

ным точкам, тогда как кривые, вычисленные со стандартными нерелятивистскими волновыми функциями, находятся в резком противоречии с данными.

Анализ накопленных экспериментальных данных об инвариантном дифференциальном сечении и тензорной анализирующей способности процесса фрагментации релятивистских дейтронов на ядрах свидетельствует о том, что в подходе динамики светового фронта нуклоны в дейтроне остаются эффективными степенями свободы и, по-видимому, сохраняют свою индивидуальность вплоть до импульсов внутреннего движения 1 ГэВ/с.

Полученные результаты могут иметь далеко идущие последствия как для понимания структуры дейтрона на малых расстояниях, так и для интерпретации механизмов реакции фрагментации релятивистских дейтронов. Действительно, довольно неожиданным оказывается, что вплоть до малых расстояний между нуклонами, соответствующих внутренним импульсам 0,5–0,8 ГэВ/с, в световой форме квантовой механики дейтрон можно рассматривать как двухнуклонную систему. Такое же заключение было сделано ранее и в работе, посвященной исследованию фрагментации дейтронов с импульсом 9 ГэВ/с в протоны с поперечными импульсами 0,5–1 ГэВ/с, где указывалось, что нуклоны в дейтроне, по-видимому, сохраняют свою индивидуальность вплоть до относительных импульсов 1 ГэВ/с.

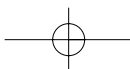
Второй важный вывод, вытекающий из этих исследований, состоит в том, что в реакции фрагментации релятивистских дейтронов очень быстро становятся существенными релятивистские эффекты, которые наиболее просто можно учесть при рассмотрении механизма процесса в квантовой механике светового фронта, не вводя каких-либо дополнительных степеней свободы.

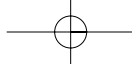
8. Электроядерный способ производства энергии – «электрояд»

Другая физическая тематика, которой активно занимались физики и математики ЛВТА, – это проблема, известная под названием «Электроядерный способ производства энергии» (электрояд). Работы в этом направлении ведутся в нескольких лабораториях ОИЯИ. Работы ЛВТА, в основном, связаны с математическим моделированием соответствующих физических процессов. В данном пункте В.С.Барашенковым излагается современный взгляд на это научно-техническое направление.

Плюсы и минусы

Урановые и ториевые руды – важнейшие ресурсы нашей планеты. В 2003 году свыше 17% мирового производства электроэнергии приходилось 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 неопределяющую роль, атомные электростанции играют в США и России.





Как и любое крупное производство, АЭС приносят в нашу жизнь новые специфические угрозы; и имеются противники, настаивающие на их замене 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. Вследствие чего уже к началу следующего десятилетия содержание углекислого газа в земной атмосфере возрастет по сравнению с 1990 годом на 50–60%. Если не принять ограничивающих мер, оно далее будет возрастать с неменьшим 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 использование накапливающихся в реакторах легкоделящихся изотопов?

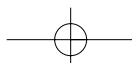
Энергия в реакторах АЭС выделяется в реакциях деления, что сопровождается рождением большого числа нейтронов, часть которых вызывает последующее деление урановых ядер, некоторые гибнут в конструктивных материалах, а остальные поглощаются ядрами урана, превращая их в ядра плутония — легко делящуюся «ядерную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

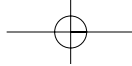
Во-первых, легко делится лишь один из изотопов, который в добываемом из руд уране составляет всего лишь 0,7%. Остальная часть урана идет в отвал. Ее можно утилизировать только в так называемых быстрых реакторах, использующих высокоэнергетическую часть спектра деления. Однако и в этом случае нельзя обойтись без значительной примеси дефицитного легко делящегося уранового изотопа или плутония (в стандартном топливе быстрых реакторов MOX 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 поколениях $n-1$ и n :

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

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 со-





храняется 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

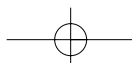
Известно, что идею электроядерных устройств полвека назад первыми предложили Лоуренс в США и академик Семенов в России. Это было время пика холодной войны, и многие разделы ядерной физики, тем более имевшие отношение к ее военным применениям, оставались глубоко засекреченными. Даже само слово «реактор» заменялось кодовым термином «кристаллизатор», а нейтроны назывались метеоритами или нулевыми точками. Неудивительно, 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 Физико-энергетический институт. 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.

В таблице 2 показано, сколько нейтронов и заряженных частиц рождает при столкновении с ядром урана протон с энергией E , видно, что в области $E \approx 1$ ГэВ 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 за-

Таблица 2. 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	18	21	24	27
N_{tot}	15	18	23	26	33	39



медляющих нейтронов, которые в конце концов будут поглощаться ядрами урана ^{238}U , трансмутируя их в ядра плутония.

Оценки предсказывали, что каждый первичный протон с энергией 0,5–1,0 ГэВ должен родить 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 сотню 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 в России, ни за рубежом нет экспериментов с такими 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, приведенные в таблице 3, 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 этом производимая энергия не только достаточна для возмещения затрат на ускорение протонов (с учетом потерь, сопровождающих конверсию тепловой энергии в электрическую), но остается и значительный избыток ее. 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 действи-

Таблица 3. Выход ядер ^{230}Pu и энергетический выигрыш в очень большом блоке естественного урана (в расчете на один бомбардирующий протон с энергией E)

E , ГэВ	N_{Pu}	G	G_{tot}
0,1	1,3	0,7	3,46
0,5	18	2,7	13
0,65	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

тельности энергетический выигрыш еще больше, если учесть тепло Q^* , выделяющееся при сжигании наработанного плутония в самой электроядерной установке или в реакторах других АЭС:

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

Примесь легкоделящихся изотопов урана и плутония (например, при использовании стандартного топлива быстрых реакторов МОХ при $K_{\text{eff}} = 0,97-0,98$) во много раз увеличивает выход плутония и энергетический выигрыш.

В начале 70-х годов П.Л. Кирилловым был организован в Обнинске «электроядерный семинар», куда съезжались физики из многих институтов. Результатом работ семинара явилась справка в Правительство 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 большего количества плутония. Был разгар холодной войны.

Новая стратегия

Существенный перелом в отношении к электроядерным системам связан с именем Карло Руббиа, предложившего схему «один ускоритель – 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, что всякому овощу свое время!) По оценке К.Руббиа 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. Это может компенсировать 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. 8 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 диаметром 8 см. Образовавшиеся в свинце каскадные частицы размножаются в окружающем слое из 354 кг топлива MOX.

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 еще и другие конструктивные детали, на которых мы не будем останавливаться.

Установка будет работать с $K_{eff} \sim 0,94$, что далеко от «красной черты», гарантирует полную безопасность и, в то же время, позволяет получить несколько десятков кВт тепловой энергии. Это сравнительно немного, благодаря чему выделяющееся тепло можно удалять продувкой воздуха или гелия, и вместе с тем этого вполне достаточно для большинства опытов. В экспериментах будут получены новые данные, необходимые для проектирования полномасштабных промышленных электроядерных АЭС. Проект поддержан Международным научно-техническим центром, выделившим для этого 1,2 миллиона долларов США.

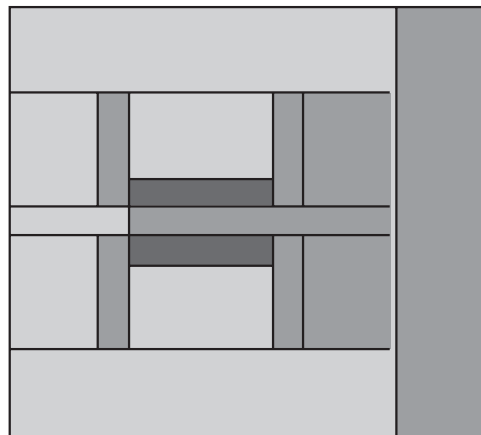


Рис. 8. Один из вариантов конструкции создаваемой в Дубне электроядерной установки

Какой должна быть электроядерная АЭС?

Данные таблицы 4 показывают влияние ионизационных потерь на выход нейтронов и тепловыделение. Как видно, при небольших энергиях львиная доля энергии бомбардирующего протона тратится на ионизационные процессы. Тем не менее даже оставшаяся ее 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 $E \sim 1$ ГэВ, когда издержки на ионизацию становятся почти постоянными, а быстро возрастающие затраты на рождение распадающихся мезонов еще невелики. 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, на рис. 9 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:

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

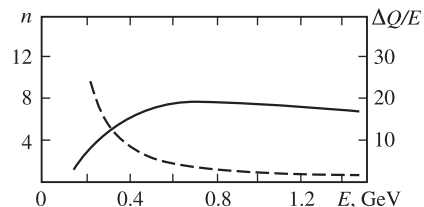
всего только примерно на 5%. Быстрое увеличение стоимости тепла и нейтронов наступает при $E < 0,2-0,3$ ГэВ.

Приведенная на рис. 9 зависимость относится к одному из проработывавшихся в Дубне вариантов установки с $K_{eff} \sim 0,94$, однако она типична для всех электроядерных

Таблица 4. Ионизационные потери ΔE_n и тепловыделение Q в электроядерной установке с $K_{eff} \sim 0,94$ (в расчете на единицу затрачиваемой энергии E)

$E, \text{ ГэВ}$	$\Delta E_n/E$	Q/E
0,1	95	1,3
0,2	85	11,2
0,3	80	15,5
0,5	69	20,8
0,6	58	21,4
0,8	47	21,4
1,0	41	22,1
1,5	34	21,4
2,0	30	18,7

Рис. 9. 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



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 (таблица 5). 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.

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 конкурентоспособными. 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.

Таблица 5. Число нейтронов, рождающихся в большом урановом блоке при облучении его протонами и ионами с энергией $E = 1$ ГэВ

Частица	P	D	^4He	^{12}C
N	99	1134	98	65

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 (таблица 6) 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: $G_{\text{Th}}/G_{\text{U}}$ при энергиях пучка, больших нескольких сотен МэВ, составляет уже около $1/3$, а не $1/5$. Это не очень много, но при энергиях $E > 0,2-0,3$ ГэВ избыток тепла, тем не менее, становится значительным, а разведанные запасы ториевых руд весьма велики.

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, невелика, поэтому даже «грязный», неочищенный 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 (таблица 7), в которой, наряду с легко делящимися изотопами (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.

В электроядерной установке изотопы урана будут выжигаться наравне с исходным ^{232}Th , при этом легко делящиеся изотопы будут увеличивать выход тепла. Оценки показывают, что накопление 3% изотопа ^{233}U увеличивает выход тепла более чем в 30

Таблица 6. 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)

$E, \text{ГэВ}$	$N_{\text{Th}}/N_{\text{U}}$	$G_{\text{Th}}/G_{\text{U}}$	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

Таблица 7. 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	$\sim 10^{-2}$

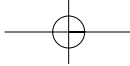
раз. Для стран с большими запасами тория его использование в электроядерных АЭС представляется весьма перспективным.

Реактор в реакторе

Такая идея, если судить по журнальным статьям, была высказана впервые физиками Сарова (Арзамаса-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, под-



Участники конференции «Современные проблемы вычислительной физики» (1998 г.)



жигаемый 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 в многочисленных математических экспериментах 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 весьма приближенно, 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 работах^{1,2}, там же можно найти подробную библиографию.

¹ Барашенков В.С. Ядерно-физические аспекты электроядерного метода // Физика элементарных частиц и атомного ядра. 1978. Т. 8. С. 871.

² Сисакян А.Н. и др. Электроядерная проблема на международном уровне // Международное сотрудничество. 1996. №. 3. С. 13.

