

УДК 621.039: 539.172

ЯДЕРНАЯ РЕЛЯТИВИСТСКАЯ ЭНЕРГЕТИКА – ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

¹Чилап В.В., ¹Солодченкова С.А., ¹Чиненов А.В., ¹Белов Е.М., ¹Богомолов А.С., ¹Галанин М.В.,
¹Колесников В.А., ¹Рязанский Н.М., ²Тютюнников С.И., ²Кадыков М.Г., ²Фурман В.И., ²Адам И., ²Балдин А.А.,
²Берлев А.И., ²Владимирова Н.М., ²Гундорин Н.А., ²Копач Ю.Н., ²Краснов В.А., ²Рогов А.Д., ²Солнышкин А.А.,
³Хильманович А.М., ³Марцынкевич Б.А., ⁴Жук И.В., ⁴Корнеев С.В., ⁴Потапенко А.С., ⁴Сафронова А.А.,
⁴Сорокин В.В., ⁴Сорокин В.Н., ⁵Воронко В.А., ⁵Сотников В.В., ⁵Артюшенко М.Ю., ⁶Жданов С.В., ⁶Кислицин С.Б.

¹Центр физико-технических проектов «Атомэнергомаш», Москва, Россия

²Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, Россия

³Институт физики им. Б.И.Степанова НАН Беларуси, Минск, Беларусь

⁴Объединенный институт энергетических и ядерных исследований – Сосны НАН Беларуси, Минск, Беларусь

⁵Национальный научный центр Харьковский физико-технический институт, Харьков, Украина

⁶Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан

Представлено физико-техническое обоснование принципиально новой схемы электроядерного метода, основанной на ядерных релятивистских технологиях (ЯРТ). Схема ЯРТ предусматривает формирование предельно жесткого нейтронного спектра в объеме квазибесконечной, глубоко подкритичной активной зоны из природного (обедненного) урана или тория. Для получения максимальной энергоэффективности в схеме ЯРТ, в частности, предусматривается повышение энергии пучка релятивистских частиц с традиционной энергии 1 ГэВ до уровня ~ 10 ГэВ. Показана физическая возможность использования в составе топливной композиции ОЯТ тепловых реакторов, без его предварительной радиохимической переработки. Приведены оценки ожидаемых параметров энергетических ЯРТ-систем. Представлены результаты первых экспериментов по облучению массивных урановых мишеней массой 315 и 500 кг дейтронными пучками с энергиями от 1 до 6 ГэВ, проведенных в ОИЯИ в 2009-11 г.г., которые показали перспективность основных принципов схемы ЯРТ.

Тепловые и быстрые реакторы, составляющие основу традиционной атомной энергетики, работают на управляемой цепной реакции деления со средней энергией нейтронов около или существенно ниже 0,2 МэВ. Эта энергия определяется спектром нейтронов деления (средняя энергия спектра ~ 1,5 МэВ, максимальная ~ 20 МэВ), и конструкцией активной зоны.

В диапазоне энергий делительного спектра нейтронов - работают две основные неупругие реакции:

- реакция деления (n, f), которая отвечает за непрерывную наработку долгоживущих продуктов деления;
- реакция радиационного захвата (n, γ), которая отвечает за непрерывную наработку актинидов, в частности изотопов плутония.

Электроядерные системы или Accelerator Driven Systems (ADS) могут, в принципе, работать на значительно более жестком нейтронном спектре. Однако, классические схемы ADS (ускоритель с энергией ~ 1 ГэВ + нейтронопроизводящая ограниченная, как правило, свинцовая мишень + подкритическая активная зона с критичностью $k_{эфф} \sim 0,94 \div 0,98$), - основаны на использовании того же «реакторного» нейтронного спектра. Они, по сути, представляют собой гибриды подкритического быстрого реактора и внешнего (электроядерного) источника нейтронов.

В делительном нейтронном спектре пороговые минорные актиниды «горят» малоэффективно, что обусловлено их высоким (~ 1 МэВ) порогом деления. Трансмутация же долгоживущих продуктов деления

из состава ОЯТ крайне плохо замыкается за счет многошаговых реакций, которые приводят к появлению новых долгоживущих радиоактивных изотопов.

Запасов основного топлива традиционной атомной энергетики - ^{235}U - в энергетическом эквиваленте не больше чем нефти и газа. Большие запасы естественного урана (^{238}U - 99,3 % и ^{235}U -0,7%) и тория могут обеспечить будущее энергетики, но в существующих и даже в перспективных реакторах они «горят» не напрямую, в силу высокого порога деления (~ 1÷2 МэВ), а через образование и репроцессинг промежуточных ядер ^{233}U и ^{239}Pu .

Анализ различных направлений развития ядерной энергетики [1], показывает существенную ограниченность возможностей традиционных реакторных и классических электроядерных (ADS) систем, основанных на использовании нейтронов спектра деления, данного нам самой природой, - в решении глобальных энергетических проблем.

Главные причины такой ограниченности:

1. Нерешенность в рамках современной концепции атомной энергетики проблемы утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ).
2. Отсутствие запасов сырья (урана-235) на многие сотни лет.

На сегодняшний день единственной реальной перспективой кардинального решения проблем современной атомной энергетики представляется использование более жесткого, чем делительный, спектра нейтронов.

Для практической реализации этого пути разработана *принципиально новая схема* электроядерного метода, основанная на ядерных релятивистских технологиях (ЯРТ) [1].

Схема ЯРТ нацелена на формирование максимально жесткого нейтронного спектра внутри активной зоны (АЗ).

Ожидается, что такой спектр позволит экономически и экологически эффективно «сжигать» для производства энергии обедненный (отвальный) уран, торий, а также ОЯТ атомных электростанций без его сложной и «грязной» радиохимической переработки.

Схема ЯРТ основана на реализации следующих базовых физико-технических принципов.

1. Использование квазibesконечной активной зоны (АЗ) из природного (обедненного) урана, тория, а также из ОЯТ. (Под квазibesконечной понимается зона, размеры которой обеспечивают минимальную, < 5%, утечку нейтронов).
2. Использование в качестве нейтронопроизводящей мишени материала АЗ.
3. Использование сканирующего расходящегося пучка для снижения на несколько порядков плотности энерговыделения в центральной области АЗ, служащей нейтронопроизводящей мишенью.
4. Повышение энергии иницирующего пучка до ~ 10 ГэВ вместо ~ 1 ГэВ в традиционных электроядерных схемах.
5. Реализация технологии компактного модульного трехмерного линейного ускорителя на обратной волне (УЛОВ).
6. Применение для загрузки АЗ шаровых капсулированных тепловыделяющих элементов, изготовленных на основе микротвэльной технологии, из урана, тория, а также из ОЯТ, без его предварительной радиохимической переработки.
7. Использование технологии высокотемпературного гелиевого теплоносителя 1-го контура.

1-й принцип - это возврат к *квазibesконечной* активной зоне (АЗ) из природного (обедненного) урана и/или тория, как это и предполагалось делать в многочисленных работах по электроядерному бридингу. Такие активные зоны глубоко подкритичны. Например, коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде из природного урана со-

ставляет ~ 0,36. Еще в 1958 году было показано [2], что *только в глубоко подкритичной системе* можно перейти к спектру нейтронов, определяемому внешним источником нейтронов, т.е. получить существенно более жесткий, по сравнению с делительным, спектр. Это позволяет задействовать большой набор конкурирующих между собой неупругих процессов. Кроме традиционных реакций (n,f) и (n, γ), дополнительно подключаются многоступенчатые каскадные реакции и пороговые реакции типа (n, xn). Эти процессы обеспечивают, в частности, возможность эффективного «сжигания» пороговых минорных актинидов.

1-й принцип является основой возможности реализации 2-го и 3-го принципов. Глубокая подкритичность активной зоны в схеме ЯРТ позволяет резко снизить плотность энерговыделения в центральной области АЗ ЯРТ-реактора - мишени, в частности, за счет использования сканирующего расходящегося релятивистского пучка. Это позволяет в принципе устранить потребность в крайне сложном промежуточном элементе, непременно атрибуте классической схемы ADS – в ограниченной нейтронопроизводящей мишени.

4-й принцип – это переход к энергиям протонов (дейтронов?) ~ 10 ГэВ.

Для того чтобы схема работала необходимо, чтобы ионизационный пробег был значительно больше пробега до неупругого взаимодействия, т.е. чтобы трансформация энергии первичной частицы в множественность каскадных частиц и их энергию в результате неупругого соударения с ядрами мишени, произошла ранее, чем частица потеряет значительную часть своей энергии из-за ионизационных потерь. Длина свободного пробега частицы до неупругого столкновения с ядрами мишени L_{in} , т.е. до начала каскада, составляет ~ 17 см для тория и ~ 10 см для урана. В таблице 1 приведены оценки ионизационных потерь энергии протоном на длине свободного пробега до неупругого взаимодействия для различных значений энергии первичного протона.

Здесь: E_0 – энергия налетающего протона, ГэВ; ΔE - ионизационные потери энергии на длине свободного пробега L_{in} , МэВ; E_{in} - энергия частицы, иницирующей каскад, $E_{in} = E_0 - \Delta E$, ГэВ; $\Delta E/E_0$ – отношение ионизационных потерь на длине свободного пробега до неупругого соударения с атомами мишени к первоначальной энергии частицы, в %.

Таблица 1. Ионизационные потери энергии протоном на длине свободного пробега до неупругого взаимодействия для различных значений энергии первичного протона

E_0	0,7	1	1,5	2	3	5	10	15	20	30
ΔE	250	229	215	210	215	226	247	258	268	282
E_{in}	0,45	0,77	1,285	1,79	2,785	4,774	9,753	14,75	19,73	29,72
$\Delta E/E_0$	35,7	22,9	14,3	10,5	7,2	4,5	2,5	1,7	1,3	0,9

Как следует из таблицы 1, ионизационные потери энергии перед каскадом имеют минимум при энергии ~ 2 ГэВ и далее с ростом энергии слабо возрастают. Однако отношение $\Delta E/E_0$ - неуклонно уменьшается по мере увеличения E_0 . Если задаться вопросом, что выгоднее иметь: один протон с энергией 10 ГэВ или десять протонов с энергией 1 ГэВ (при одной и той же мощности пучка), то с точки зрения ионизационных потерь ответ очевиден, так как в первом случае потери составят 247 МэВ, а во втором 2290 МэВ.

Подъем по энергии позволяет снизить на порядок требуемый ток ускорителя при той же мощности пучка и значительно повысить долю его энергии, идущую на генерацию жесткого нейтронного поля в объеме активной зоны. Это определяется, в частности, возрастанием роли мезонообразования (в квазибесконечной АЗ) в повышении множественности нейтронов и жесткости нейтронного спектра с ростом энергии пучка.

5-7-й принципы определяют технологическую и физическую возможность реализации основной идеи схемы ЯРТ.

НЕКОТОРЫЕ ОЖИДАЕМЫЕ ПРЕИМУЩЕСТВА СХЕМЫ ЯРТ

1. Схема ЯРТ позволит эффективно напрямую «сжигать» для производства энергии базовый материал активной зоны - природный (обедненный) уран или торий *без использования урана-235*. (Отметим, что схема ЯРТ на сегодня является практически единственной реальной схемой ядерной энергетики, в рамках которой возможно вовлечение запасов тория в решение глобальных энергетических проблем).

2. В схеме ЯРТ, в отличие от «классических» ADS систем, существенно упрощается решение проблем окна ввода пучка в активную зону и охла-

ждения центральной области АЗ - нейтронопроизводящей мишени.

3. Возможность работы в маневренном режиме.

4. Схема ЯРТ обеспечивает возможность экономически и экологически эффективной утилизации отработанных тепловыделяющих сборок (ТВС), содержащих отработанное ядерное топливо (ОЯТ), без их сложной и «грязной» радиохимической переработки и разделения на элементы.

Две последние возможности определяются свойствами каскада. При каскадном механизме генерации нейтронов в квазибесконечной системе не является принципиальным с легким или тяжелым ядром вступил в неупругое взаимодействие первичный релятивистский протон. Действительно, при взаимодействии релятивистского протона с легким ядром генерируется меньше нейтронов, но гораздо более жестких (высокоэнергетичных). Эти нейтроны далее восстанавливают искомую множественность в последующих поколениях межъядерных каскадов. (Отметим, что ОЯТ тепловых АЭС содержит ~ 2% легкоделящихся изотопов, поэтому сверхбыстрая АЗ ЯРТ-реактора останется глубоко подкритичной).

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ СХЕМЫ ЯРТ

В таблице 2 приведены результаты экспериментов [3], проведенных на квазибесконечных мишенях массой ~ 3,5 т из обедненного и природного урана, которые облучались протонами с энергией 660 МэВ на синхротроне ЛЯП ОИЯИ. За счет асимметричного ввода пучка эти результаты эквивалентны результатам для мишеней массой ~ 7 т. В данных таблицы 2, по оценкам авторов, не учтены 3-4 деления, происходящие в каскадной области центральной зоны мишени диаметром ~ 10 см, поскольку они не могли быть непосредственно измерены в эксперименте. Утечка нейтронов из такой мишени, по оценкам авторов, составляла ~ 10-12% [3].

Таблица 2. Выход плутония и число актов деления в мишенях в расчете на один протон с энергией 660МэВ

	Выход плутония (число ядер)	Число делений
Обедненный уран	38±4	13,7±1,2
Природный уран	46±4	18,5±1,7

Энерговыведение в экспериментах составило, в среднем, ~ 3950 МэВ на протон в обедненном уране, и ~ 4900 МэВ на протон в природном уране, что дает коэффициенты усиления мощности (K_{UM}) протонного пучка с энергией 660 МэВ: ~ 6,0 на обедненном уране, и ~ 7,4 на природном уране.

В работах [4÷6], выполненных в ОИЯИ, была теоретически исследована динамика наработки ^{239}Pu и ^{233}U в квазибесконечных делящихся мишенях из природного урана и тория. В частности, было получено, что в ториевой мишени, облучаемой сильноточным пучком протонов с энергией 1 ГэВ, скорость наработки ^{233}U при его концентрациях $\leq 1,5\%$ максимальная. При дальнейшем увеличении концентрации она снижается, и на уровне ~ 6% достигается

равновесие между наработкой и исчезновением ^{233}U благодаря реакциям (n,f) и (n, γ). С учетом того, что отношения $\alpha = \sigma_\gamma / \sigma_f$ для ^{233}U и ^{239}Pu , а также сечения радиационного захвата σ_γ для ^{232}Th и ^{238}U в рассматриваемой области нейтронного спектра близки, можно принять в качестве оценки равновесной концентрации ^{239}Pu в квазибесконечной урановой АЗ величину ~ 6%, полученную для ториевой АЗ.

В работах [5, 6] были получены оценки увеличения полного энерговыведения в мишенях из естественного урана и тория в зависимости от концентрации изотопов ^{239}Pu и ^{233}U соответственно. Так, например, увеличение концентрации ядер ^{233}U в ториевой мишени от нуля до 6% приводит к возрастанию

танию коэффициента усиления мощности протонного пучка с энергией 1 ГэВ в ~ 6÷12 раз [6].

Важным результатом работ [4, 6] является то, что в исследованной области (0÷6%) концентраций ^{239}Pu и ^{233}U выявлена очень слабая зависимость основной (жесткой) части спектра нейтронов от обогащения глубоко подкритических АЗ указанными легко делящимися изотопами. Это позволяет ожидать сохранения глубокой подкритичности ЯРТ-системы при ее выходе на равновесную концентрацию легко делящихся изотопов. Для сравнения напомним, что традиционные быстрые реакторы работают при обогащениях топлива ~ 20%.

В таблице 3 приведена зависимость энергетических характеристик нейтронного излучения от энергии падающих протонов для массивной свинцовой мишени с размерами $\varnothing 20 \times 60$ см, полученных в работе [7], выполненной в ЛВЭ ОИЯИ.

Здесь E_p – энергия протонов, $\langle E \rangle$ – средняя величина энергии нейтронов, E_{kin} – суммарная кинетическая энергия нейтронного излучения, W – энергия, затраченная на образование нейтронов.

Таблица 3. Зависимость энергетических характеристик нейтронного излучения от энергии падающих протонов для массивной свинцовой мишени

E_p , ГэВ	$\langle E \rangle$, МэВ	E_{kin} , МэВ	E_{kin} / E_p , %	W , МэВ	W / E_p , %
0,994	8,82	213	21,3	382	38,2
2,0	11,6	513	25,6	822	41,1
3,65	13,7	1106	30,3	1670	45,6

Таблица 4. Консервативные оценки ожидаемых коэффициентов K_{UM} усиления мощности протонного пучка

E_p , ГэВ	Стартовый K_{UM}	Равновесный K_{UM}
0,66	~ 7,4	40÷90
1,0	~ 12,0	70÷140
10,0	~ 22,0	130÷260

Результаты, приведенные в таблице 4, находятся в формальном противоречии с выводами эксперимента FEAT [8], выполненного в ЦЕРНе на размножающей мишени из природного урана общей массой ~ 3,6 т для интервала энергий падающих протонов 0,6÷2,75 ГэВ. Для энергии $E_p = 0,6$ ГэВ был получен $K_{UM} \sim 20$, который выходил на насыщение ($K_{UM} \sim 30$) с ростом энергии протонов выше ~ 1 ГэВ. Этот результат связан, по-видимому, с конструкцией размножающей мишени, аналогичной классической схеме гетерогенного теплового реактора. В эксперименте [8] цилиндрические сборки урановых стержней размещались в баке с обычной (легкой) водой. Таким образом, в измерениях [8] был реализован противоположный экспериментам [3] предельный случай мягкого, практически теплового нейтронного спектра с $k_{эфф} \sim 0,9$.

ОЦЕНКИ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ЯРТ-СИСТЕМ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГИИ

Протонный ускоритель мощностью 10 МВт ($E_p = 10$ ГэВ и ток 1 мА), в соответствии с оценками таблицы 4, при $K_{UM} \sim 20$ обеспечит стартовую мощ-

Из данных работы [3] можно оценить долю W / E_p энергии падающего 660 МэВ протона, идущую на образование нейтронов, в размере ~ 20%. Как следует из работы [7], при $E_p \approx 1$ ГэВ она возрастает до 38,2%, достигая при 3,65 ГэВ почти 46%. Оценка этой величины для $E_p = 10$ ГэВ, выполненная с учетом влияния мезообразования в квазibesконечной мишени, позволяет ожидать ее значения на уровне ~ 60% (подробнее см. [1]). Заметим, что рост отношения W/E_p , может быть в значительной мере связан с усилением влияния мезообразования при увеличении энергии падающих протонов. В таблице 4 приведены консервативные оценки ожидаемых коэффициентов K_{UM} усиления мощности протонного пучка в квазibesконечной мишени из природного урана в зависимости от энергии E_p падающих частиц. Эти оценки выполнены на основе результатов работы [3], данных [7], балансового подхода [1], а также расчетов [5, 6] увеличения энерговыделения в АЗ при достижении равновесной концентрации ^{239}Pu .

ность ЯРТ-реактора ~ 200 МВт. При достижении равновесной концентрации ^{239}Pu в АЗ, мощность установки может достичь значений в диапазоне 1300÷2600 МВт. (В схеме ЯРТ возможно использовать наиболее прогрессивные технологии 2-го контура, применяемые в настоящее время на тепловых электростанциях, что позволяет иметь кпд ~ 50÷55%).

При кпд 2-го контура 50%, блок ядерной релятивистской электростанции (ЯРЭС) на старте сможет вырабатывать около 100 МВт электроэнергии, а при выходе на стационарный режим равновесной концентрации ^{239}Pu выработка может возрасти до 650÷1300 МВт. Из них около 30 МВт пойдет на собственные нужды, в основном на обеспечение работы ускорителя (кпд «от розетки» ~ 33%), поскольку прочие затраты энергии учтены в кпд 2-го контура. Т.е. при запуске блока ЯРЭС ~ 30% вырабатываемой электрической мощности будет уходить на собственные нужды, а при выходе на стационарный режим работы – от 4,6% до 2,3%. Сегодня блок ВВЭР-1000 тратит на собственные нужды ~ 5% вырабатываемой электроэнергии.

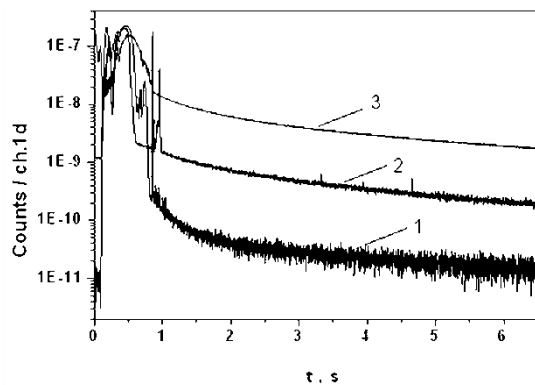
Введение в состав топливной композиции АЗ ОЯТ существующих АЭС может значительно уменьшить время выхода ЯРЭС на стационарный режим равновесной концентрации ^{239}Pu за счет присутствия в составе ОЯТ $\sim 2\%$ легкоделящихся изотопов. На сегодня предполагается, что размеры активной зоны ЯРТ-реактора составят: диаметр ~ 4 м; высота ~ 4 м. С учетом углубленных на $\sim 0,5 \div 1$ м в объем АЗ окон ввода пучка, а также ввода расфокусированного (сканирующего) пучка в активную зону, - можно ожидать плотность потока протонов на выходе из зоны менее $10^7/\text{см}^2 \cdot \text{с}$. Объем активной зоны ЯРТ-реактора составит $\sim 50 \text{ м}^3$. При этом средняя плотность энерговыделения в АЗ при выработке 2000 МВт тепловых (1000 МВт электрических) не должна превышать 40 кВт/л, что позволяет использовать высокотемпературный гелиевый теплоноситель. При этом задача теплосъема облегчается благодаря применению топлива в виде структурированной шаровой капсулированной запытки, которая обеспечивает поверхность теплообмена, многократно превышающую размеры соответствующей поверхности для случая традиционных стержневых ТВЭЛов. Заметим, что конструктивное устройство ЯРТ-реактора по сравнению с традиционными реакторами может оказаться существенно проще, так как в силу его глубокой подкритичности отсутствует необходимость в классическом комплексе систем управления и защиты (СУЗ).

Оценки показывают, что при загрузке в активную зону ЯРТ-реактора ~ 200 т капсул, изготовленных из тонкомятых материалов отработанных ТВС на основе микротвэльной технологии, - ЯРТ-реактор чисто физически сможет вырабатывать на одной такой загрузке $\sim 2000\text{-}3000$ МВт электричества в течение ~ 60 лет. Жизненный цикл ЯРТ-реактора после этих ~ 60 лет завершится режимом глубокой переработки продолжительностью $\sim 1\text{-}2$ года, сопровождаемым затухающим производством электроэнергии. В результате в активной зоне останутся, в основном, короткоживущие, легкие нейтронно-дефицитные изотопы.

Как показывает анализ, практически все технологии для создания полномасштабного демонстрационного прототипа ядерной релятивистской электростанции (ЯРЭС), работающего на диоксиде обедненного (отвального) урана, и/или на ОЯТ, - или уже существуют, или для их реализации имеются значительные научно-технические, технологические и опытно-конструкторские заделы. В частности, проведенные расчеты показали, что размеры ускорителя, выполненного по уникальной российской технологии УЛОВ в 3D-компоновке на энергию 10 ГэВ для блока ЯРЭС, - составят порядка $60 \times 30 \times 12$ м.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПЕРВЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ФИЗИЧЕСКОМУ ОБОСНОВАНИЮ СХЕМЫ ЯРТ

В июне 2009 г. на Нуклотроне ОИЯИ по инициативе ЦФТП «Атомэнергомаш» была проведена серия экспериментов на установке «Квинта» [9], мишенная сборка которой облучалась дейтронами с энергиями 1 и 4 ГэВ. Эта сборка состоит из урановой мишени, помещенной в свинцовый бланкет толщиной 10 см, с окном ввода пучка размером 150×150 мм. Урановая мишень представляет собой конструкцию, состоящую из 3-х секций шестигранных алюминиевых контейнеров с вписанным диаметром 284 мм, в каждом из которых размещено по 61 цилиндрическому урановому блоку. Блоки диаметром 36 мм и длиной 104 мм изготовлены из металлического урана естественного изотопного состава и заключены в герметичные алюминиевые корпуса. Масса блока равна 1,72 кг, а полная масса урана в одной секции составляет 104,92 кг. Для проведения сравнительных экспериментов в сборке использовалась также свинцовая мишень, конструктивно и геометрически идентичная урановой. В этих экспериментах впервые в практике исследований электроядерных систем интегральные характеристики деления в АЗ были изучены путем измерения временной зависимости выхода запаздывающих нейтронов (ЗН). Они регистрировались с помощью детектора «Изомер-М», выполненного на основе 11 пропорциональных ^3He -счетчиков, помещенных в блок замедлителя, и стильбенового детектора.



1 - (Pb+d) для $E_d = 4$ ГэВ; 2 и 3 (U+d) для $E_d = 1$ и 4 ГэВ.

Рисунок 1. Временной спектр выхода нейтронов из геометрически идентичных свинцовой и урановой мишеней:

На рисунке 1 приведены временные зависимости выхода нейтронов из мишенной сборки «Квинта» с урановой мишенью при облучении ее дейтронами с энергиями $E_d = 1$ и 4 ГэВ (кривые 2 и 3), а также из сборки с геометрически идентичной свинцовой мишенью для $E_d = 4$ ГэВ (кривая 1).

Анализ полученных временных спектров ЗН показывает, что при увеличении энергии дейтрона от 1 до 4 ГэВ число делений, и, следовательно, полное энерговыделение в урановой мишени возрастает в $(8,7 \pm 1,2)$ и в $(10,3 \pm 1,5)$ раз по результатам измерений детекторами «Изомер-М» и стильбековым соответственно. При этом коэффициент усиления мощности пучка $K_{УМ}$ возрастает примерно в 2 раза.

В ноябре 2009 года на Нуклотроне на пучке дейтронов с энергией 4 ГэВ был проведен эксперимент по измерения временной зависимости выходов нейтронов из установки «Энергия + Трансмутация» («Э+Т») [10], выполненной по «классической» электроядерной схеме. Мишенная сборка установки «Э+Т» включает в себя центральную свинцовую нейтронопроизводящую мишень, окруженную blanketом из природного урана (масса урана ~ 200 кг).

Сборка, помещенная в ящик с полиэтиленовой засыпкой толщиной ~ 300 мм ($\rho=0,7 \text{ g/cm}^3$), размещалась на том же месте, что и сборка «Квинта». Анализ полученных временных спектров показал, что для данной энергии пучка полный выход ЗН из мишенной сборки «Э+Т» и, соответственно, количество делений на дейтрон - примерно на 2 порядка меньше, чем из сборки «Квинта» с урановой мишенью.

На рисунке 2 представлена систематика существующих данных по зависимости отношений выходов групп ЗН с периодами 1,94 с и 0,49 с [9] от энергии нейтрона, вызывающего деление ядра ^{238}U . Там же нанесены значения этих отношений (в виде горизонтальных линий с коридорами ошибок), полученные из наших экспериментальных данных для сборки «Квинта» с урановой мишенью при энергиях дейтронов 1 ГэВ и 4 ГэВ, а также для мишенной сборки «Э+Т» при энергии дейтронов 4 ГэВ.

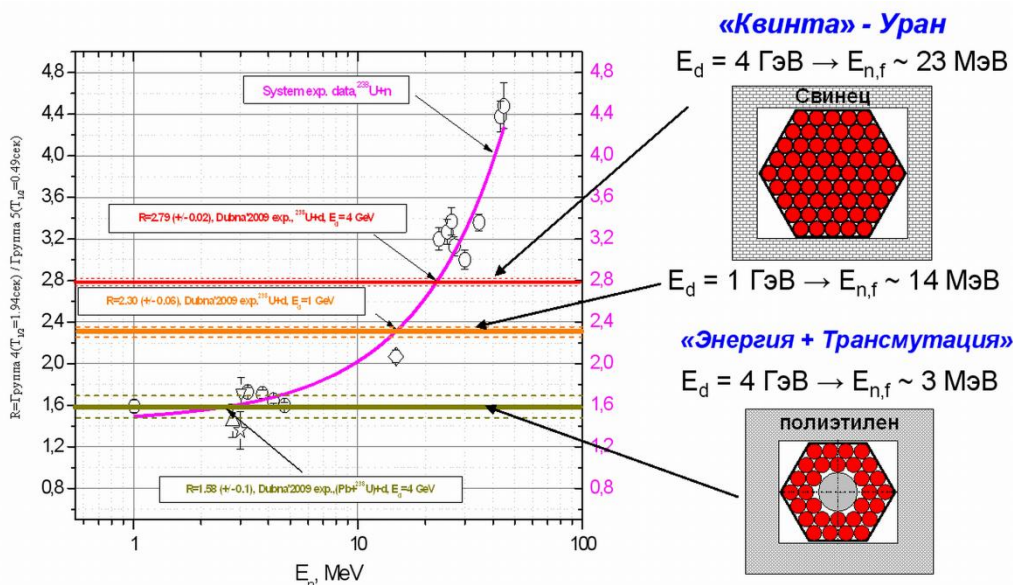


Рисунок 2. Сопоставление энергетической зависимости отношения выходов 4 и 5 групп запаздывающих нейтронов в реакции $U(n, f)$, с нашими измерениями

Из рисунка 2 следует, что для сборки «Квинта» с урановой мишенью при $E_d = 1 \text{ ГэВ}$ значение «средней энергии» нейтронов $\langle E_n \rangle$, вызывающих деление ^{238}U , составляет около 14 МэВ. При $E_d = 4 \text{ ГэВ}$ оно уже приближается к 23 МэВ. Для мишенной сборки «Э + Т» при $E_d = 4 \text{ ГэВ}$ значение $\langle E_n \rangle$ оказывается близким к 3 МэВ.

Данные результаты отражают существенное различие в нейтронных спектрах $\phi(E_n)$ внутри мишенных сборок «Квинта» и «Э + Т», связанное с принципиальными отличиями в их схемных решениях: «Э + Т» - аналог «классической» ADS, «Квинта» - упрощенный прототип схемы ЯРТ. Величины $\langle E_n \rangle$, полученные выше, указывают, что для промежуточного размера сборки «Квинта» большая часть вторичных нейтронов покидает объем мишени, не успев вызвать деление составляющих ее ядер.

Проведенный анализ и полученные результаты показывают, что измерения временных спектров ЗН, испускаемых из массивных размножающих мишенной электроядерных систем - являются тонким и информативным инструментом изучения процессов деления в этих системах.

Эти результаты имели принципиальное значение для всей проблематики электроядерного метода.

1. Впервые экспериментально была поставлена под большой вопрос корректность следующих представлений, сложившихся в процессе предшествующих исследований электроядерных систем: а) оптимум энергии первичного пучка для реализации ADS-систем лежит в области ~ 1 ГэВ; б) с увеличением энергии выше 1 ГэВ коэффициент усиления мощности пучка или падает, в соответствии с расчетным

моделированием, или, как было показано в эксперименте FEAT команды Карло Руббиа, - не растет.

2. В случае подтверждения роста коэффициента усиления мощности пучка с ростом его энергии, возникает необходимость выяснить фундаментальный механизм такого роста и определить его пределы путем проведения исследований в более широком интервале (до 10-12 ГэВ) энергий падающих частиц.

В июне 2010 г. ПКК ОИЯИ по физике частиц утвердил Проект «Энергия и Трансмутация РАО» (Э и Т – РАО) [11] с высшим приоритетом. Этот проект нацелен на комплексное исследование физико-технических аспектов применения принципиально новой схемы электроядерного метода – схемы ЯРТ. Сроки выполнения проекта: 2011-2013 г.г.

В рамках реализации Проекта создаются 2 мишенно - диагностических комплекса.

1. На базе модернизируемой установки «Квинта» с массой урановой мишени ~ 500 кг, которая моделирует центральную область квазибесконечной урановой мишени «Буран».

2. На основе квазибесконечной урановой мишени «Буран» массой ~ 21 т, которая является полномасштабной ядерно-физической моделью активной зоны ЯРТ-реактора.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ПРОЕКТА «Э И Т – РАО»

1. Определение оптимальной энергии и вида частиц (протоны – дейтроны).

2. Изучение процессов нейтронообразования и пространственного распределения нейтронных спектров.

3. Определение зависимости K_{UM} от энергии налетающих протонов и дейтронов.

4. Определение пространственного распределения динамики наработки и уничтожения (деления) ^{239}Pu в зависимости от его концентрации и определение, т.о., его равновесной концентрации.

5. Определение скоростей реакций переработки наиболее актуальных изотопов из состава ОЯТ.

6. Получение набора экспериментальных данных, позволяющих приступить к модификации существующих моделей и транспортных кодов.

В марте 2011 г. в рамках проекта «Э и Т – РАО» была проведена серия экспериментов на дейтронных пучках Нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ с энергиями 2, 4 и 6 ГэВ. Эксперименты проводились на установке «Квинта», прошедшей 1-й этап модернизации, который заключался в добавлении одной сплошной урановой секции для полной утилизации пучка (4 длины свободного пробега), и передней секции, содержащей окно ввода пучка диаметром 80 мм - для уменьшения альбедо. Полная масса урановой мишени составила ~ 500 кг.

ОСНОВНЫЕ ЗАДАЧИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ С МОДЕРНИЗИРУЕМОЙ УСТАНОВКОЙ «КВИНТА»

1. Подтверждение и расширение результатов 2009г.

2. Расширение, развитие и отработка методов и методик измерения параметров ядерно-физических процессов в интересах подготовки экспериментов на установке «Буран».

Основные результаты экспериментов марта 2011 г. сводятся к следующему.

1. *Общий выход* запаздывающих нейтронов на 1 дейтрон (по данным 2-х независимых систем измерений) показывает рост, значительно опережающий рост энергии пучка до энергии 6 ГэВ, что соответствует опережающему росту количества делений и, соответственно, энерговыделения (таблицу 5). Это подтверждает и расширяет результаты 2009 г.

Таблица 5. *Общий выход запаздывающих нейтронов на 1 дейтрон для различных энергий дейтронов*

Энергия дейтронов	2 ГэВ	4 ГэВ	6 ГэВ
Общий выход ЗН на 1 дейтрон в условных единицах	20 ± 2,0	50 ± 5,0	96 ± 10,0

2. *Получен рост* средней энергии нейтронов, вызывающих деление в массивной урановой мишени, от 14±1 МэВ до 37±3 МэВ, при повышении энергии пучка дейтронов от 1 до 6 ГэВ. Значения величины этой энергии, полученные в июне 2009 г. и в марте 2011 г. при энергии дейтронов 4 ГэВ, совпадают в пределах точности измерений (рисунок. 3).

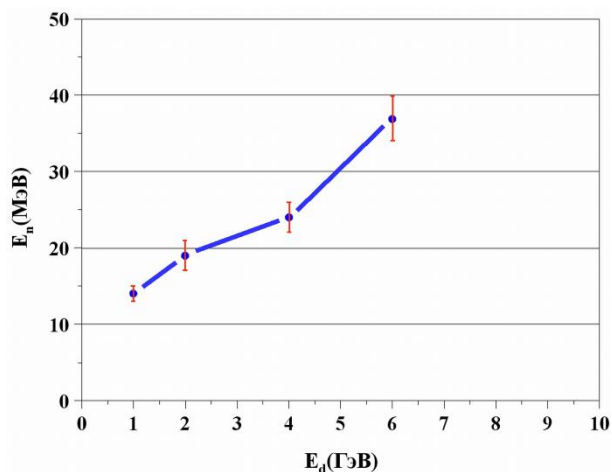


Рисунок 3. *Зависимость средней энергии нейтронов, вызывающих деление в массивной урановой мишени (E_n), от энергии дейтронного пучка (E_d)*

ВМЕСТО ЗАКЛЮЧЕНИЯ

1. Значительный рост средней энергии нейтронов, вызывающих деление в модели центральной области АЗ, с ростом энергии пучка, - указывает на возможность использования ОЯТ без его сложной и «грязной» радиохимической переработки - в качестве топлива ЯРТ-реактора.

2. Проект «Э и Т - РАО», по сути, является частью ядерно-физического блока Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ». Эта программа нацелена на получение базовых исходных данных и доведение комплекса критических технологий до уровня, обеспечивающего возможность создания демонстрационного прототипа ядерной релятивистской электростанции (ЯРЭС) на основе ТЗ, разработанного в результате выполнения Программы. Программа «ЯРТ-ОЯТ» является 1-й фазой принципиально нового, «прорывного», Проекта «ЯРТ-ОЯТ», в результате реализации которого Россия, Беларусь, Казахстан и Укра-

ина смогут «обогнать, не догоняя» - весь мир. Проект «ЯРТ-ОЯТ» фактически является началом Атомного проекта №2. В отличие от 1-го Атомного проекта, нацеленного, в первую очередь, на военные приложения энергии атомного ядра, Атомный проект №2 направлен исключительно на мирное использование энергии атома.

3. При реализации схемы ЯРТ в промышленном масштабе - **ядерная энергетика станет доступной всем, без исключения, странам, сняв проблему нераспространения** на детерминистском уровне.

4. При наличии адекватного финансирования и реализации организационных принципов, соответствующих масштабу проекта, - **Программу «ЯРТ-ОЯТ» можно реализовать за ~ 4 года**, после чего в течение ~ **8 лет** создать первый демонстрационный опытно-промышленный **прототип** блока ЯРЭС в рамках 2-й фазы **Проекта «ЯРТ-ОЯТ»**.

ЛИТЕРАТУРА

1. Проблемы создания широкомасштабной ядерной энергетике и ядерные релятивистские технологии (ЯРТ) [Электронный ресурс] / Центр физико-технических проектов «Атомэнергомаш»; рук. В.В. Чилап – М., 2010. – 60 с. – Режим доступа: <http://www.cftp-aem.ru/Data/RADS02.pdf>, свободный. – загл. с экрана.
2. Марчук, Г.И. Численные методы расчетов ядерных реакторов / Г.И.Марчук. – М.: Атомиздат, 1958. – 384с.
3. Размножение нейтронов в уране, бомбардируемом протонами с энергией 300-660 МэВ / Р.Г. Васильков [и др.] // Атомная энергия. – 1978. – Т. 44, вып. 4. – С. 329-335.
4. Барашенков, В.С. Зависимость характеристик электроядерного бридинга от примеси ^{239}Pu и ^{235}U / В.С. Барашенков, А.Н. Соснин, С.Ю. Шмаков // Препринт ОИЯИ / Дубна. – 1991. – P2-91-422. – 10 с.
5. Барашенков, В.С. Временная зависимость характеристик электроядерной системы («эффект разгонки») / В.С. Барашенков, А.Н. Соснин, С.Ю. Шмаков // Препринт ОИЯИ / Дубна. – 1992. – P2-92-125. – 8 с.
6. Барашенков, В.С. Электроядерный бридинг в ториевых мишенях / В.С. Барашенков, А.Н. Соснин, С.Ю. Шмаков // Препринт ОИЯИ / Дубна. – 1992. – P2-92-285. – 15 с.
7. Исследование эмиссии нейтронов при взаимодействии релятивистских протонов и дейтронов со свинцовыми мишенями / В.И. Юревич [и др.] // Письма в ЭЧАЯ. – 2006. Т.3. – С.49-72.
8. Experimental determination of the energy generated in nuclear cascades by a high energy beam / S. Andriamonje [et al.] // Physics Letters B. – 1995. – V.348. – P. 697-709.
9. Time-dependent spectra of neutrons emitted by interaction of 1 and 4 GeV deuterons with massive natural uranium and lead targets / W. Furman [et al.] // Journal of Korean Physical Society. – 2011. – Vol. 59, N. 2. – P.2006-2009.
10. Krivopustov, M.I. About the first experiment on investigation of ^{129}I , ^{237}Np , ^{238}Pu and ^{239}Pu transmutation at the nuclotron 2.52 GeV deuteron beam in neutron field generated in U/Pb- assembly “Energy plus transmutation” / M.I. Krivopustov [et al.] // Preprint JINR / Dubna. – 2007. – E1-2007-7. – 30 p.
11. Study of Deep Subcritical Electronuclear Systems and Feasibility of Their Application for Energy Production and Radioactive Waste Transmutation (“E&T – RAW” Collaboration) / J. Adam [et al.] // Preprint JINR / Dubna. – 2010. – E1-2010-61. – 18 p.

**ЯДРОЛЫҚ РЕЛЯТИВИСТІК ЭНЕРГЕТИКАСЫ - НЕГІЗДЕР ЖӘНЕ БІРІНШІ
ТӘЖІРИБЕЛЕРДІҢ НӘТИЖЕЛЕРІ ФИЗИКАЛЫҚ-ТЕХНИКАЛЫҚ**

¹Чилап В.В., ¹Солодченкова С.А., ¹Чиненов А.В., ¹Белов Е.М., ¹Богомолов А.С., ¹Галанин М.В., ¹Колесников В.А.,
¹Рязанский Н.М., ²Тютюнников С.И., ²Кадыков М.Г., ²Фурман В.И., ²Адам И., ²Балдин А.А., ²Берлев А.И.,
²Владимирова Н.М., ²Гундорин Н.А., ²Копач Ю.Н., ²Краснов В.А., ²Рогов А.Д., ²Солнышкин А.А.,
³Хильманович А.М., ³Марцынкевич Б.А., ⁴Жук И.В., ⁴Корнеев С.В., ⁴Потапенко А.С., ⁴Сафронова А.А.,
⁴Сорокин В.В., ⁴Сорокин В.Н., ⁵Воронко В.А., ⁵Сотников В.В., ⁵Артюшенко М.Ю., ⁶Жданов С. В., ⁶Кислицин С.Б.

¹*«Атомэнергомаш» физика-техникалық жобалар орталығы Мәскеу, Ресей*

²*Ядролық зерттеулердің біріккен институты, Дубна, Ресей*

³*Беларусь ҰҒА, Б.И.Степанов атындағы физика институты Минск, Беларусь*

⁴*Энергетикалық және ядролық зерттеулердің біріккен институты – Беларусь ҰҒА, Минск*

⁵*Ұлттық ғылыми орталық Харьков физика-техникалық институты, Харьков, Украина*

⁶*ҚР ҰЯО Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

Ядролық релятивистік технологияларға (ЯРТ) негізделген электр ядролық әдістің түбірінен жаңа сұлбасын физика-техникалық негіздеу ұсынылған. ЯРТ сұлбасы табиғи (кемітілген) уранның немесе торийдің аса сынды активті аймағының квазишексіз көлемінде өте қатты нейтронды спектрдің қалыптасуын көздейді. ЯРТ сұлбасында мейлінше жоғары энергия тиімділік алу үшін, жекелей алғанда, үйреншікті энергиясы 1 ГэВ релятивистік бөлшектер шоғының энергиясын ~ 10 ГэВ деңгейіне дейін арттыру көзделеді. Отын композицияларының құрамында жылулық реакторлардың ПЯО алдын ала радиохимиялық өңдеусіз пайдаланудың физикалық мүмкіндігі көрсетілген. Энергетикалық ЯРТ-жүйелердің күтілген параметрлерінің бағасы келтірілген. 2009-2011 жылдары БЯЗИ-де өткізілген 1-6 ГэВ энергиялы дейтрон шоқтармен салмағы 315 және 500кг массивті уран нысаналарды сәулелендіру бойынша алғашқы эксперименттердің нәтижелері ұсынылған, бұл нәтижелер ЯРТ сұлбаларының негізгі принциптерінің келешектілігін көрсетті.

**RELATIVISTIC NUCLEAR POWER -PHYSICAL AND TECHNICAL BASIS
AND RESULTS OF FIRST EXPERIMENTS**

¹V.V.Chilap, ¹S.A. Solodchenkova, ¹A.V. Chinenov, ¹E.M. Belov, ¹A.S. Bogomolov, ¹M.V. Galanin, ¹V.A. Kolesnikov,
¹N.M. Ryazanskij, ²S.I. Tyutyunnikov, ²M.G. Kadykov, ²V.I. Furman, ²I. Adam, ²A.A. Baldin, ²A.I. Berlev,
²N.M. Vladimirova, ²N.A. Gundorin, ²J.N. Kopach, ²V.A. Krasnov, ²A.D. Rogov, ²A.A. Solnyshkin, ³A.M. Khilmanovich,
³B.A. Martynkevich, ⁴I.V. Zhuk, ⁴S.V. Korneev, ⁴A.S. Potapenko, ⁴A.A. Safronov, ⁴V.V. Sorokin, ⁴V.N. Sorokin,
⁵V.A. Voronko, ⁵V.V. Sotnikov, ⁵M.Y. Artyushenko, ⁶S.V. Zhdanov, ⁶S.B. Kislitsin

¹*Center of Physical-Technical Projects "Atomenergomash", Moscow, Russia*

²*Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia*

³*Stepanov Institute of Physics of National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus*

⁴*Joint Institute of Energy and Nuclear Research - Sosny of NASB, Minsk, Belarus*

⁵*The National Science Center Kharkov Physico-Technical Institute, Kharkov, Ukraine*

⁶*Institute of Nuclear Physics NNC RK, Almaty, Kazakhstan*

The physical and technical rationale for a radically new scheme of the electronuclear technique based on the relativistic nuclear technologies (RNT) is presented. The RNT scheme is based on the formation of extremely hard neutron spectra inside the quasi-infinite deep-subcritical core of the natural (depleted) uranium or thorium. In particular, the increase of the relativistic particles energy from conventional value of 1 GeV to ~ 10 GeV is foreseen in order to achieve maximum efficiency of the RNT scheme. The physical possibility of using the spent fuel of thermal reactors without preliminary radiochemical processing, as a part of fuel composition at the RNT, is shown. The estimates of expected parameters of power RNT systems are given. The results of first experiments, held at the JINR in 2009÷11, by irradiation of massive uranium target with masses of 315 and 500 kg with the 1-6 GeV deuterons, which showed the good prospects of basic principles of the RNT scheme, are performed.