

P2-2003-144

В. С. Барашенков

**«ЭЛЕКТРОЯД» — ИСТОКИ И БУДУЩЕЕ
(РЕСУРСЫ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ)**

Сокращенный текст доклада на XII международной конференции по избранным вопросам современной физики, посвященной 95-летию Д. И. Блохинцева (Дубна, июнь 2003)

Направлено в журнал «Природа»

Плюсы и минусы

Урановые и ториевые руды – один из важнейших ресурсов нашей планеты. Сегодня уже свыше 17% мирового производства электроэнергии приходится на атомные электростанции, использующие урановое горючее. В некоторых странах доля атомного электричества значительно больше. Например, наша северная соседка Швеция производит на атомных станциях половину всей своей электроэнергии, Франция более трех четвертей. В Китае недавно принята программа увеличения в 5 - 6 раз вклада атомных электростанций (АЭС). Атомная энергетика развивается в Индии, где ее долгосрочные перспективы связываются с торием, которым очень богата эта страна. Заметную, хотя пока и не определяющую роль, атомные электростанции играют в США и в нашей стране.

Как и любое крупное производство, АЭС приносят в нашу жизнь новые специфические угрозы и имеют противников, настаивающих на замене их иными, более привычными нам источниками энергии. Особенно привлекательными выглядят возобновляемые источники – гидро- и геотермические станции, энергия солнца и ветра, использование биомассы в качестве топлива. Сегодня суммарный вклад таких источников энергии составляет около 20%. Несмотря на перспективные усовершенствования в этой области, трудно рассчитывать, что их удельный вес увеличится настолько, что сможет удовлетворить наши быстро возрастающие энергетические потребности, которые по данным Мирового энергетического союза в ближайшие 10 лет возрастут не менее чем, на 50 - 75%.

Оценки показывают, что в ближайшие 20 - 30 лет львиную долю энергии по-прежнему будет давать углеводородное топливо, благодаря чему уже к началу следующего десятилетия содержание CO_2 в земной атмосфере возрастет по сравнению с 1990 г. на 50 - 60% и, если не принять ограничивающих мер, далее будет возрастать с меньшим темпом, что грозит глобальными экологическими катаклизмами.

Все это убеждает в том, что, несмотря на имеющиеся в обществе опасения, атомная энергетика также будет развиваться быстрыми темпами, особенно если принять во внимание, что киловатт "атомной электроэнергии" стоит значительно дешевле "углеводородной".

Однако каковы ресурсы АЭС? Что делать с нарабатываемыми ими чрезвычайно опасными радиоактивными "шлаками"? Можно ли

исключить несанкционированное военное использование накапливающихся в реакторах легкоделящихся изотопов?

Энергия в реакторах АЭС выделяется в реакциях деления, что сопровождается рождением большого числа нейтронов, часть которых вызывает последующее деление урановых ядер, некоторые гибнут в конструктивных материалах, а остальные поглощаются ядрами урана, превращая их в ядра плутония – легко делящуюся "ядерную взрывчатку". Все это сегодня хорошо известно. Но вот что нужно иметь в виду:

Во-пер вых, легко делится лишь один из изотопов, который в добываемом из руд уране составляет всего лишь 0.7%. Остальная часть урана идет в отвал. Ее можно утилизировать только в так называемых быстрых реакторах, использующих высокоэнергетическую часть спектра деления. Однако и в этом случае нельзя обойтись без значительной примеси дефицитного легкоделящегося уранового изотопа или плутония (в стандартном топливе быстрых реакторов МОХ содержится около 25% двуокиси $PuO - 2$ и 75% двуокиси "инертного" ^{238}U).

Во-вторых, в реакторе должен соблюдаться очень строгий баланс рождающихся и поглощенных нейтронов. Это характеризуется "коэффициентом мультипликации нейтронов", равным отношению чисел нейтронов в двух последовательных генерациях:

$$K_{eff} = N_{n-1}/N_n.$$

Если $K_{eff} < 1$ – реакция затухает, если $K_{eff} > 1$ – реализуется взрывной режим разгонки реактора. Любая АЭС связана с потенциальной опасностью перехода через "красную черту" в область $K_{eff} > 1$. Наконец, в результате поглощения нескольких нейтронов образуются тяжелые трансурановые ядра, радиоактивность которых сохраняется в течение сотен тысяч и даже миллионов лет. Создавать и эксплуатировать "могильники" для таких ядер – дело дорогое и с непредсказуемыми последствиями, ведь прогнозы каких-либо местных земных условий на миллионы лет вперед весьма рискованны. Как однажды пошутил Д.И. Блохинцев, руководивший проектированием и строительством первой атомной электростанции, иметь дело с атомными реакторами – это все равно, что целоваться с тигром. В принципе можно, но делать это нужно крайне осторожно.

Тем не менее, есть обнадеживающий путь, интерес к которому Д.И. Блохинцев сохранял до конца своих дней.

Гибрид реактора с ускорителем

Известно, что идею электроядерных устройств полвека назад первыми предложили Лоуренс в США и академик Семенов в России. Это было время пика холодной войны и многие разделы ядерной физики, тем более имевшие отношение к ее военным применениям, оставались глубоко засекреченными. Даже само слово "реактор" заменялось кодовым термином "кристаллизатор", а нейтроны назывались метеоритами или нулевыми точками. Не удивительно, что некоторые важные открытия и идеи независимо повторялись в различных местах. Идея объединить две основные "атомные машины" – ускоритель частиц и урановый реактор родилась и в небольшом поселке Обнинск под Малоярославцем, где располагался скрытый лесным массивом от посторонних глаз секретный объект – Физико-энергетический институт. В секретных бумагах он именовался Лабораторией В МВД СССР, а во всех других случаях – как почтовый ящик 276. Сегодня мало кто знает, что этот широко известный ныне реакторный центр начинался с разработки ускорителей и Д.И. Блохинцев, ставший впоследствии его директором и одним из строителей первой атомной электростанции, принимал в этом активное участие. Поэтому идея "электрояда" – размножения в урановом блоке лавины нейтронов, родившихся вследствие дробления ядер урана пучком разогнанных ускорителем частиц, была вполне закономерной.

Из Таблицы I, где показано, сколько нейтронов и заряженных частиц рождает при столкновении с ядром урана протон с энергией E , видно, что в области $E \simeq 1$ их число, в основном нейтронов, составляет несколько десятков. Конечно, 50 лет назад еще не имелось таких точных данных, они появились значительно позднее, но были известны выходы частиц при столкновениях протонов с легкими и тяжелыми ядрами фотоэмульсии и приближенно их можно было экстраполировать к изотопам урана.

Следовало ожидать, что родившиеся заряженные частицы будут быстро терять свою энергию при взаимодействии с электронными оболочками атомов, а не имеющие электрического заряда нейтроны будут тратить энергию на создание каскада, цепочек следующих друг за другом расщеплений, порождая разрастающийся ливень замедляющихся нейтронов, которые в конце концов будут поглощаться ядрами урана ^{238}U , трансмутируя их в ядра плутония.

Таблица I

Число частиц, рождающихся в столкновении

$P + {}^{238}\text{U}$ при энергии E .

N_n – нейтроны, N_{tot} – суммарное число нейтральных и заряженных частиц

E , ГэВ	0.2	0.5	0.7	1.0	1.5	2.0
N_n	12	16	19	21	24	27
N_{tot}	15	18	23	26	33	39

Оценки предсказывали, что каждый первичный протон с энергией 0.5 - 1 ГэВ должен рожать много десятков ядер плутония, нарабатывая оружейный материал, что в 50-х годах было жизненно важно, и многократно увеличивая, при массовом использовании электроядерных установок, ресурс атомной энергетики. Правда, для наработки промышленно значимых количеств плутония требовался ускоритель с фантастическим по тем времена (да и сегодня!) током в сотни мА, однако вопросы обороны заставляли прорабатывать и такую крайне трудную, но в принципе достижимую возможность.

Вместе с тем просматривалось и более простое применение "электрояда" – для снижения коэффициента K_{eff} и повышения тем самым безопасности реактора, когда внешняя подсветка нейтронами позволяет работать ниже "красной черты", а выключение тока ускорителя гарантирует быструю остановку реактора. Для этого можно было надеяться использовать ускорители с несколько меньшими токами.

Фабрики плутония

Переезд Д.И. Блохинцева в Дубну, где работал 660-МэВный протонный фазотрон и проектировалось строительство мощного импульсного реактора открывало замечательные возможности для изучения электроядерной технологии. Здесь на пучке фазотрона группой В.И.Гольданского были выполнены эксперименты с огромным, 20-тонным блоком урана. Выход нейтронов составлял около 70 нейтронов на один первичный протон, что было прекрасным подтверждением теоретических ожиданий. Нужно сказать, что измерения группы Гольданского до сих пор остаются уникальными – ни у нас,

ни за рубежом нет экспериментов с таким большими урановыми блоками.

Поскольку дальнейшие эксперименты, включающие различные подкритические сборки с ураном, плутонием, различными типами теплоносителей и радиационной защиты были сложны и дороги, по инициативе Блохинцева в Дубне начались работы по созданию математической модели электроядерного реактора. Такая модель была создана в начале 60-х годов и продолжает совершенствоваться до настоящего времени. В США с небольшим запозданием аналогичная модель была создана в Окриджской национальной лаборатории. Обе модели давали весьма близкие результаты.

Расчеты (см. Таблицу II) показывают, что даже в "чистом", добываемом непосредственно из руды уране, без дополнительной примеси ^{235}U или ^{239}Pu , что имеет место в промышленных реакторах, когда K_{eff} составляет всего лишь 0.3 - 0.4, уже можно осуществить самоподдерживающийся цикл, при котором производимая энергия не только достаточна для возмещения затрат на ускорение протонов (с учетом потерь, сопровождающих конверсию тепловой энергии в электрическую), но и остается значительный избыток. Энергетический выигрыш

$$G = (Q - E)/E,$$

где Q - выделяющееся тепло, E - энергия бомбардирующих протонов, становится значительно большим единицы уже при энергии в несколько сотен МэВ. В действительности энергетический выигрыш еще больше, если учесть тепло Q^* , выделяющееся при сжиганииработанного плутония в самой электроядерной установке или в реакторах других АЭС".

$$G_{tot} = G + Q^*/E.$$

Примесь легкоделящихся изотопов урана и плутония (например, при использовании стандартного топлива быстрых реакторов MOX при $K_{eff} = 0.97 - 0.98$) во много раз увеличивает выход плутония и энергетический выигрыш.

Таблица II

Выход ядер ^{230}Pu и энергетический выигрыш в очень большом блоке естественного урана (в расчете на один бомбардирующий протон с энергией E)

$E, \text{ГэВ}$	N_{Pu}	G	G_{tot}
0.1	1.3	0.7	3.46
0.2	5.5	1.5	7.0
0.35	18	2.7	13
0.66	55	4.8	22.0
0.8	75	5.3	24.1
1.0	98	5.5	25.6
1.5	155	5.8	27.4
2.0	210	6.0	27.7

В начале 70-х годов П.Л.Кирилловым был организован в Обнинске "электроядерный семинар", куда съезжались физики из многих институтов страны. Результатом работ семинара явилась справка в СРЕДМАШ с предложением более широко развернуть электроядерные исследования. Предложение было принято, и в качестве головной, координирующей организации был выбран московский Институт экспериментальной и теоретической физики. Тем не менее, несмотря на многообещающие перспективы, электроядерные исследования продвигались довольно медленно. Отчасти благодаря тому, что был найден весьма эффективный метод наработки ^{235}U путем центрифугирования, проблема ядерного горючего потеряла остроту и тратить огромные средства на создание ультрасильноточных ускорителей представлялось нерациональным. В это время, задолго до Чернобыльской катастрофы, мало внимания уделялось повышению безопасности АЭС, чему могли бы помочь электроядерные системы, и все внимание было "заполяризовано" на производство возможно больших количеств плутония. Был разгар холодной войны.

Новая стратегия

Существенный перелом в отношении к электроядерным системам связан с именем Карло Руббиа, предложившего схему "один уско-

ритель – один безопасный подкритический реактор”, потребляющий нарабатываемый им плутоний и трансмутирующий радиоактивные отходы, свои и, возможно, из реакторов других АЭС. Поскольку перед такими системами не стоит цель наработки излишнего плутония (холодная война к этому времени ушла в прошлое), то для функционирования таких систем вполне достаточно 10 - 15 мА тока ускорителя, что в пределах современных технических возможностей. (При этом мы фактически возвращаемся к идее УУР – управляемого ускорителем реактора, обсуждавшейся в начале 50-х годов в Обнинске. Не зря говорится, каждому овощу – свое время!). По оценке К. Руббинга и его сотрудников производство электроэнергии электроядерной АЭС будет в 2 - 3 раза дешевле, чем на электростанциях с углеводородным топливом. Не исключено, что эти оценки несколько оптимистичны, однако пока это – единственная возможность избавиться от долгоживущих радиоактивных отходов и это компенсировало даже некоторое увеличение стоимости электроэнергии, если бы такое имело место.

В настоящее время в мире еще нет ни одной работающей электроядерной установки, однако такие устройства с различным уровнем тепловой мощности проектируются и уже близки к началу строительства в нескольких лабораториях.

На рис. 1 показан продольный разрез установки, которая в ближайшие 2 - 3 года будет создана в Дубне. Пучок протонов, ускоренных фазотроном до 660 МэВ, направляется в центр установки на цилиндрическую свинцовую мишень с диаметром 8 смю. Образовавшиеся в свинце каскадные частицы размножаются в окружающем слое из 354 кг топлива МОХ.

Цилиндрический свинцовый рефлектор отражает “убегающие нейтроны”, возвращая их в активную зону. Выделяющееся в установке тепло будет сниматься потоком воздуха, а в ее центральной, наиболее нагреваемой части – потоком гелия. Установка окружена толстым слоем бетонной защиты. Кроме этого, она содержит

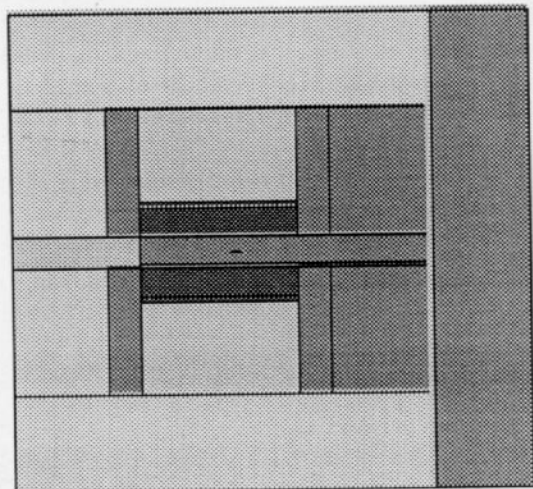


Рис. 1. Один из вариантов конструкции создаваемой в Дубне электроядерной установки

Установка будет работать с $K_{eff} \simeq 0.94$. Это далеко от "красной черты" и гарантирует полную безопасность и в то же время позволяет получить несколько десятков кВт тепловой энергии. Сравнительно немного, благодаря чему выделяющееся тепло можно удалить продувкой воздуха или гелия, и вместе с тем этого вполне достаточно для большинства опытов. В экспериментах будут получены данные, необходимые для проектирования полномасштабных промышленных электроядерных АЭС. Проект поддержан Международным научно-техническим центром, выделившим для этого 1.2 миллиона долларов США.

Какой должна быть электроядерная АЭС?

Таблица III показывает влияние ионизационных потерь на выход нейтронов и тепловыделение. Как видно, при небольших энергиях

львиная доля энергии бомбардирующего протона растрачивается в ионизационных процессах. Тем не менее даже ее оставшаяся часть (всего 5 - 10%) оказывается достаточной для рождения интенсивной лавины нейтронов и значительного положительного баланса $Q/E > 1$. Энергетическая стоимость нейтрона и генерируемого тепла минимальна при $E \simeq 1$ ГэВ, когда издержки на ионизацию становятся почти постоянными, а быстро возрастающие затраты на рождение распадающихся мезонов еще не велики. Именно на энергию 1 ГэВ, как правило, и ориентируются проектируемые электроядерные АЭС. Однако энергетический оптимум очень широк и переход к энергиям в несколько сотен МэВ, где стоимость ускорителей намного меньше, хотя и снижает выход тепла и поток нейтронов, но не очень значительно. Например, из рис. 2 видно, что переход от $E=1$ ГэВ к $E=0,66$ ГэВ уменьшает величину энергетического выигрыша G по сравнению с его максимальным значением при $E=1$ ГэВ.

$$\Delta Q/E = G(E)/G(1\text{ГэВ}) = [Q(E) - E]/E$$

всего только примерно на 5%. Быстрое увеличение стоимости тепла и нейтронов наступает при $E \leq 0,2 - 0,3$ ГэВ.

Таблица III

Ионизационные потери ΔE_{ion} и тепловыделение Q
в электроядерной установке с $K_{eff} \simeq 0.94$
(в расчете на единицу затрачиваемой энергии E)

$E, \text{ГэВ}$	$\Delta E_{ion}/E \%$	Q/E
0.1	95	4.3
0.2	85	11.2
0.3	80	15.5
0.5	69	20.8
0.66	58	21.4
0.8	47	21.4
1.0	41	22.1
1.5	34	20.4
2.0	30	18.7

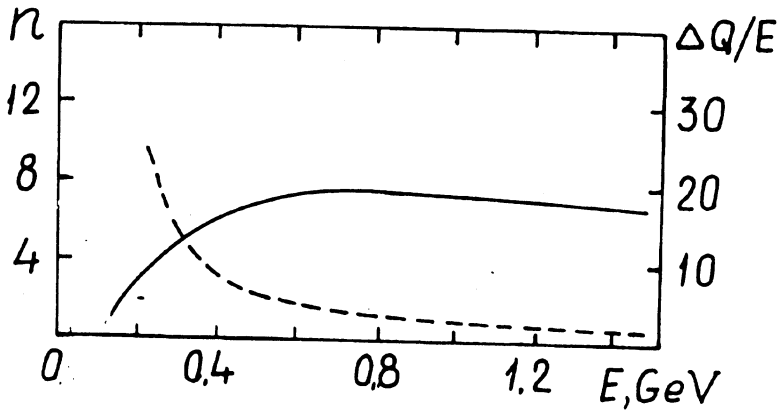


Рис.2. Зависимость относительного выигрыша энергии $\Delta Q/E$ от энергии бомбардирующего протона E .

Пунктирная кривая – соответствующие значения компенсирующего коэффициента $n(E)$, показывающего во сколько раз следует увеличить ток ускорителя, чтобы иметь те же значения $\Delta Q/E$, как и при $E=1$ ГэВ

Приведенная на рис. 2 зависимость относится к одному из проработывавшихся в Дубне вариантов установки с $K_{eff} \simeq 0.94$, однако она типична для всех электроядерных установок с большими значениями K_{eff} , когда основной вклад в тепловыделение и генерацию нейтронов дает низкоэнергетическое деление и влияние ионизационных потерь не так существенно, как в случае малых K_{eff} .

Снижение тепловыделения при переходе к меньшим энергиям можно компенсировать соответствующим увеличением тока ускорителя, что при этих энергиях сделать значительно легче, чем при $E=1$ ГэВ. Другая возможность – использовать одновременно несколько ускорителей, что по стоимости не дороже сильноточного ускорителя с энергией 1 ГэВ, а с технологической точки зрения предпочтительнее, поскольку позволяет АЭС работать в непрерывном режиме без остановок на ремонт и профилактику единственного и весьма сложного ускорителя.

Ионные и электронные пучки

Следует иметь в виду, что кроме протонов в электроядерных системах могут использоваться и другие типы бомбардирующих частиц. Прежде всего это – дейтроны и более тяжелые ядра. Кроме протонов они с самого начала имеют в своем составе не испытывающие ионизационных потерь нейтроны, и, можно думать, это даст дополнительный выигрыш в энергии. Расчеты показывают, что это действительно имеет место для дейтронов (см. Таблицу IV). При $E=1$ ГэВ дейтрон рождает на 10 - 15% больше нейтронов, чем протон, при меньших энергиях преимущества дейтронов становятся еще заметнее. Использование тяжелых ионов невыгодно, поскольку ионизационные потери приблизительно пропорциональны квадрату электрического заряда иона и изначальный избыток нейтронов не может их компенсировать. Правда, ситуация может измениться при очень высоких энергиях, когда вследствие релятивистских эффектов ионизационные потери снижаются и, кроме того, при столкновении сильно разогнанных ядер возможно их полное дробление на отдельные протоны и нейтроны. Но все это требует более детального теоретического, а главное, экспериментального изучения.

Таблица IV

Число нейтронов, рождающихся в большом урановом блоке при облучении его протонами и ионами с энергией $E=1$ ГэВ

частица	P	D	${}^4\text{He}$	${}^{12}\text{C}$
N_n	98	113	99	65

Бытует мнение, что пучки электронов заведомо непригодны для электроядерных установок - ионизационные потери электронов в сотни раз превосходят потери протонов и энергия пучка идет в основном на нагревание мишени. Однако ток электронных ускорителей может быть несравненно большим, чем у протонных, что позволяет достигнуть такого же выхода нейтронов, как и при бомбардировке мишени пучком протонов, а выделившуюся в мишени тепловую энергию можно трансформировать обратно в электрическую. При этих условиях электронные ускорители становятся вполне конкуренто-

способными. Правда, при этом нужно справиться с трудными инженерными проблемами устойчивости мишени и эффективного теплосъема. Для этого предлагается, например, использовать движущуюся со сверхзвуковой скоростью струю расплавленного свинца.

У электроядерных систем с электронными пучками в запасе есть еще один козырь. Протонные установки похожи на уродца с огромной головой-ускорителем, размером с двухэтажный дом, и маленьким телом-реактором метровых размеров. Электронные ускорители более компактны. В общем, тут много за и против и есть над чем подумать...

Уран или торий?

Наряду с ураном ториевые руды тоже являются ресурсом атомной энергетики. Делимость и энерговыделение у тория заметно меньше, чем у урана: число рождающихся нейтронов меньше примерно на 40%, а энергетический избыток (см. Таблицу V) составляет только пятую часть того, что имеется в урановом блоке. Правда, эти данные относятся к естественной смеси изотопов урана, при сравнении с ^{238}U различие меньше: G_{Th}/G_U при энергиях пучка, больших нескольких сотен МэВ, составляет уже около 1/3, а не 1/5. Это не очень много, но при энергиях $E \lesssim 0.2 - 0.3$ ГэВ избыток тепла, тем не менее, становится значительным, а разведанные запасы ториевых руд весьма велики.

Таблица V

Сравнение выхода нейтронов N и выигрыша энергии G в больших блоках урана и тория, облучаемых протонами с энергией E . Индексами "U" и "Th" отмечены величины для урана и тория

$E, \text{ГэВ}$	N_{Th}/N_U	G_{Th}/G_U	G_{Th}
0.1	0.62	0.0	0.0
0.2	0.65	0.14	0.25
0.35	0.64	0.15	0.40
0.66	0.62	0.18	0.85
1.0	0.62	0.19	1.0
1.5	0.62	0.20	1.15
2.0	0.62	0.20	1.24

У тория есть еще одно важное преимущество. В урановом реакторе образуется преимущественно один изотоп плутония – легко делящийся ^{239}Pu , примесь других изотопов, мешающих развитию цепной реакции не велика, поэтому даже "грязный", не очищенный от них плутоний пригоден для атомного оружия. А поскольку плутоний по химическим свойствам отличается от урана, извлечь его из топлива АЭС не такая уж сложная задача. В ториевых реакторах при захвате нейтронов рождается сложная смесь изотопов урана (см. Таблицу VI), в которой наряду с легко делящимися (например, ^{238}U) присутствует большое количество гасящих цепную реакцию изотопов. Для изготовления взрывающихся "изделий" необходима сепарация изотопов, а это – чрезвычайно трудная задача, поскольку химические свойства изотопов одинаковы.

Таблица VI

Изотопы, образующиеся в ториевом реакторе

Изотоп	^{233}U	^{234}U	^{235}U	^{236}U	^{238}U	^{239}Pu
Выход, %	44	360	4	22	0.1	$\sim 10^{-2}$

В электроядерной установке изотопы урана будут выжигаться наравне с исходным ^{232}Th , при этом легкоделящиеся изотопы будут увеличивать выход тепла. Оценки показывают, что накопление 3% изотопа ^{233}U увеличивает выход тепла более, чем в 30 раз. Для стран с большими запасами тория его использование в электроядерных АЭС представляется весьма перспективным.

Реактор в реакторе

Такая идея, если судить по журнальным статьям, была высказана впервые физиками Сарова (Арзамас-16, если использовать его более звонкое и привычное для физиков кодовое название, в течение многих лет бытовавшее в Советском Союзе). Сильноточные ускорители весьма сложны и дороги, поэтому разработка электроядерных установок, в которых можно было бы ограничиться токами всего лишь в несколько мА или еще меньшими, – вдохновляющая задача.

Для этого можно поступить следующим образом: окружить активную зону с ядерным горючим слоем вещества, которое по-разному пропускает нейтроны различных энергий – например, пропускает быстрые и захватывает медленные. Такие ядерные вентили позволят создавать системы, похожие по своему устройству на русские матрешки. В центре располагается реактор, поджигаемый внешним протонным пучком и многократно усиливающий поток рожденных в мишени быстрых нейтронов, которые в свою очередь поджигают следующий, находящийся за вентильным слоем реактор, и так далее. Первичный пучок протонов в этом случае может быть значительно меньшей интенсивности, чем в однореакторных системах.

Выполненное недавно совместно в Дубне и в Ереване математическое моделирование электроядерной системы с внутренним реактором на быстрых нейтронах и внешним на медленных (тепловых) нейтронах подтвердило эффективность такого подхода, хотя тут еще много физических и технологических вопросов.

Что же дальше...

Можно быть уверенным, что замедлившийся после Чернобыльской аварии темп строительства атомных электростанций ускорится уже в ближайшие годы, тем более что заканчивается технологический ресурс у многих работающих ныне АЭС. Это послужит толчком к развитию электроядерных систем и в первую очередь реакторов-трансмутаторов.

Особенности электроядерных устройств, генераторов энергии, достаточно хорошо проработаны путем многочисленных математических экспериментов с различными типами систем, и тут трудно ожидать каких-либо неожиданностей. Хуже обстоит дело с трансмутацией радиоактивных отходов, где много неопределенностей, хотя бы уже потому, что в электроядерных реакторах образуется много изотопов, не встречающихся в природе. Особенности их вероятности взаимодействий с нейтронами известны лишь весьма приблизительно, в частности, в области энергий, меньших нескольких МэВ, где взаимодействия нейтронов с ядрами приобретают резонансный характер, изменяющийся при переходе от одного ядра к другому. Для выбора оптимальных режимов трансмутации потребуется еще большая экспериментальная и теоретическая работа.

Более подробно с проблемами электроядерной технологии можно ознакомиться в указанных ниже работах. Там же можно найти подробную библиографию.

Литература

1. В.Г. Васильков и др. "Электроядерный метод генерации нейтронов". Атомная энергия, 1970, т. 29, с. 121.
2. В.С. Барашенков. "Ядерно-физические аспекты электроядерного метода"/ Физика элементарных частиц и атомного ядра, 1978, т. 8, с. 871.
3. C.D. Bowman et al. "Nuclear energy generation and waste transmutation using an accelerator driven intense thermal neutron source". Nucl. Instr. and Meth. 1992, v. A320. p. 336.
4. F. Carminata et al. "Energy amplifier for clean and inexhaustible nuclear energy production driven by particle beam accelerator". CERBN report CERN/AT/93-47(ET), Geneva, 1993.
5. А.Н. Сисакян и др. "Электроядерная проблема на международном уровне". Международное сотрудничество, 1996, н. 3. с. 13.
6. V.S. Barashenkov et al. "Mathematical experiments with electronuclear systems". Journ. of computational methods in science and engineering, 1002, v. 2, p. 6.
7. S.S. Shabalin et al. "Conception of electron beam driven subcritical molten salt ultimate safety reactor". Proc. of AIP conf. in Las Vegas NV, July 1994, p. 346.
8. В.Ф. Колесов. "Проекты двухсекционных бустеров, содержащих ^{237}Np ". Атомная энергия, 1998, т. 84, с. 344.
9. С.А. Бзнуни и др. "Характеристики двухреакторных электроядерных систем". Атомная энергия, 2002, т. 92, с. 344.

Получено 23 июля 2003 г.

Барашенков В. С.
«Электрояд» — истоки и будущее
(ресурсы атомной энергетики)

P2-2003-144

Рассказывается об электроядерных исследованиях в Дубне и в Обнинске. Обсуждается современное состояние и перспективы электроядерной технологии. Особый интерес представляет изучение возможностей использования электронных пучков и секционированных электроядерных систем.

Работа выполнена в Лаборатории информационных технологий ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна, 2003

Перевод автора

Barashenkov V. S.
Electronuclear Technology — History and Future

P2-2003-144

History of electronuclear investigations in Dubna and Obninsk is considered. The present status and perspectives of electronuclear technology are discussed, in particular, using of electron beams and sectional ADS.

The investigation has been performed at the Laboratory of Information Technologies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna, 2003

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

Подписано в печать 27.08.2003.

Формат 60 × 90/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 0,93. Уч.-изд. л. 0,94. Тираж 425 экз. Заказ № 54062.

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/