

СООБЩЕНИЯ
ОБЪЕДИНЕННОГО
ИНСТИТУТА
ЯДЕРНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ

Дубна

98-74

P2-98-74

В.С.Барашенков, Г.Н.Погодаев, А.Полянский,
Ю.П.Попов, И.В.Пузынин, А.Н.Сисакян, А.Н.Соснин

ФИЗИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ
ЭЛЕКТРОЯДЕРНОЙ УСТАНОВКИ
НА ОСНОВЕ ПОДКРИТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ
РЕАКТОРА ИБР-30
И 660 МэВ ПРОТОННОГО ФАЗОТРОНА

1998

Введение

Идея получать энергию в реакциях деления урана и тория под действием потока быстрых нейтронов, рождающихся и размножающихся в мишени, облучаемой пучком ускоренных частиц, протонов или дейтронов, возникла почти одновременно с запуском первых промышленных реакторов деления на тепловых нейтронах. Эта идея интенсивно прорабатывалась, экспериментально и теоретически, как в США, так и в Советском Союзе. Важные результаты были получены также канадскими физиками. Рассматривались как слабо обогащенные изотопом ^{235}U электроядерные системы, с небольшими значениями коэффициента мультипликации K_{eff} , так и подкритические реакторы с $K_{eff} \simeq 1$ (см. обзоры [1] – [2] и материалы недавних конференций [4] – [6], где можно найти подробную библиографию).

В нашем институте такие исследования были инициированы и поддерживались Д. И. Блохинцевым, В. П. Дзелеповым, М. Г. Мещеряковым и в 50 — 70-х годах интенсивно велись в Лабораториях ядерных проблем и теоретической физики. Позднее в развитие этого направления большой вклад внес **К. Д. Толстов** и его сотрудники в Лаборатории высоких энергий, поддержанные А. М. Балдиным [7, 8]. Были выполнены экспериментальные измерения выхода нейтронов в различных мишенях при энергии 660 МэВ и в области $E \simeq 3 - 6$ ГэВ, созданы математические программы, позволяющие моделировать различные аспекты электроядерного процесса и особенности сложных электроядерных установок.

Однако, несмотря на ряд очевидных преимуществ (безопасность эксплуатации, возможность переработки тория и запасов "отвального" ^{238}U , весьма короткое по сравнению с реакторами на быстрых нейтронах время удвоения легко делящихся изотопов и т. д.), практического воплощения электроядерные системы не получили. Этому препятствовали, в первую очередь, очень высокие требования к ускорителю: поскольку такие системы предназначались в основном для наработки легко делящихся изотопов ^{233}U и ^{239}Pu , которые предполагалось далее использовать в дочерних реакторах на тепловых нейтронах, производство достаточно больших количеств этих изотопов требовало протонных пучков с интенсивностями 100 — 300 мА.

К. Руббиня был, по-видимому, первым, кто предложил, отбросив гипнотизировавшее желание использовать электроядерные установки в качестве бридеров, ограничиться самодостаточными системами "один

ускоритель — один реактор". Для этого пригодны ускорители, имеющие на порядок меньшие токи (см. доклады [9, 10] и приведенную там библиографию).

Еще меньшими токами и энергиями всего лишь в несколько сотен МэВ можно ограничиться в подкритических системах с коэффициентом мультипликации $K_{eff} \approx 0,95 - 0,97$. Хотя при этом значительная часть энергии первичного пучка теряется в ионизационных процессах, энергия деления во много раз превосходит потери, благодаря чему коэффициент амплификации

$$K_{amp} = \text{полный выход тепла/затраченная энергия}$$

остаётся достаточно большим. Это видно из таблицы I, где показаны результаты расчетов для цилиндрической плутониевой активной зоны (средняя плотность плутония 8 г/см^3) с вольфрамовой мишенью в центре (см. рис. 1) [11]. Аналогичные результаты получаются и для других подкритических систем.

Подкритические системы с $K_{eff} \approx 0,95 - 0,97$ надежно управляются варьированием тока ускорителя, совершенно безопасны и не требуют специальных дорогостоящих устройств обеспечения безопасности, которые по принятым стандартам являются обязательными для всех установок с $K_{eff} \geq 0,98$.

В качестве первого шага в изучении плутониевых электроядерных систем мы предлагаем объединить активную зону работающего в подкритическом режиме плутониевого реактора ИБР-30 Лаборатории нейтронной физики ОИЯИ (его предполагается демонтировать в связи с созданием более совершенной установки ИРЕН) с 660 МэВ протонным фазотроном Лаборатории ядерных проблем ОИЯИ, имеющим ток выведенного пучка $J=3,2 \text{ мкА}$ (интенсивность пучка $N_p = 2,1 \cdot 10^{13}$ частиц/с).¹

Как показывают оценки, выполненные в ЛНФ и ЛВТА ОИЯИ, использование всего лишь 10% выведенного пучка позволяет создать электроядерную систему с $K_{eff} \approx 0,94$ и мощностью около 10 кВт. Такая

¹Протонный фазотрон ЛЯП ОИЯИ характеризуется следующими параметрами: энергия ускоренных протонов $E = (659 \pm 6,0) \text{ МэВ}$; энергетическая дисперсия $\Delta E = (3,1 \pm 0,8) \text{ МэВ}$; максимальная интенсивность выведенного пучка в режиме быстрого вывода (продолжительность вывода 30 с) $J = 3,2 \text{ мкА}$; выведенный пучок имеет микроструктуру — сгустки частиц длительностью около 10 нс с интервалом примерно 70 нс.

мощность может быть снята воздушным охлаждением — таким же, какое используется в настоящее время на реакторе ИБР-30. В то же время указанная мощность вполне достаточна для проведения большинства исследований, необходимых для конструирования более мощных электроядерных установок. Большие потоки нейтронов позволят изучить различные режимы трансмутации радиоактивных отходов, являющейся в настоящее время одной из главных проблем ядерной энергетики.

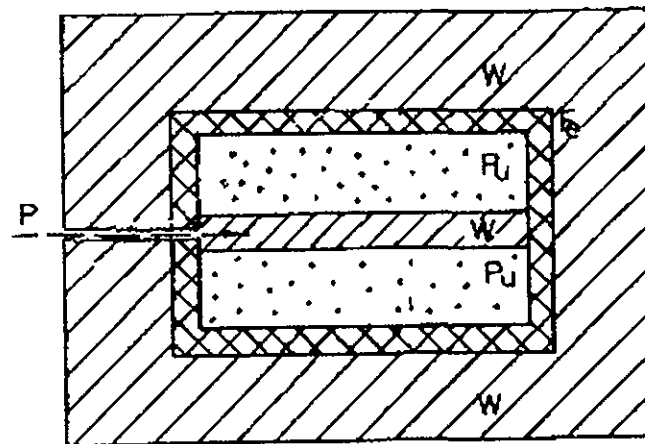


Рис. 1. Цилиндрическая плутониевая сборка с вольфрамовой мишенью диаметром 3 см и длиной 14 см, плутониевым бланкетом диаметром 7,2 см, стальным и вольфрамовым рефлексорами с толщинами, соответственно, 2,4 и 10 см. Плутониевые стержни имеют танталовую и стальную оболочки толщиной 0,1 и 0,3 мм. Пучок ускоренных протонов вводится в вольфрамовую мишень через осевую щель на глубину 1 см

Это будет первая в мире электроядерная установка значительной мощности. В последующем, при условии перехода к более интенсивному теплосъему, ее мощность может быть увеличена на порядок. С окончанием работ на пучке 660 МэВ фазотрона можно рассмотреть возможность перебазирования установки на пучок протонов и легких ионов 9 ГэВ синхрофазотрона ЛВЭ ОИЯИ.

Мы хотели бы особо подчеркнуть, что наряду с использованием электроядерных установок для производства энергии на основе урана

и тория сегодня очень важное значение имеет проблема экологически безопасной и экономически выгодной утилизации запасов чистого (оружейного) плутония и загрязненного другими нуклидами "технического" плутония с атомных электростанций. Последнее особенно важно, поскольку технический плутоний, как известно, может быть использован для изготовления атомного оружия, что создает серьезную угрозу его неконтролируемого распространения. Электроядерная технология представляется весьма перспективной для решения этой задачи.

Таблица I
Зависимость параметров электроядерной системы от энергии бомбардирующих протонов (значения E и Q в ГэВ)

E , ГэВ	K_{eff}	N_{tot}/E	Q_{ion}/E	Q_{tot}/E
0.1	0.939	64	0.95	4.3
0.2	0.941	210	0.85	11.2
0.3	0.943	276	0.80	15.5
0.5	0.944	378	0.69	20.8
0.65	0.943	393	0.58	21.4
0.8	0.946	396	0.47	21.4
1.0	0.946	409	0.41	22.1
1.5	0.945	379	0.34	20.4
2.0	0.942	347	0.30	18.7

Одной из привлекательных сторон рассматриваемого проекта является его относительная дешевизна и возможность быстрой реализации, поскольку уже имеется практически все необходимое оборудование для создания предлагаемой установки. Более того, "вторую жизнь" приобретают работающие в течение долгого времени реактор и ускоритель.

Следует также иметь в виду, что ОИЯИ — международная организация, поэтому участие в исследованиях доступно широкому кругу специалистов. К предлагаемому проекту проявляют интерес большое число институтов как стран-участниц ОИЯИ, так и других стран.

Физическое обоснование и основные характеристики установки

Принципиальная возможность получения энергии в электроядерных установках была доказана выполненными в ОИЯИ экспериментами с большими урановыми блоками [1] и подтверждена большим числом теоретических расчетов (см., в частности, [3],[11] — [13]).

На рис. 2 показана конструкция активной зоны ИБР-30. Имея в виду максимальное снижение стоимости проекта и сокращение сроков

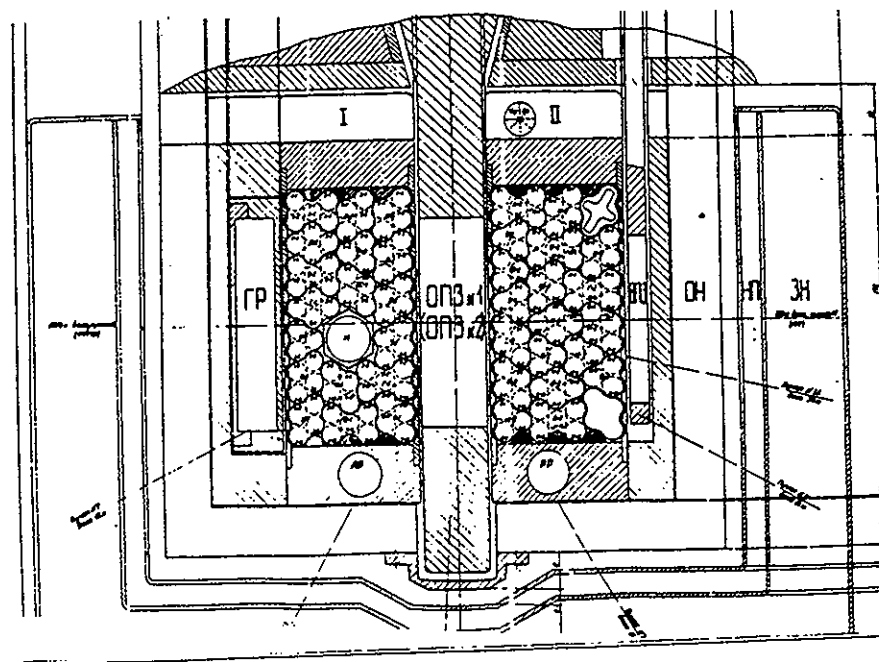


Рис. 2. Горизонтальный (перпендикулярно направлению вертикально подвешенных плутониевых стержней) разрез активной зоны реактора ИБР-30. В центре, между двумя плутониевыми сборками, помещена стальная пластина с уран-молибденовой вставкой в танталовой кассете. Внешняя оболочка-рефлектор из железа имеет толщину 7 см в верхней части, где крепятся подвешенные плутониевые ТВЭЛы и 10 см со всех других сторон. Пучок протонов с гауссовой полушириной 1,5 см направляется через щель глубиной 2 см в центр пластины с уран-молибденовой вставкой перпендикулярно длине плутониевых стержней (т. е. слева направо в плоскости рисунка)

его реализации, мы предполагаем вносить как можно меньше изменений в существующую конструкцию активной зоны реактора. В частности, мы отказались от первоначально планировавшейся перестройки активной зоны в цилиндрическую с центральной вольфрамовой мишенью [12], что позволило бы увеличить K_{eff} . Вместо этого для увеличения данного коэффициента между правой и левой частями зоны вставлена имеющаяся в нашем распоряжении стальная пластина с запрессованным в ее средней части уран-молибденовым вкладышем ($^{235}\text{U} : ^{238}\text{U} : ^{96}\text{Mo} = 81 : 9 : 10\%$). Эта деталь подробно описана в приложении I.

В таблицах II и III приводятся результаты математического моделирования выхода нейтронов и тепловыделения в активной зоне ИБР-30, изображенной на рис.2, при облучении вставки с уран-молибденовым вкладышем пучком 660 МэВ протонов перпендикулярно оси плутониевых стержней. Глубина щели для ввода пучка - 2 см. Пространственная дисперсия пучка характеризуется гауссовской формой с полушириной 1 см.

Обращает на себя внимание относительно малое тепловыделение за счет ионизационных потерь и реакций расщепления по сравнению с вкладом низкоэнергетического деления. Это характерно не только для интегральных значений Q , но и для пространственного распределения тепловыделения, что видно на примере данных для цилиндрической

Таблица II

Интегральные характеристики для активной зоны ИБР-30, облучаемой пучком 660 МэВ протонов

Все данные приведены в расчете на один бомбардирующий протон.

Коэффициент мультипликации	$K_{eff} = 0,940 \pm 0,0015$
Число нейтронов:	
захваченных	$N_{cap} = 14,2$
вылетевших	$N_{out} = 309$
Число делений:	
низкоэнергетических	$N_{lfs} = 147$
высокоэнергетических	$N_{hfs} = 0,7$
Теплоделение:	
в ионизационных процессах	$Q_{ion} = 286 \text{ МэВ}$
при низкоэнергетическом делении	$Q_{lfs} = 25200 \text{ МэВ}$
при высокоэнергетическом делении	$Q_{hfs} = 130 \text{ МэВ}$

системы, приведенных в приложении II. Это обстоятельство как раз и позволяет использовать горизонтальный пучок протонов и вставку с ($U - Mo$)-вкладышем непосредственно в качестве мишени². Следует отметить, что система останется безопасной и в гипотетическом случае, когда протонный пучок смешается на плутониевые стержни. Это видно из расчетных таблиц пространственного распределения выделяющегося тепла при облучении отдельного плутониевого стержня, когда радиационная нагрузка является наибольшей по сравнению со случаем облучения активной зоны, где плутониевые стержни частично

Таблица III

Распределение полного тепловыделения в отдельных частях установки, изображенной на рис. 2

Все данные приведены в расчете на один бомбардирующий протон.

По всем частям суммарно	25500 МэВ
В плутониевой зоне:	
в левой части	11700 МэВ
в правой части	11500 МэВ
В ($U - Mo$)-вкладыше	2220 МэВ
В оболочке вкладыша	35,1 МэВ
В рефлекторе:	
фронтальная часть	45,3 МэВ
верхняя часть	4,55 МэВ
нижняя часть	4,90 МэВ
задняя часть	7,51 МэВ
левая часть	2,47 МэВ
правая часть	2,23 МэВ

экранируют друг друга (см. приложение III)³.

²В настоящее время на ИБР-30, использующем подсветку электронным пучком, применяется вольфрамовая мишень диаметром 3 см, поскольку ионизационные потери электронов намного больше, чем у протонов. Мы благодарны Л. М. Онищенко, привлечшему наше внимание к возможности использовать горизонтальный пучок протонов

³Безопасность могла бы нарушиться лишь при непосредственном облучении плутониевого стержня очень узким, интенсивным пучком, когда благодаря локальному перегреву могла бы нарушиться герметичность защитной оболочки стержня. В рассматриваемой системе такой случай заведомо исключен.

Рис. 3 иллюстрирует зависимость выхода нейтронов и тепловыделения от коэффициента мультипликации [11]. Хотя приведенные на этом рисунке данные, как и таблица I, относятся к цилиндрической активной зоне (см. рис.1), характер зависимостей для зоны, изображенной на рис. 2, остается таким же. Расчеты показывают, что все приведенные данные являются достаточно устойчивыми: K_{eff} , выход нейтронов и величина тепловыделения плавно изменяются в зависимости от вариаций энергии и интенсивности пучка протонов. Это свидетельствует

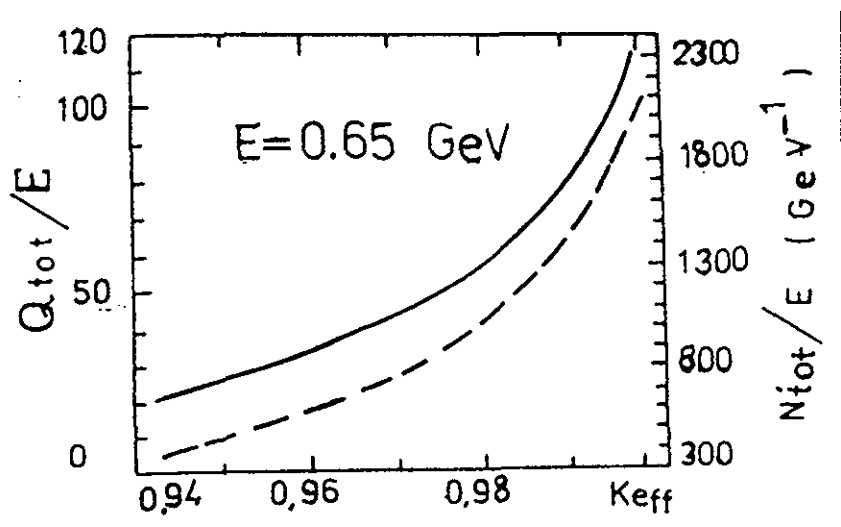


Рис.3. Зависимость тепловыделения (сплошная кривая) и выхода нейтронов (пунктир) от коэффициента мультипликации при $E = 0,66$ ГэВ

о надежности и эксплуатационной устойчивости проектируемой гибридной системы.

Расчеты тепловых нагрузок различных элементов системы (см. также приложение I) показывают, что они не превосходят допустимых критических значений и в случае необходимости могут быть быстро снижены путем уменьшения тока ускорителя. В этом отношении проектируемая установка также вполне безопасна.

Условия здания, в котором размещен 660 МэВ фазотрон, позволяют обеспечить условия радиационной безопасности. Поскольку K_{eff} не будет превышать значения, равного 0,95, проектируемая электроядер-

ная установка представляет собой безопасную подкритическую сборку и удовлетворяет требованиям инструкции по безопасности [14] (не требуются СУЗ и каналы аварийной защиты). Предполагается использовать действующую на ИБР-30 систему воздушного охлаждения.

Путем математического моделирования нами прорабатывался также вариант системы с поворотом протонного пучка и направлением его на вольфрамовую мишень, находящуюся в центре активной зоны параллельно направлению цилиндрически расположенных плутониевых стержней. Такая конфигурация позволяет исследовать более широкий набор подкритическихборок, однако более дешевый вариант с горизонтальным пучком в настоящее время представляется более предпочтительным.

Программа экспериментов

Следует иметь в виду, что эта программа имеет предварительный характер, поскольку еще не все потенциальные участники проекта полностью сформулировали свои предложения.

После демонтажа активной зоны ИБР-30 и ее сборки в здании фазотрона на первом этапе работ, продолжительностью в 8 — 12 месяцев, основной задачей будет демонстрация возможности создания безопасной и устойчивой в эксплуатации электроядерной установки и проверка надежности теоретических методов расчета таких систем. Путем теоретического пересчета измерений потока нейтронов и температуры в отдельных точках внутри и во многих точках вне установки будут получены оценки коэффициента размножения и полного выхода нейтронов, величины их утечки из сборки, величины тепловыделения в системе. Будет исследовано влияние различных отражателей, а также флуктуации коэффициента K_{eff} .

Для измерений потока нейтронов будет использована методика, разработанная и опробованная в ЛВЭ ОИЯИ. Предполагается, что тепловые измерения будут выполнены с участием ФЭИ (Обнинск).

Измерения потребуют нескольких сотен часов работы фазотрона ЛЯП ОИЯИ. Теоретические расчеты будут обеспечены ЛВТА ОИЯИ с участием ИЯИ в Сверке, Горно-инженерной академии в Кракове и ПО "Сосны" в Минске.

На втором этапе работ, продолжительностью 1 — 2 года, основной задачей станет исследование различных режимов выгорания плутония

и скоростей прохождения цепочек трансмутации радиоактивных ядер, полноты выжигания осколочных и активидных изотопов. Будут исследованы пространственно-энергетические распределения нейтронов в сборке, их зависимость от конструкции, материала отражателя, наличия замедлителей и величины K_{eff} . Будут измерены интегральные нейтронные сечения деления и радиационного захвата для долгоживущих осколочных и активидных изотопов в спектре нейтронов сборки. Предполагается исследовать эффективность адиабатического резонансного перекрестного метода (так называемый ARC-метод) для трансмутации некоторых радиоактивных отходов с помощью специального свинцового куба, размещенного вблизи активной зоны установки (см. приложение IV). Особый интерес представляют исследования возможности увеличить нейтронные потоки путем применения секционированныхборок, что открывает пути к использованию ускорителей со сравнительно небольшими токами [15]. Результаты измерений будут сопоставляться с результатами математического моделирования соответствующих процессов с целью повышения точности расчетных методов.

Измерения нейтронных потоков будут выполнены на основе методики, разработанной в ЛВЭ ОИЯИ, теплофизические измерения предполагается выполнить с участием ФЭИ (Обнинск). Измерения нейтронных сечений будут обеспечены ЛНФ ОИЯИ с участием ВНИИЭФ (Саров). Работы с секционированными сборками будут выполняться сотрудниками ВНИИЭФ с участием ЛНФ ОИЯИ. Теоретические расчеты будут обеспечены ЛВТА ОИЯИ с участием организаций, указанных в предыдущем пункте. Для работ второго этапа потребуется несколько сотен часов работы фазотрона.

На завершающем этапе, продолжительностью около года, предполагается рассмотреть возможность перемещения установки на пучок ускорителя ЛВЭ ОИЯИ с энергией пучка 9 ГэВ с тем, чтобы выполнить оценочные измерения выхода нейтронов, тепловыделения и скоростей трансмутации в пучках легких ионов и высокоэнергетических протонов. Эти измерения будут выполнены ЛВЭ ОИЯИ, теоретические расчеты обеспечит ЛВТА ОИЯИ. Предполагается, что для измерений потребуется около 100 часов работы ускорителя.

Мы благодарим Ю. С. Замятнина и Л. М. Онищенко за обсуждения, советы и стимулирующую критику.

Приложение I

Тепловой расчет

вставки с (U – Mo)– вкладышем (из ОПЗ ИБР-30)

Геометрия вставки показана на рис. 4. Она имеет квадратное сечение и состоит из нержавеющей стали с впрессованным вкладышем.

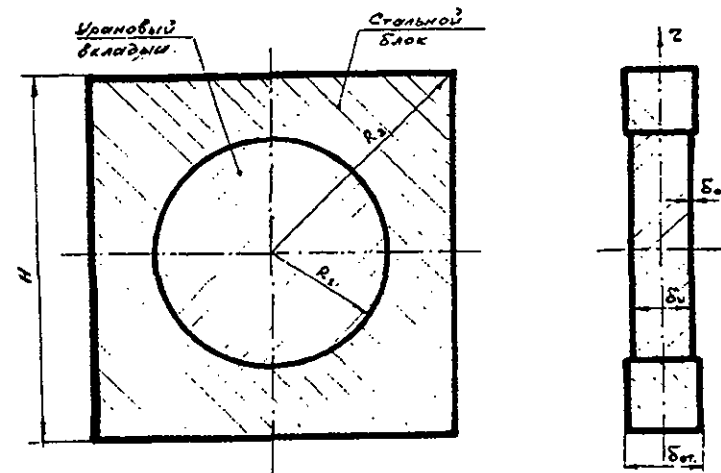


Рис. 4. Размер вставки $H = 170$ мм, ее толщина $\delta_{ст} = 31$ мм. Толщина (U – Mo)– вкладыша $\delta_U = 25$ мм. Толщина его оболочки $\delta_{об} = 2,5$ мм. Радиус вкладыша по урану $R_1 = 53$ мм ($R_2 = 120$ мм)

Вкладыш помещен в герметическую толстостенную ($\delta_{об.}$) сварную оболочку из жаропрочной нержавеющей стали ЭП-172 с технологическим воздушным зазором ($\delta_{в.} = 0 - 0,15$ мм) и посажен в гнездо стальной пластины с толщиной $\delta_{ст.}$. Для пропуска теплоносителя, охлаждающего вкладыш, имеется зазор между сталью вставки и мембранами кассет ($\delta = 1,5$ мм) с каждой стороны. Центр вкладыша совмещен с геометрическим центром активной зоны.

Далее будут использоваться следующие величины:

W (Вт)	— тепловая мощность активной зоны;
\bar{W} (Вт)	— тепловая мощность вкладыша;
q_V (Вт/м ³)	— плотность теплового потока;
G (м ³ /ч)	— расход теплоносителя (воздуха);
$F_{\text{ТН}}$ (м ²)	— проходное сечение теплоносителя;
V (м/с)	— скорость теплоносителя;
$T_{\text{вх}}$ (К)	— температура теплоносителя на входе;
$T_{\text{вых}}$ (К)	— температура теплоносителя на выходе;
\bar{T} (К)	— средняя температура теплоносителя;
ν (м ² /с)	— коэффициент кинематической вязкости;
R_e	— критерий Рейнольдса;
N_U	— критерий Нуссельта;
α (Вт/м ² К)	— коэффициент теплоотдачи;
λ (Вт/мК)	— коэффициент теплопроводности;
C_p (Дж/кгК)	— удельная теплоемкость воздуха;
ρ (кг/м ³)	— плотность воздуха;
d_r (м)	— гидравлический (эквивалентный) диаметр;
T_1 (К)	— температура вкладыша;
T_2 (К)	— температура стального блока;
$W = 10000$ Вт;	
$\bar{W} = 1200$ Вт	— 12% от мощности акт. зоны;
$\bar{W} = 1800$ Вт	— мощность зоны + мощность пучка;
$G = 100$ м ³ /ч.	

При вычислениях мы будем предполагать, что

- расчет температурного поля стальной пластины и вкладыша может быть выполнен в симметричном одномерном приближении с граничными условиями теплопередачи 3-го рода;
- хорошая теплопроводность и небольшая толщина стальной пластины и вкладыша позволяют пренебречь осевым перепадом температур;
- тепловыделение в уране происходит равномерно по всей границе вкладыша;
- имеет место хороший тепловой контакт между оболочкой вкладыша и сталью пластины;

- технологический воздушный зазор между ураном и оболочкой вкладыша в предельном случае может быть скомпенсирован термическим расширением урана.

При этих упрощениях коэффициент теплоотдачи определяется следующими соотношениями:

$$F_{\text{ТН}} = 2 \cdot \delta \cdot H = 2 \cdot 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot 0,17 = 5,1 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2;$$

$$V = \frac{G}{3600 \cdot F_{\text{ТН}}} = \frac{100}{3600 \cdot 5,1 \cdot 10^{-4}} = 54,6 \text{ м/с};$$

$$\bar{V} = 1/2 \cdot V = 27,3 \text{ м/с};$$

$$\Delta T_{\text{ТН}} = \frac{3600 \cdot 1200}{100 \cdot 1000 \cdot 1,2} = \frac{3600 \cdot \bar{W}}{G \cdot C_p \cdot \rho} = 36^\circ\text{C};$$

$$T_{\text{вых}} = T_{\text{вх}} + \Delta T_{\text{ТН}} = 20 + 36 = 56^\circ\text{C};$$

$$\bar{T} = \frac{1}{2} \cdot (T_{\text{вх}} + T_{\text{вых}}) = \frac{1}{2} \cdot (20 + 56) = 38^\circ\text{C}.$$

В качестве определяющей примем температуру $\bar{T} = 40^\circ\text{C}$. Тогда $\nu = 17 \cdot 10^{-6}$ м²/с, $\lambda = 27 \cdot 10^{-3}$ Вт/м К.

$$R_e = \frac{\bar{V} d_r}{\nu} = \frac{27,3 \times 2 \times 1,5 \cdot 10^{-3}}{17 \cdot 10^{-6}} \approx 4800,$$

где $d_r = 2\delta$.

$$N_U = 0,018 R_e^{0,8} = 0,018 (4800)^{0,8} = 16;$$

$$\bar{\alpha} = \frac{N_U \lambda}{d_r} = \frac{16 \times 27 \cdot 10^{-3}}{3 \cdot 10^{-3}} = 144 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К};$$

$$\alpha = \frac{1}{\frac{1}{\bar{\alpha}} + \frac{\delta_{\text{об}}}{\lambda_{\text{об}}} + \frac{\delta_{\text{п}}}{\lambda_{\text{п}}}},$$

где

$$\begin{aligned}\lambda_{об} &= 20 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \\ \lambda_{в} &= 40 \cdot 10^{-3} \text{ Вт/м} \cdot \text{К}; \\ \delta_{в} &= (0 \div 0,15) \text{ мм}.\end{aligned}$$

При нагреве урана $\Delta T_V = 500^\circ\text{C}$ и коэффициенте линейного расширения $\alpha_V = 12,5 \cdot 10^{-6} \text{ I/K}$ увеличение размера вкладыша вдоль оси составит

$$\Delta l = \delta v d_v \Delta T_V = 0,025 \times 12,5 \cdot 10^{-6} \cdot 500 \approx 0,15 \text{ мм},$$

что и принимается за максимальную величину технологического зазора при $\delta_{в} = 0$, $\alpha_1 \approx \bar{\alpha} = 144 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$;
при $\delta_{в} = 0,15 \text{ мм}$ $\alpha_2 \approx 90 \text{ Вт/м}^2 \cdot \text{К}$.

Рассчитаем теперь температурное поле стальной пластины и впresoванного в нее ($U - Mo$)-вкладыша. Дифференциальное уравнение, описывающее поле вкладыша,

$$\frac{d^2 T_1}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_1}{dr} - k_1^2 T_1 = F_1. \quad (1)$$

Соответствующее уравнение для стальной пластины

$$\frac{d^2 T_2}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT_2}{dr} - k_2^2 T_2 = F_2, \quad (2)$$

где

$$\begin{aligned}k_1^2 &= \frac{2\alpha\lambda}{\delta_v \lambda_v (\lambda + \alpha\delta_v)}, & F_1 &= -\left(\frac{q_v}{\lambda_v} + k_1^2 \bar{T}\right); \\ k_2^2 &= \frac{2\alpha}{\delta_{ст} \lambda_{ст}}, & F_2 &= -k_2^2 \bar{T}, & q_v &= \frac{\bar{W}}{\pi R_1^2 \delta_v}.\end{aligned}$$

Решения уравнений (1) и (2) имеют вид

$$T_1(r) = C_1 I_0(k_1 r) + C_2 K_0(k_1 r) - \frac{F_1}{k_1^2}, \quad (3)$$

$$T_2(r) = C_3 I_0(k_2 r) + C_4 K_0(k_2 r) - \frac{F_2}{k_2^2}, \quad (4)$$

где I_0 и K_0 — функции Бесселя 1-го и 2-го рода и нулевого порядка.

Для определения постоянных C_1, C_2, C_3, C_4 воспользуемся граничными условиями:

- температура урана на поверхности максимальна в центре вкладыша

$$dT_1/dr = 0 \quad \text{при } r = 0;$$

- равные температуры на границе вкладыша и пластины

$$T_1 = T_2 \quad \text{при } r = R_1;$$

- одинаковый тепловой поток на границе вкладыша и пластины

$$\frac{dT_1}{dr} = \frac{dT_2}{dr} \quad \text{при } r = R_1 \quad \text{и } \lambda_v \approx \lambda_{ст};$$

- температура на внешней границе блока равна средней температуре охлаждающей среды

$$T_2 = \bar{T} \quad \text{при } r = R_2.$$

Соответственно, константы C_1, C_2, C_3, C_4 в уравнениях (3) и (4) будут иметь значения

$$\begin{aligned}C_1 &= \frac{K_1(k_2 R_1) \left(\frac{F_1}{k_1^2} - \frac{F_2}{k_2^2}\right)}{I_0(k_1 R_1) K_1(k_2 R_1) + \frac{k_1}{k_2} I_1(k_1 R_1) K_0(k_2 R_1)}; \\ C_2 &= 0;\end{aligned}$$

$$C_3 \approx 0 \quad [\text{т.к. } K_0(k_2 R_2) \rightarrow 0 \quad \text{при } k_2 R_2 > 1,5];$$

$$C_4 = -\frac{\frac{k_1}{k_2} \cdot I_1(k_1 R_1) \left(\frac{F_1}{k_1^2} - \frac{F_2}{k_2^2}\right)}{I_0(k_1 R_1) K_1(k_2 R_1) + \frac{k_1}{k_2} I_1(k_1 R_1) K_0(k_2 R_1)} = -\frac{k_1}{k_2} \frac{I_1(k_1 R_1)}{K_1(k_2 R_1)} C_1.$$

Здесь I_1 и K_1 — функции Бесселя 1-го и 2-го рода и нулевого порядка.

Теперь уравнения (3) и (4) можно переписать в виде

$$T_1(r) = C_1 I_0(k_1 r) - \frac{F_1}{k_1^2}, \quad 0 \leq r \leq R_1; \quad (5)$$

$$T_2(r) = C_4 K_0(k_2 r) - \frac{F_2}{k_2^2}, \quad R_1 \leq r \leq R_2. \quad (6)$$

Ниже приводятся параллельные оценочные расчеты максимальных значений температуры ($U - Mo$)- вклада для двух крайних вариантов: с минимальным ($\delta_b = 0$) и максимальным ($\delta_b = 0,15$ мм) воздушными зазорами (при $q_v = 5,4 \cdot 10^6$ Вт/м³)

1) $\delta_b = 0$ α_1 :

$$k_1^2 = 500, \quad k_1 = 22,4, \quad k_2^2 = 309, \quad k_2 = 17,6;$$

$$k_1/k_2 = 1,27, \quad k_1/k_2 = 1,04;$$

$$F_1 = -2,43 \cdot 10^5, \quad \frac{F_1}{k_1^2} = -1160;$$

$$\frac{F_2}{k_2^2} = -40, \quad \frac{F_1}{k_1^2} - \frac{F_2}{k_2^2} = -1120;$$

$$k_1 R_1 = 1,19, \quad k_2 R_1 = 0,93;$$

$$I_0(1,19) = 1,38, \quad I_1(1,19) = 0,70;$$

$$K_0(0,93) = 0,46, \quad K_1(0,93) = 0,68, \quad I_0 \cdot K_1 = 0,938;$$

$$I_1 \cdot K_0 = 0,322, \quad C_1 = -237;$$

$$\text{при } r = 0, \quad I_0(0) = 1, \quad T_1(0) = C_1 - \frac{F_1}{k_1^2};$$

$$T_1(0) = 273^\circ\text{C}.$$

2) $\delta_b = 0,15$, α_2 :

$$k_1^2 = 209, \quad k_1 = 14,5, \quad k_2^2 = 194, \quad k_2 = 13,9;$$

$$F_1 = -2,55 \cdot 10^5, \quad \frac{F_1}{k_1^2} = -510;$$

$$\frac{F_2}{k_2^2} = -40, \quad \frac{F_1}{k_1^2} - \frac{F_2}{k_2^2} = -470;$$

$$k_1 R_1 = 0,77, \quad k_2 R_1 = 0,74;$$

$$I_0(0,77) = 1,15, \quad I_1(0,77) = 0,41;$$

$$K_0(0,74) = 0,62, \quad K_1(0,74) = 0,97;$$

$$I_0 \cdot K_1 = 1,115, \quad I_1 \cdot K_0 = 0,254, \quad C_1 = -790;$$

$$\text{при } r = 0, \quad I_0(0) = 1, \quad T_1(0) = C_1 - \frac{F_1}{k_1^2};$$

$$T_1(0) = 370^\circ\text{C}.$$

Аналогичный расчет для $\bar{W} = 1800$ Вт, когда $q_v = 8,2 \cdot 10^6$ Вт/м³, $\bar{T} = 50^\circ\text{C}$.

1) $\delta_b = 0$, α_1 :

$$F_1 = -3,81 \cdot 10^5, \quad \frac{F_1}{k_1^2} = -762;$$

$$\frac{F_2}{k_2^2} = -50, \quad \frac{F_1}{k_1^2} - \frac{F_2}{k_2^2} = -712;$$

$$C_1 = -359, \quad T_1(0) = 403^\circ\text{C};$$

$$T_1(0) < [T_v].$$

2) $\delta_b = 0,15$, α_2 :

$$F_1 = -3,57 \cdot 10^5, \quad \frac{F_1}{k_1^2} = -1708;$$

$$\frac{F_2}{k_2^2} = -50, \quad \frac{F_1}{k_1^2} - \frac{F_2}{k_2^2} = -1658;$$

$$C_1 = -1170, \quad T_1(0) = 538^\circ\text{C};$$

$$T_1(0) \simeq [T_v],$$

где $[T_v] = 550^\circ\text{C}$ по условию совместимости урана в контакте с нержавеющей сталью.

Приложение II

Распределение суммарного тепловыделения в цилиндрической электроядерной установке (см. рис.1), облучаемой пучком 660 МэВ протонов перпендикулярно длине плутониевых ТВЭЛов
(в расчете на 2000 бомбардирующих протонов)

Распределение по длине ТВЭЛов — перпендикулярно направлению протонного пучка

Z, см	Q_{tot}	Z, см	Q_{tot}
.1000E+01	.0000E+00	.1200E+02	.2683E+05
.2000E+01	.4222E+06	.1300E+02	.2622E+05
.3000E+01	.2861E+07	.1400E+02	.2543E+05
.4000E+01	.4121E+07	.1500E+02	.2371E+05
.5000E+01	.5134E+07	.1600E+02	.2273E+05
.6000E+01	.5819E+07	.1700E+02	.2179E+05
.7000E+01	.6163E+07	.1800E+02	.2228E+05
.8000E+01	.2992E+07	.1900E+02	.2116E+05
.9000E+01	.3062E+05	.2000E+02	.6863E+04
.1000E+02	.2883E+05	.2100E+02	.0000E+00
.1100E+02	.2761E+05		

Распределение вдоль направления протонного пучка

R, см	Q_{tot}	R, см	Q_{tot}
.1500E+01	.6363E+03	.1800E+02	.3033E+07
.3000E+01	.2691E+03	.1950E+02	.2671E+07
.4500E+01	.1010E+04	.2100E+02	.2185E+07
.6000E+01	.1136E+04	.2250E+02	.2541E+04
.7500E+01	.6657E+06	.2400E+02	.1119E+04
.9000E+01	.2367E+07	.2550E+02	.8465E+03
.1050E+02	.2728E+07	.2700E+02	.8380E+03
.1200E+02	.3114E+07	.2850E+02	.1670E+03
.1350E+02	.3468E+07	.3000E+02	.7018E+02
.1500E+02	.4255E+07	.3150E+02	.8343E+02
.1650E+02	.3315E+07		

Приложение III

Распределение тепловыделения внутри плутониевого стержня, облучаемого пучком 660 МэВ протонов в средней точке перпендикулярно его продольной оси
(в расчете на 10^5 бомбардирующих протонов)

Суммарное тепловыделение:

в ионизационных процессах $Q_{ion} = 1.36 \cdot 10^6$;
при низкоэнергетическом делении $Q_{lfs} = 6.03 \cdot 10^2$;
при высокоэнергетическом делении $Q_{hfs} = 1.23 \cdot 10^4$.

Распределение тепловыделения вдоль стержня

Z, см	Q_{tot} , МэВ	Z, см	Q_{tot} , МэВ
.1000E+01	.0000E+00	.9000E+01	.1118E+02
.2000E+01	.0000E+00	.1000E+02	.0000E+00
.3000E+01	.0000E+00	.1100E+02	.0000E+00
.4000E+01	.0000E+00	.1200E+02	.0000E+00
.5000E+01	.1295E+05	.1300E+02	.0000E+00
.6000E+01	.1038E+02	.1400E+02	.0000E+00
.7000E+01	.6890E+04	.1500E+02	.0000E+00
.8000E+01	.1352E+07		

Распределение тепловыделения поперек сержня (вдоль направления протонного пучка)

R, см	Q_{tot} , МэВ	R, см	Q_{tot} , МэВ
.1500E-01	.1295E+05	.3150E+00	.0000E+00
.3000E-01	.0000E+00	.3300E+00	.0000E+00
.4500E-01	.0000E+00	.3450E+00	.0000E+00
.6000E-01	.0000E+00	.3600E+00	.0000E+00
.7500E-01	.0000E+00	.3750E+00	.0000E+00
.9000E-01	.0000E+00	.3900E+00	.0000E+00
.1050E+00	.0000E+00	.4050E+00	.0000E+00
.1200E+00	.0000E+00	.4200E+00	.0000E+00
.1350E+00	.0000E+00	.4350E+00	.0000E+00
.1500E+00	.0000E+00	.4500E+00	.7977E+05
.1650E+00	.0000E+00	.4650E+00	.2123E+05
.1800E+00	.0000E+00	.4800E+00	.1059E+06
.1950E+00	.0000E+00	.4950E+00	.1520E+05
.2100E+00	.0000E+00	.5100E+00	.9419E+05
.2250E+00	.0000E+00	.5250E+00	.1000E+01
.2400E+00	.0000E+00	.5400E+00	.0000E+00
.2550E+00	.0000E+00	.5550E+00	.3292E+06
.2700E+00	.0000E+00	.5700E+00	.1043E+07
.2850E+00	.0000E+00	.5850E+00	.1025E+06
.3000E+00	.0000E+00	.6000E+00	.1362E+06

Приложение IV

ARC-метод (Adiabatic Resonance Crossing Method) выжигания радиоактивных отходов

Суть метода состоит в том, что выжигаемый образец помещается в замедляющую, но слабо поглощающую нейтроны среду (например, внутрь свинцового куба, см. рис. 5), облучаемую потоком быстрых нейтронов. В процессе диффузии и "адиабатического" замедления каждый нейтрон может несколько раз проходить сквозь образец, всякий раз с другой энергией, вследствие чего вероятность его резонансного поглощения внутри образца существенно возрастает.

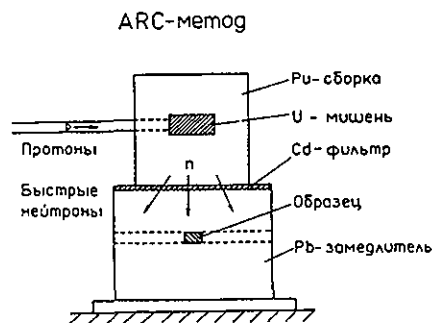


Рис. 5. Принципиальная схема экспериментальной реализации ARC-метода

Подобный метод (он был впервые применен в 50-ых годах в ФИАН СССР) используется в нейтронной спектроскопии при селекции нейтронов по времени замедления, увеличивая вероятность резонансного захвата (в зависимости от величины энергии нейтронов) на 3 — 4 порядка по сравнению с обычной методикой по времени пролета. Можно предполагать, что ARC-метод будет весьма эффективным и в случае трансмутации радиоактивных отходов. Эффективный, действующий на выжигаемый образец поток нейтронов $N_{eff} \simeq K \cdot 10^{12}/с$. Величина

коэффициента K остается пока не оцененной ни теоретически, ни экспериментально.

С помощью проектируемой электроядерной установки может быть исследована как эффективность ARC-метода, так и промоделированы режимы выжигания ряда нуклидов, трансмутация которых другими способами весьма затруднительна.

Литература

- [1] В. Г. Васильков и др. Атомная эн. 1970, т. 29, с. 151.
- [2] P. R. Tunnicliffe, B. H. Chidley, J. S. Fraser. *High-current proton linear accelerators and nuclear power*. Report at the Int. Conf. on Accelerators. Chalk River, Ontario, 1976.
- [3] В. С. Барашенков ЭЧАЯ. 1978, т.9, с. 871.
- [4] Proc. of Int. Workshop on Nuclear Methods for Transmutation of Nuclear Waste (Problems, Perspectives, Cooperative Research), Dubna, 29 — 31 May 1996. World Scientific, Singapore, 1996.
- [5] Proc. of Second Int. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, 3 - 7 June 1996. Uppsala Univ. 1997.
- [6] Proc. of 8-th Intern. Conf. on Emergency Energy Sources. Obninsk, 34 - 29 June 1996. ФЭИ, Обнинск, 1996.
- [7] K. D. Tolstov, JINR Rapid Communication 1993, т. 62(5), с. 5.
- [8] П. Л. Кириллов, К. Д. Толстов, Д. Чултем. "Проект электроядерной электростанции", ФЭИ, Обнинск, 1992.
- [9] C. Rubbia. Proc. of Second Int. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications, Kalmar, 3 - 7 June 1996. p. 35.
- [10] P. Mandrillon, N. Fietier, C. Rubbia. Proc. of Second Int. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications. Kalmar, 3 - 7 June 1996. Uppsala Univ. 1997. p. 984.

- [11] V. S. Barashenkov, A. Polanski A. N. Sosnin. Application of low-energy accelerators in electronuclear systems. JINR E2-97-304, Dubna 1997.
- [12] В. С. Барашенков и др. Применение низкоточных ускорителей ОИЯИ для моделирования экологически безопасной утилизации плутония. JINR E2-97-245, Dubna, 1997.
- [13] В. П. Дмитриевский. ЭЧАЯ. 1997, т. 28, с. 151.
- [14] Правила ядерной безопасности подкритических установок. ПБЯ-01-92, Дубна, 1992.
- [15] В. Ф. Колесов, В. Я. Гужовский. О возможности увеличения эффективности установок для электроядерной трансмутации на основе перехода к мультисекционированным бланкетам. ШУЗ-27-93, Арзамас-16, 1993.

Рукопись поступила в издательский отдел
30 марта 1998 года.