, каждый из которых образует ливень вторичных частиц.

Можно надеяться, что использование более тяжелых, чем дейтрон, ядер-снарядов еще более увеличит выход нейтронов и соответственно наработку плутония. Однако тяжелые ядра сами обладают большим электрическим зарядом (кроме нейтронов они содержат и протоны) и потери их энергии на ионизацию уже не компенсируются добавочными нейтронами. Должен существовать некоторый оптимум, положение которого сегодня неясно.

Расчеты говорят, что ядра, тяжелее дейтрона, не стоит использовать (см. таблицу III), в то же время в опытах, выполненных в Дубне К.Д.Толстовым с сотрудниками, зафиксировано увеличение выхода нейтронов в пучке тяжелых ионов углерода. Возможно, это связано с тем, что теоретики пока не научились рассчитывать случаи так называемой полной дезинтеграции ядер, когда они почти целиком распадаются на составляющие их частицы, а по данным К.Д.Толстова и его сотрудников такие события происходят достаточно часто, если частицей-снарядом является тяжелое ядро.

Таблица III

Выход нейтронов  $n$  и тепловыделение  $Q$  в блоке натурального урана, бомбардируемого ядрами с энергией 1 ГэВ/нуклон. Все данные в расчете на один нуклон налетающего ядра

Ядро:	$p$	$a$	$\alpha$	$^{12}C$
$n$	89	103	89	67
$^o$ , ГэВ	4.6	5.1	4.8	3.8

Тем не менее, хотя этот вопрос требует еще уточнения, но и дейтронный пучок с энергией в 1 ГэВ/нуклон увеличивает наработку плутония примерно на 20-30%. Весьма заметная добавка!

Правда, с увеличением энергии она снижается, поскольку при высоких энергиях ионизационные потери слабо зависят от величины электрического заряда бомбардирующей частицы и при энергии, равной 2 ГэВ/нуклон составляют уже всего 10%.

Использование пучков тяжелых ядер становится снова выгодным при очень высоких энергиях: после того, как частицы, протоны или ядра, инжестрированы в камеры ускорителя и разогнаны до энергии примерно в 10 ГэВ/нуклон, их дальнейшее ускорение происходит уже с очень малыми потерями. Замена протонов на тяжелые ядра эквивалентна в этом случае десяти- и даже стократному увеличению интенсивности пучка. Вполне возможно, что мощные электроядерные установки в будущем будут работать именно на этом принципе.

Есть еще один крупный резерв повышения КПД электроядерных установок. Мы уже говорили о том, что "термоядерную горелку" можно зажечь лишь при очень высокой температуре - ведь для того, чтобы слиться, ядра дейтерия и трития должны преодолеть сильное электрическое отталкивание. У них одноименные заряды и отталкивание тем сильнее, чем ближе подходят они друг к другу. Пройти этот силовой барьер ядра могут лишь "с разбега", когда велика их скорость, а это возможно только в сильно нагретой плазме. Тем не менее можно попытаться перехитрить природу. В электроядерном реакторе рождаются мю-мезоны - частицы, во всем похожие на электрон, только в 200 раз тяжелее. Они довольно слабо взаимодействуют с ядрами и в большинстве поглощаются толстым экраном реактора, повышая его температуру. Однако, если поток мю-мезонов направить в дейтрон-тритиевую плазму, то притянутые положительными зарядами ядер отрицательно заряженные мю-мезоны, подобно электронам, образуют атомы, но с размерами в 200 раз меньшими электронных. Нейтральный мезоатом (отрицательный заряд мезона компенсирует в нем положительный заряд ядра) может теперь очень близко "подкрасться" к одному из ядер плазмы, и тогда произойдет реакция слияния, а сам мю-мезон освободится и может образовать следующий мезоатом. Мю-мезон выполняет в этом процессе роль катализатора, поэтому и процесс получил название мезокатализа.

Хотя мю-мезон живет всего лишь несколько миллионных долей секунды (в отличие от электрона он - неустойчивая, короткоживущая частица, распадающаяся на электрон и нейтрино, см. рис.4), расчеты и опыты убеждают в том, что прежде, чем распасться, он успевает осуществить более сотни реакций слияния, и в каждой выделяется энергия и рожда-

ется нейтрон, который в свою очередь может участвовать в реакции деления или в превращении ядра урана в плутоний. Получается своеобразный гибрид "электрояда" и "термояда".

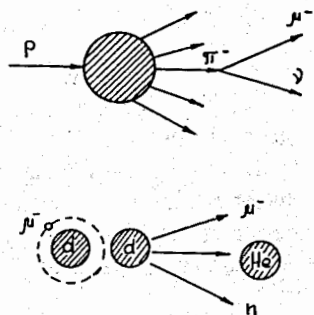


Рис. 4. Схема мезокатализа в электроядерной установке

трансмутлирующих  $^{238}\text{U}$  в плутоний.

Как бы там ни было, это — весьма интересное и перспективное направление электроядерной проблемы.

За несколько десятилетий исследования электроядерных процессов накоплены экспериментальные данные и создана достаточно надежная, подтвержденная опытом теория. Сегодня у нас есть все необходимое для создания опытно-промышленной установки и нет сомнений, что она будет работать весьма эффективно<sup>3)</sup>.

3) В качестве примера одного из таких проектов можно привести предложения, разработанные в ОИЯИ и ФЭИ (Обнинск) под руководством К.Д. Толстова и П.Л. Кириллова. Предлагаемая демонстрационная опытно-промышленная установка включает циклотрон для ускорения  $\alpha$ -частиц с энергией 1.5 ГэВ/нуклон и током 100 мкА и мишень в виде подкритического (с  $k_{эфф} = 0.95$ ) уранового реактора, обогащенного изотопом  $^{235}\text{U}$ . Реактор охлаждается рв-ви — теплоносителем со скоростью 2.5 м/с и температурой на выходе около 500°C. Центральная часть мишени, на которую направлен пучок  $\alpha$ -частиц, тоже состоит из рв-ви — сплава. Активная зона окружена толстым отражающим стальным экраном. Пар, подаваемый на турбогенераторы электростанции, будет иметь давление МПа и температуру 435°C, что соответствует параметрам действующих атомных электростанций.

При потребляемой ускорителем электрической мощности в 1 МВт выделяемая в реакторе тепловая мощность составит 15 МВт.

Стоимость установки в целом оценивается ее авторами в 30–40 миллионов руб. (в ценах 1990 г.). Предполагается, что она может действовать в течение нескольких десятков лет.

Правда, в таком гибриде тоже еще далеко не все ясно. В частности, беспоконность вызывает необходимость создания плотной (по-видимому, под большим давлением) тритиевой плазмы, что создает опасность аварийных ситуаций и "расползания" радиоактивного трития, который крайне трудно изолировать (по этой причине в США и ряде других стран сегодня вообще запрещены работы с тритием). Технология мезокатализа ждет безопасных конструкций. Тем не менее, теоретические прогнозы в этой области весьма обнадеживающие. Некоторые физики даже считают, что процесс в электроядерной установке можно организовать так, что из вспомогательного мю-мезонный канал может стать основным источником нейтронов,

Установка, как уже говорилось, должна быть трехзвенной. При этом, пожалуй, самым трудным будет строительство сильноточного ускорителя. В машинах, используемых для ускорения частиц в опытах по физике высоких энергий, очень мал КПД преобразования подводимой электроэнергии в энергию пучка ускоренных частиц — всего лишь 0.1–1%. Понятно, что для электрояда этого совершенно недостаточно. Быстрый прогресс ускорительной техники и теоретические разработки указывают на возможность создания установок с очень большими КПД. Имеются вполне реальные технические возможности для создания сильноточных ускорителей с КПД, равным 60–80%. Есть основания полагать, что в будущих установках, специализированных на производство энергии, коэффициент преобразования электричества в энергию пучка будет даже еще выше (в частности, будут использоваться экономичные магниты на сверхпроводниках и т.д.). Сильный толчок в этом направлении дали работы по космической программе СОИ.

Оценки показывают, что для накопления тонны плутония в год нужен ускоритель с интенсивностью протонного пучка около сотни миллиампер (при энергии в 1 ГэВ). Это очень много — на полтора-два порядка больше, чем у самых сильноточных работающих сегодня машин (см. рис.5). Тем не менее, принципиальных препятствий на этом пути не видно — трудности лишь технического плана.

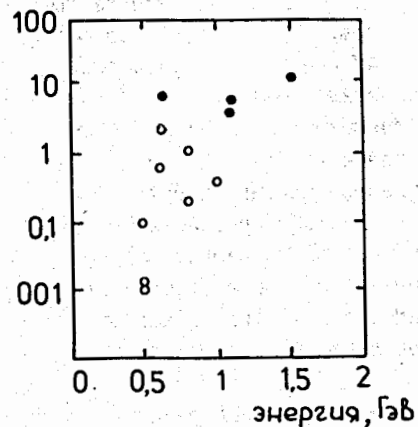


Рис. 5. Ток (мА) и энергия действующих (○) и строящихся (●) ускорителей

Одна из них — "чистый" вывод пучка. Поскольку его интенсивность очень велика, то "высадка" даже небольшой доли ускоренных частиц на стенках камеры создаст чрезвычайно высокую радиоактивность. Устранять неполадки, неизбежно возникающие при длительной работе любого устройства, будет практически невозможно.

Сегодня известно уже несколько хорошо проработанных проектов электроядерных систем с сильноточными ускорителями, отечественных и зарубежных, которые будут работать с большим КПД и в которых вывод пучка будет происходить "со многими девятками" (т.е. на уровне 99.99...%). Существуют проекты



циклотронов, где пучок ускоряемых частиц раскручивается по достаточно компактной, туго сжатой спирали, и предложения использовать большие линейные ускорители с прямолинейным пучком постепенно разгоняющихся частиц. Здесь есть, из чего выбирать, хотя многие физики отдадут предпочтение циклотронам как весьма надежным в эксплуатации и наиболее освоенным в нашей стране.

До Чернобыльской катастрофы мы были уверены в безопасности атомной энергетики – ведь стоит реакции деления в атомном реакторе пойти чуть интенсивнее – и в активную зону автоматически вдвигаются поглощающие стержни. Число нейтронов там сразу снижается и реакция возвращается на "исходные рубежи". Кроме медленной аварийной защиты, МАЗов есть еще и экстренная, быстрая – БАЗы, когда поглощающие стержни буквально выстреливаются в активную зону. Казалось бы – полная безопасность. И по экологическим показателям атомные электростанции выглядели в сотни раз более чистыми, чем, например, традиционные, работающие на каменном угле, мазуте или торфе и сильно загрязняющие прилегающую местность вредными выбросами. Но вот катастрофа в Чернобыле и ряд аварий на других советских и зарубежных атомных предприятиях показали, что хотя и очень редко, но все же иногда могут возникать совершенно непредвиденные потенциально опасные ситуации. А тот факт, что расчетная вероятность крупных аварий мала, не успокаивает население – ведь жить по соседству со спрятавшимся в недрах атомного реактора радиоактивным джином весьма неуютно. Мощное движение "зеленых" в наше время нельзя сбрасывать со счетов. Уверенность в безопасности могут дать лишь системы, в которых нацело исключена возможность возникновения саморазгоняющихся цепных реакций.

К тому же отходы (или, как говорят специалисты, "хвосты") атомных электростанций обладают огромной, а главное, сохраняющейся тысячелетиями смертельно опасной для всего живого радиоактивностью. Надежное захоронение таких "хвостов" – сложная и дорогостоящая задача. Можно быть уверенным, что уже в недалеком будущем стоимость вырабатываемой на атомных электростанциях энергии будет определяться не столько затратами на добычу урана и эксплуатацию самих станций, сколько расходами на долговременное захоронение их радиоактивных отходов.

В электроядерных реакторах тоже развивается цепная реакция деления и, следовательно, немало радиоактивных "шлаков". Однако вот тут-то и проявляется главная особенность таких систем: у них нет критического режима – балансирующей "на лезвии ножа" цепной реакции, поэтому такие системы, с одной стороны, гарантированы от сползания в неуправляемый режим, а с другой стороны добавки примесей не выключают электроядерный процесс, а лишь снижают его продуктивность. Мощ-

ные ливни частиц дробят и расщепляют мишень из радиоактивных отходов, а рассеивающиеся нейтроны продолжают свой путь внутри урановых слоев. Выход энергии несколько снижается, но все равно остается достаточно большим. Как образно заметил участник одного из семинаров, "электроядерный реактор способен пережечь даже попавшие в него консервные банки".

Конечно, пережигать целиком все радиоактивные отходы весьма накладно. Целесообразно уничтожить лишь наиболее опасные, долгоживущие изотопы тяжелых элементов, а для короткоживущих можно построить сравнительно дешевые хранилища. Другими словами, из радиоактивных "хвостов" следует предварительно экстрагировать наиболее опасные компоненты и вот это, уже сравнительно небольшое количество материала, дожигать в электроядерном реакторе. Такой режим экономически весьма выгоден.

Проблема радиоактивных отходов атомных электростанций сегодня настолько актуальна, что рассматриваются проекты электроядерных установок, целиком специализированных на их "дожигание", производства энергии от таких реакторов не требуется. Это так называемые конверторы или трансмутаторы.

Мощные потоки частиц и высокую температуру электроядерного реактора можно использовать для дезинтеграции и других особенно опасных веществ, химическая переработка которых дорога или связана с экологическими проблемами. Впрочем, для этого, возможно, более подходящими будут конверторы, в которых протонный пучок заменен электронным – ведь дезинтеграция химических соединений связана с перестройкой молекулярных, а не ядерных связей.

Электронные ускорители могут быть сделаны значительно более сильноточными, чем протонные; при определенных условиях это может дать им преимущества и при использовании в конверторах радиоактивных элементов. Такая возможность сегодня тоже прорабатывается.

Кроме накопления радиоактивных отходов с атомной энергетикой связана еще одна грозная опасность – возможность неконтролируемого распространения атомного оружия, поскольку плутоний, образующийся в реакторах атомных электростанций, в электроядерных установках и в урановых экранах будущих термоядерных генераторов, может быть использован в качестве ядерной взрывчатки в атомных бомбах. К примеру, наработка плутония в электроядерных установках будет измеряться тоннами, и это обстоятельство заставляет правительство с большой осторожностью относиться к проектам строительства таких устройств.

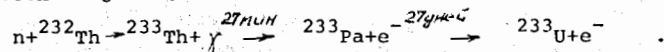
Избавляясь от экологических проблем, связанных с добычей больших количеств практически не используемого урана и долговременным, почти вечным хранением радиоактивных веществ, мы приобретаем другую,

не менее тревожную проблему. Казалось бы — тупиковая ситуация, и в последние годы все большее число ученых стали склоняться к мысли о том, что ядерную энергию следует вообще исключить из энергетического баланса нашей планеты, даже ценою резкого снижения темпов экономического развития. Возможно, мол, когда-нибудь она будет реабилитирована где-нибудь на Луне или какой-либо другой безжизненной планете, но на Земле ей нет места. Сегодня эти мысли обсуждаются во многих экологических изданиях.

Тем не менее, выход есть, и достаточно безопасную атомную энергетику создать можно.

Недавно газеты и журналы с интересом обсуждали предложения, с которыми выступил в Европейском центре ядерных исследований его генеральный директор К.Руббин. Существенно новых среди них было два.

Во-первых, для того, чтобы исключить соблазн воспользоваться наработанными легкоделяющимися элементами в атомном оружии, Руббин считает необходимым базировать атомную энергетику не на уране, а на тории. Его запасы на Земле даже несколько больше, чем урана, а под действием нейтронов в нем вместо плутония образуется легкоделящийся изотоп  $^{233}\text{U}$ :



Хотя, в принципе, его тоже можно использовать в качестве ядерной взрывчатки, выделить его из ториевого реактора крайне трудно. Дело в том, что уран и плутоний — разные элементы и их можно сравнительно просто разделить химическими методами. К тому же в этом случае приходится иметь дело в основном только с  $^{239}\text{Pu}$ , другие изотопы плутония не существенны. А вот в ториевом реакторе образуется целый набор изотопов урана (см. таблицу IV, где указаны изотопы, с наибольшей вероятностью образующиеся в электроядерном реакторе). Некоторые из них "отравляют" ядерное оружие, но отделить их химическими методами невозможно — для этого нужны громоздкие и дорогостоящие диффузионные заводы, работающие к тому же в условиях чрезвычайно высокой радиоактивности. Практически это — неразрешимая задача; во всяком случае, такое производство не удастся скрыть от внешнего наблюдения.

Эффективность электроядерного процесса с торием несколько ниже, чем с ураном — при энергии протонов в 1 ГэВ выход нейтронов снижается примерно на четверть. Однако КПД установки можно значительно увеличить, если в качестве мишени использовать торий, обогащенный легкоделяющимися элементами, и превратить мишень в подкритический реактор. Правда, при этом мы снова возвращаемся к проблеме стартовых запасов легкоделяющихся элементов, но даже если начинать с необога-

Таблица IV

$p + {}^{232}\text{Th} \rightarrow {}^{233}\text{U}$
$^{233}\text{U}$ (43.7%)
$^{234}\text{U}$ (30%)
$^{235}\text{U}$ (4%)
$^{236}\text{U}$ (22%)
$^{238}\text{U}$ ( $\approx 0.07\%$ )
$^{239}\text{Pu}$ ( $\sim 0.1\%$ )

щенного тория, то, как показывают расчеты, благодаря наработке установка довольно быстро выйдет на критический режим, который можно далее регулировать токам ускорителя. При этом реактор останется вполне без опасным, поскольку стоит простым нажатием кнопки сбросить напряжение с ускорителя, как "подсветка" мгновенно прекратится и цепная реакция так же быстро затухнет.

Насколько быстро происходит выход электроядерной системы с нулевого стартового положения на рабочий режим, видно на примере расчетов для блока

натурального урана, облучаемого пучком протонов с энергий 1 ГэВ интенсивностью около 100 мА. Уже через 3 месяца после начала процесса поток нейтронов возрастает в 2.3 раза, а через 6 месяцев — почти в 7 раз. Для ториевых блоков аналогичного расчета и экспериментов пока нет, но можно думать, что рост будет примерно таким же.

Вторая существенная деталь в предложениях К.Руббина состоит в идее отказаться использовать "электрояд" как наработку горючего для реакторов на тепловых нейтронах, когда каждая электроядерная установка питает десяток дочерних реакторов, и рассматривать пару ускоритель плюс реактор как самостоятельную энергоцентрально, полностью утилизирующую тепло ионизационных потерь и реакций деления тория и наработанного  $^{233}\text{U}$ . Требуемая интенсивность пучка протонов, а, следовательно, и трудности со строительством ускорителя в этом случае значительно снижаются. Оценки показывают, что вполне достаточен ускоритель с током в несколько десятков мА, т.е. довольно близкий по параметрам к тем, которые уже работают в настоящее время.

Экономические прикидки подсказывают, что энергия ториевого "электрояда", по крайней мере на первых порах освоения технологии, будет, по-видимому, дороже той, которая получается на действующих атомных станциях, однако вопрос в том, какую цену правительства и общество готовы платить за обладание относительно чистым источником энергии, практически неисчерпаемым (земных запасов тория хватит на тысячи лет) и весьма надежным. Игра стоит свеч!

Как это уже случалось и ранее, научная идея, грозящая переворотом в экономике, выходит на первый план, в плоскость практической реализации, когда создаются подходящие экономические и политические

условия. Карл Руббиа выступил со своим предложением "подкритического ториевого электрояда" как раз вовремя – когда два других пути атомной энергетики, чисто реакторный и термоядерный, встречают все большее сопротивление. Заслугой К.Руббиа является то, что он уловил изменение ситуации и своим авторитетом выдающегося физика привлек внимание к перспективам электроядерной энергетики.

Конечно, было бы ошибкой думать, что на новом пути уже все ясно, ведь в мире еще не построено пока ни одной действующей электроядерной станции и тут еще могут обнаружиться невидимые нам подводные камни. Тем не менее, нет сомнений, что в целом идеи здесь правильные и можно уверенно приступать в проектированию опытных установок, которые позволяют уточнить детали.

В заключение я хотел бы поблагодарить академика РАН А.М.Балдина, члена-корреспондента РАН М.Г.Мещерякова, профессоров И.В.Пузынина и К.Д.Толстова за обсуждение физических аспектов проблемы, член-корреспондента РАН В.П.Джелепова, профессоров А.А.Глазова и И.А.Шелаева за разъяснение возможностей ускорительной техники, а профессора П.Л.Кириллова за обсуждения особенностей мишенного комплекса.

Рукопись поступила в издательский отдел  
24 февраля 1994 года.