

Краткая справка об энергетических приложениях ядерных релятивистских технологий (ЯРТ) и Проекте «ЯРТ-ОЯТ»

1. Актуальность и новизна Проекта «ЯРТ-ОЯТ»

Основным предназначением атомной энергетики является замещение базовой энергетики, основанной на сжигании органического топлива. Однако на сегодня доля атомной энергетики в мировом энергетическом балансе составляет **менее 5%**.

Две главные причины, которые препятствуют ее широкому распространению в мире:

1. Нерешенность проблемы утилизации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ).
2. Проблема топливного обеспечения, т.е. нерешенность задачи вовлечения запасов отвалов урана и тория в производство энергии.

Принятая сегодня в России на безальтернативной основе стратегия развития атомной энергетики - носит сугубо паллиативный характер, и не способна в полной мере решить ни одной из ключевых проблем, указанных выше.

Она основана на использовании быстрых реакторов для расширенного воспроизводства ядерного топлива и реализации замкнутого топливного цикла (ЗТЦ). ЗТЦ предполагает проведение репроцессинга, т.е. полномасштабной радиохимической переработки отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), выделение из ОЯТ урана и наработанного плутония и возвращение их в производство энергии. Репроцессинг сопровождается образованием значительных объемов радиоактивных отходов.

Реализация сегодняшней стратегии сопряжена с целым рядом рисков, в т.ч. и в силу ее безальтернативности, при этом под большим вопросом остается возможность выполнения главной задачи атомной энергетики – замещение базовой энергетики, основанной на сжигании органики.

Быстрые и тепловые реакторы, составляющие основу принятой в России концепции развития атомной энергетики, работают на управляемой цепной реакции деления (1-м промышленно освоенном способе производства нейтронов) со средней энергией нейтронов около или существенно ниже 0,2 МэВ. Эта энергия определяется спектром нейтронов деления (средняя энергия нейтронов деления ~ 2 МэВ, максимальная, практически значимая, ~ 10 МэВ) и конструкцией активной зоны.

1. На сегодняшний день существуют (рассматриваются) 3 пути обращения с содержащими ОЯТ отработавшими тепловыделяющими сборками (ОТВС).

А). Открытый цикл - размещение в хранилищах и длительная выдержка.

На хранилище Юкка Маунтин (США), емкостью 70 000 т ОЯТ, было выделено ~ 96,2 млрд. долларов. Т.е. стоимость обращения с ОЯТ составляет ~ 1374 \$/кг только капитальных затрат, не считая транспортных и эксплуатационных.

Стоимость загрузки топлива на три года ВВЭР-1000 ~ 94 млн. долларов или ~ 1175 \$/кг.

Таким образом, **в рамках открытого цикла** сегодня **обращение с ОЯТ** получается значительно **дороже свежего топлива**.

Б). «Полуоткрытый» цикл – радиохимическая переработка и длительная выдержка в хранилищах.

*При сегодняшних технологиях в процессе переработки **1 т ОЯТ (~ 0,1 м³)** образуется ~ **45 м³** жидких высокоактивных радиоактивных отходов (РАО), ~ **150 м³** среднеактивных и ~ **2000 м³** низкоактивных [1].*

В). Замкнутый цикл (пока не реализованный) - радиохимическая переработка и выделение урана и плутония (для дальнейшего использования в качестве топлива реакторов), а также выделение минорных актинидов (нептуний, америций, кюрий), которые, как пред-

полагается, будут в дальнейшем «пережигаться» в классических электроядерных (в международной терминологии – Accelerator Driven Systems – ADS) системах. Осколки деления планируется отправлять на длительную выдержку в хранилищах.

В замкнутом ядерном топливном цикле ожидается образование ежегодно в результате переработки до 25 м³/ГВт высокоактивных отходов, 50-100 м³/ГВт среднеактивных и до 700 м³/ГВт низкоактивных отходов [2].

Таким образом, современные и даже перспективные радиохимические технологии приводят к образованию значительных объемов долгоживущих радиоактивных отходов.

Проблема эффективной утилизации отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) стала в последние годы ключевой при обсуждении будущего глобальной энергетики. Ведущие мировые державы начали серьезно рассматривать использование электроядерных систем в качестве альтернативного и перспективного метода решения этой проблемы. На это, в частности, указывает начало практической реализации масштабного европейского проекта MYRRHA, а также активная работа по формированию и разработке соответствующих национальных программ в США, Китае, Индии, Японии и Южной Корее.

Необходимо отметить, что все программы и проекты сосредоточены на **классической электроядерной (ADS) схеме**, которая представляет собой, по сути, подкритический быстрый реактор с внешним (электроядерным) источником нейтронов.

Внешним источником нейтронов является свинцовая или свинцово-висмутовая нейтронопроизводящая мишень ограниченного размера (как правило, в расчетах и экспериментах рассматриваются мишени Ø20×60 см), размещаемая в центре подкритической активной зоны, в которую поступает узкий протонный пучок с энергией ~ 1 ГэВ из ускорителя. Стартовая **подкритичность** активной зоны находится в диапазоне $k_{эфф} \sim 0,97 \div 0,98$ и обеспечивается «запальным» ураном-235 с **обогащением ~ 20%**. Предусматривается также наличие значительно (в разы) запаса по току ускорителя для компенсации выгорания ядерного горючего [3].

В результате спектр нейтронов в активной зоне ADS-установок формируется, также как и в обычном реакторе, в основном нейтронами спектра деления.

Таким образом, фактически классическая электроядерная схема - ADS – это реализация той же цепной реакции деления – первого, хорошо известного и освоенного в промышленном масштабе, - способа производства нейтронов, дарованного нам самой природой.

Электроядерный же способ производства нейтронов, в схеме ADS дает вклад в их (нейтронов) производство всего ~ нескольких процентов. При этом экспериментально установлено, что полная энергетическая **цена электроядерного нейтрона** (без учета КПД ускорителя и КПД преобразования тепла в электричество) в этой схеме (ADS), - составляет ~ **42 МэВ**.

Такая величина энергетической цены электроядерного нейтрона, в сочетании, естественно, с работой ADS на все том же, делительном, спектре нейтронов, а также комплекс серьезных физико-технических проблем при попытках ее реализации (подробнее см. [4] стр. 10-23), - вызывают вполне обоснованные сомнения представителей реакторного сообщества в перспективности этой схемы, даже на концептуальном уровне ее рассмотрения.

2. Запасов основного топлива современной атомной энергетики - ²³⁵U - в энергетическом эквиваленте **не больше чем нефти и газа**. Большие запасы ²³⁸U и тория могут, в принципе, обеспечить будущее энергетики на тысячи лет.

Однако, в существующих и даже в **перспективных, в т.ч. быстрых реакторах, включая классические электроядерные системы (ADS), - они «горят» не напрямую, в силу высокого порога деления (~ 1÷2 МэВ), а через образование и репроцессинг** (полномасштабную радиохимическую переработку) промежуточных ядер ²³⁹Pu и ²³³U.

Анализ различных направлений развития ядерной энергетики [4], показывает **принципиальную ограниченность возможностей** традиционных реакторных и классических электроядерных (ADS) систем, основанных на использовании нейтронов спектра деления, - в решении 2-х главных обозначенных выше проблем атомной энергетики.

В делительном нейтронном спектре пороговые **минорные** актиниды, также как ^{238}U и, **тем более**, торий, - «горят» малоэффективно ввиду высокого порога деления ($\sim 1\div 2$ МэВ).

Трансмутация же долгоживущих радиоактивных осколков деления из состава ОЯТ на основе реакции радиационного захвата (n,γ) - **не замыкается** как физически (за счет многошаговых реакций, которые приводят к появлению новых долгоживущих радиоактивных изотопов), так и экономически.

Проект «ЯРТ-ОЯТ» нацелен на разработку **новой**, «мичуринской» **стратегии развития** ядерной энергетики.

Проект «ЯРТ-ОЯТ» основан на реализации принципиально иной, новой схемы электроядерного способа производства нейтронов, базирующейся на ядерных релятивистских технологиях (ЯРТ), предложенной специалистами ЦФТИ «Атомэнергомаш».

Схема ЯРТ нацелена на **формирование** пучками релятивистских частиц **максимально жесткого** (простирающегося далеко за границы делительного) **нейтронного спектра** внутри глубоко подкритичной, квазибесконечной (обеспечивающей минимальную ($< 5\%$) утечку нейтронов) активной зоны (АЗ), выполненной на основе природного (обедненного) урана, тория, а также на основе ОЯТ. Для реализации этой цели в схеме ЯРТ, в частности, предусматривается повышение энергии пучка релятивистских частиц с традиционной для классических электроядерных систем энергии ~ 1 ГэВ до уровня ~ 10 ГэВ.

Основные физико-технические принципы схемы ЯРТ

1. *Использование глубоко подкритичной, квазибесконечной (обеспечивающей минимальную ($< 5\%$) утечку нейтронов) активной зоны (АЗ) из природного (обедненного) урана, тория, а также из ОЯТ.*
2. *Повышение энергии иницирующего пучка до ~ 10 ГэВ вместо ~ 1 ГэВ в традиционных электроядерных схемах.*
3. *Использование в качестве нейтронопроизводящей мишени материала АЗ.*
4. *Использование сканирующего (расходящегося) пучка для снижения на несколько порядков плотности энерговыделения в центральной области АЗ, служащей нейтронопроизводящей мишенью.*
5. *Реализация технологии компактного модульного трехмерного линейного ускорителя на теплых ускоряющих структурах с аномальной дисперсией (УЛОВ) для значительного повышения его полного кпд («от розетки»).*
6. *Применение для загрузки АЗ шаровых капсулированных тепловыделяющих элементов, изготовленных на основе микротвэльной технологии, или жидких солей.*
7. *Использование технологии высокотемпературного гелиевого теплоносителя 1-го контура.*

2. Ядерно-физические предпосылки схемы ЯРТ

Ключевыми ядерно-физическими принципами схемы ЯРТ являются три:

1) глубоко подкритичная АЗ, что и определяет выбор основного материала АЗ: природный (обедненный) уран, торий, а также ОЯТ (*Г.И. Марчуком еще в 1958 г. было показано[5], 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 нейтронов*);

2) квазибесконечная АЗ;

3) повышение энергии первичного пучка до уровня ~ 10 ГэВ, вместо ~ 1 ГэВ в традиционных (ADS) схемах.

Все остальные принципы схемы нацелены на практическую реализацию основной задачи.

Почему мы стремимся к максимально жесткому нейтронному спектру?

Дело в том, что в диапазоне энергий делительного спектра нейтронов работают всего две основные неупругие реакции:

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

Причем эти две реакции работают как бы независимо друг от друга, т.е. не являются конкурирующими в силу соотношения сечений этих процессов и концентрации соответствующих ядер в традиционных реакторах. Это относится как к тепловым, так и к быстрым реакторам.

(Отмечу в скобках, что учет реакций $(n, 2n)$ и $(n, 3n)$ необходим для точного определения баланса нейтронов в традиционных реакторах, работающих на тонкой грани $k_{эфф} = 1$. В силу крайне малого количества в делительном спектре нейтронов с энергией выше $\approx 6,5$ МэВ (практический порог реакции $(n, 2n)$ в уране), влиянием этих реакций на состав осколков деления и актинидов в АЗ обычных реакторов, - можно пренебречь).

Мы рассчитываем, что значительное ужесточение нейтронного спектра в схеме ЯРТ, - позволит полностью задействовать, в дополнение к 2-м традиционным неупругим реакциям, - комплекс многоступенчатых каскадных реакций и пороговых реакций типа (n, xn) , а также высокоэнергетичное деление.

Это позволит, в частности, эффективно «сжигать» пороговые минорные актиниды.

А осколки деления, как из состава ОЯТ, так и вновь нарабатываемые в процессе работы ЯРТ-реактора, вместо паразитного поглощения нейтронов (как это происходит в традиционных реакторах) на реакции (n, γ) , - в таком спектре будут эффективно работать на их (нейтронов) производство.

Ставка в схеме ЯРТ делается на полную утилизацию энергии первичной релятивистской частицы **в квазибесконечной мишени - АЗ**, и ее (энергии первичной частицы) максимальную конвертацию в производство электроядерных нейтронов.

Впервые идея выхода за границы делительного спектра нейтронов для решения проблем атомной энергетики, и использования для этого протонов с энергией ~ 10 ГэВ, - была предложена и стала активно продвигаться в конце 90-х - начале 2000-х г.г. - И.Н. Острцовым, в те годы зам. директора по науке ВНИИ атомного энергетического машиностроения (ВНИИАМ).

Эта идея вызвала серьезные возражения научной общественности, которые заключались в следующих утверждениях.

1. Невозможность получить энергетической эффективности такой системы без обогащения легкоделяющимися материалами.

2. Оптимальной энергией протона для электрояда является 1-1,5 ГэВ: поскольку выход нейтронов монотонно возрастает с энергией протона, а удельные тормозные потери убывают вплоть до области 1 - 1,5 ГэВ, - то энергетическая стоимость свободного нейтрона будет минимальна именно в этом диапазоне энергий.

Первое утверждение обосновывалось расчетами на основе современных транспортных кодов, которые показывают, что коэффициент усиления мощности ($K_{ум}$) в квазибесконечных мишенях из обедненного и природного урана массой $\sim 20-30$ т не превышает 4,0 при энергиях пучка в диапазоне 1-10 ГэВ. А для того, **чтобы система работала на самообеспечении энергией**, необходимо иметь $K_{ум} \sim 7,0$ при полном («от розетки») **кпд ускорителя $\sim 30\%$ и кпд преобразования тепла в электричество $\sim 50\%$** .

Второе утверждение обосновывалось экспериментальными и расчетными результатами по выходу нейтронов, полученными на ограниченной «классической» электроядерной свинцовой мишени $\varnothing 20 \times 60$ см.

В основу ядерно-физического обоснования схемы ЯРТ [6, 7] легли результаты ряда основополагающих фундаментальных работ, выполненных за последние 50 лет в ОИЯИ (Дубна).

Это, в первую очередь, кратко описанные ниже 3 уникальных комплекса экспериментальных и расчетно-теоретических работ.

1) В уникальном комплексе экспериментов, выполненных в середине 1960-х годов в ЛЯП ОИЯИ группой Р.Г. Василькова - В.И. Гольданского - Ю.Н. Покотиловского [8] на мишенях из обедненного и природного урана эквивалентной массой $\sim 6,0$ т, при энергии протонного пучка 660 МэВ, - было получено, что коэффициент усиления мощности пучка ($K_{УМ}$) составляет $\sim 6,0$ на обедненном уране и $\sim 7,4$ - на природном. Экстраполяция этих величин к квазибесконечным мишеням массой ~ 20 т позволяет ожидать этих величин на уровне $\sim 7,3$ на обедненном уране и $\sim 9,0$ - на природном, соответственно. И это при энергии 660 МэВ, где весьма значительны ионизационные потери первичного протона.

Отметим, что до сегодняшнего дня никому из расчетчиков не удалось воспроизвести эти результаты. И это при энергии протонов всего 660 МэВ, где еще не существенны процессы мезообразования и фрагментации, описание которой в моделях, применяемых в современных транспортных кодах, не имеет ни малейшего физического смысла.

2) Обычно в экспериментах и расчетах исследуются мишени с постоянным составом. Однако при работе сильноточной системы, каковой и является электроядерный реактор, - картина будет совсем иная.

Группа В.С. Барашенкова в ЛИТ ОИЯИ в 1990-2000-х годах наиболее корректно провела комплекс расчетно-теоретических исследований по учету динамики наработки ^{239}Pu и ^{233}U в квазибесконечных делящихся мишенях из природного урана и тория соответственно для энергии протонов 1 ГэВ [9÷11]. Результаты этих расчетных оценок показали, в частности, что скорость наработки легкоделящихся изотопов, наибольшая при их концентрациях $\leq 1,5\%$, далее быстро снижается и **на уровне концентрации $\sim 6\%$ достигается равновесие** наработки и деления. В результате **система из эффективного наработчика плутония (^{233}U) превращается в реактор**, по сути «сжигающий» ^{238}U (^{232}Th). При выходе на равновесную концентрацию плутония в АЗ, коэффициент усиления мощности пучка, согласно оценкам этой и других групп, возрастет от 6 до 20 раз.

Результаты первых двух комплексов работ убедительно показывают некорректность утверждений о низком $K_{УМ}$ в схеме ЯРТ, и, по сути, непринципиальность его «стартовой» величины.

3) В уникальных экспериментах 1980-90-х годов в ЛВЭ ОИЯИ группой В.И. Юревича – Р.М. Яковлева [12] впервые были изучены не только выходы, но и энергетические характеристики нейтронного излучения из «классической» электроядерной свинцовой мишени $\text{Ø}20 \times 60$ см при облучении ее протонами и дейтронами в диапазоне энергий от ~ 1 до $\sim 3,7$ ГэВ. В частности был определен выход высокоэнергетичной компоненты нейтронного излучения с энергией выше 20 МэВ.

В исследованном диапазоне энергий получено, что с ростом энергии пучка наблюдается значительный рост: средней энергии нейтронов утечки ($\langle E \rangle$, МэВ); кинетической энергии нейтронов утечки (E_{kin} , МэВ) и доли энергии первичного протона, идущей в кинетическую энергию нейтронов утечки ($E_{\text{kin}}/E_{\text{beam}}$, %).

Этот рост, так же как и увеличение множественности нейтронов утечки, - указывают на перспективу существенного (опережающего рост энергии пучка) размножения этих реакционно-способных нейтронов, с ростом энергии пучка в мишени большего размера. И, соответственно, на перспективу роста коэффициента усиления с ростом энергии пучка.

Отметим, что при анализе результатов этих экспериментов, авторы отнесли влияние заряженных π -мезонов на энергобаланс к потерям для нейтронообразования, что, по-видимому, связано с ограниченными размерами исследовавшейся мишени ($\text{Ø}20 \times 60$ см). Однако, поскольку при энергии ~ 1 ГэВ количество испускаемых в каскаде заряженных π -мезонов еще весьма

мало, то величина доли энергии первичного протона, идущей в нейтронообразование (W / E_p), полученная для энергии 1 ГэВ (~ 38%), представляется достаточно близкой к истине.

Консервативная оценка этой величины для $E_p = 10$ ГэВ, выполненная с учетом влияния мезонообразования (но без учета влияния фрагментации) в квазибесконечной мишени, - позволяет ожидать ее значения на уровне ~ 66% [4].

Анализ результатов этих экспериментов в частности показывает, что в исследованном диапазоне энергий инициирующего пучка – **более 80% кинетической энергии нейтронного излучения приходится на нейтроны с энергией выше 20 МэВ.**

Результаты экспериментов [12] поставили под серьезное сомнение достоверность общепринятой точки зрения об оптимальной энергии протона для реализации электроряда на уровне 1-1,5 ГэВ, а по сути - ее опровергли.

Консервативные оценки ожидаемых «стартового» и «равновесного» коэффициентов K_{UM} усиления мощности протонного пучка в квазибесконечной мишени из природного урана в зависимости от энергии E_p падающих частиц, выполненные с учетом результатов вышеприведенных работ показывают, что при энергии протонов ~ 10 ГэВ можно ожидать их величин на уровне ~ 20 и ~ 120÷400 соответственно [6].

3. Ядерно-физические основы схемы ЯРТ

Анализ многочисленных экспериментальных работ (см. например, [13÷16]) показывает, что при энергиях выше ~ 2 ГэВ, доминирующими процессами при первичном взаимодействии протона с ядром являются процессы эмиссии ливневых частиц, фрагментации и мезонообразования (рис. 1).

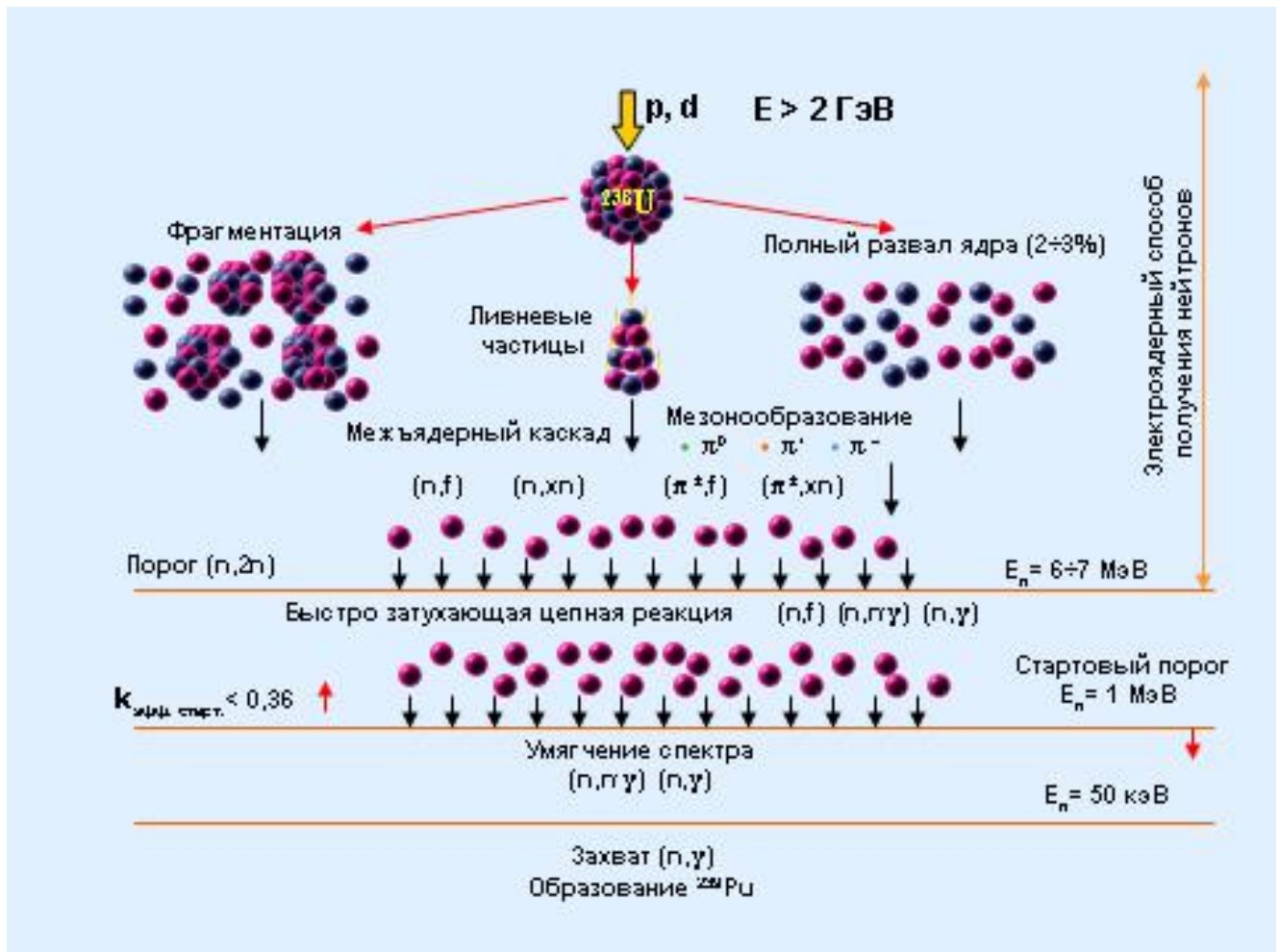


Рис. 1.

(При этом, чем выше энергия (до уровня $\sim 10-15$ ГэВ), тем меньше доля ионизационных потерь первичной частицы на пути ее пробега до неупругого взаимодействия с ядрами мишени. Соответственно, с ростом энергии релятивистская частица вступает в неупругое взаимодействие, потеряв значительно меньшую долю своей энергии из-за ионизационных потерь ($\sim 23\%$ при энергии 1 ГэВ и менее 3% при энергии 10 ГэВ). Иными словами, трансформация ее энергии в множественность каскадных частиц и их энергию в результате неупругого соударения с ядрами мишени - произойдет существенно более эффективно при большей энергии. А именно, с ростом энергии первичной частицы возрастает доля ее энергии, идущей на нейтронообразование [7]).

Очевидно, что **ливневые частицы** (высокоэнергетичные нейтроны, протоны и π -мезоны), уносящие значительную долю энергии первичной частицы и распространяющиеся в конусе с углом $< 30^\circ$, который на сегодняшний день пока остался вне детального экспериментального изучения, - ответственны за эмиссию нейтронов в результате взаимодействия с ядрами толстой мишени.

Экспериментально установлено, что эмиссия заряженных частиц (а, соответственно, и эмиссия нейтронов) **в событиях с фрагментацией** почти в два раза превышает эмиссию частиц в событиях без фрагментации. А в $2\div 3\%$ случаев при этих энергиях (выше $\sim 2\div 3$ ГэВ) вообще наблюдается полный развал ядра на отдельные нуклоны [17].

Отметим, что фрагментация тяжелых ядер, также как и деление, происходит с выделением энергии. Т.е., ядро как бы само «оплачивает» свой распад.

Важным процессом, связанным с генерацией нейтронов в межъядерном каскаде **в квазибесконечной мишени** с ростом энергии пучка, **является** также **мезонообразование**, в котором $\sim 2/3$ составляют заряженные π -мезоны.

Для баланса энергии нейтронов утечки из толстой мишени, конвертация даже одного заряженного π -мезона (масса покоя ~ 140 МэВ) в нейтронное излучение - это значительная величина.

Для сравнения: в толстой свинцовой мишени $\varnothing 20$ см, длиной 60 см при энергии пучка ~ 2 ГэВ – величина энергии первичной частицы, идущая на образование нейтронов, составляет ~ 800 МэВ [12].

Дальнейший процесс трансформации энергии первичной частицы в формирование нейтронного поля (после первого акта взаимодействия) зависит от размеров и свойств размножающей среды.

В квазибесконечной АЗ ЯРТ-реактора, выполненной на основе актинидных ядер, по нашим представлениям, этот процесс будет развиваться примерно следующим образом.

Продукты взаимодействия первичного протона или дейтрона с ядром (в первую очередь, нейтроны, а также заряженные π -мезоны и протоны), в последующих поколениях межъядерных каскадов, и в процессах, протекающих через образование составного ядра (высоко- и относительно низкоэнергетичное деление, а также реакции типа (n, xn)), сопровождающихся умягчением нейтронного спектра, - будут «работать» на генерацию, т.е. размножение нейтронов в объеме квазибесконечной АЗ.

(Известно, что в каскадных процессах при энергиях частиц ниже 400 МэВ доминирует эмиссия нейтронов. Например, при энергии нейтрона ~ 200 МэВ из тяжелого ядра вылетает ~ 2 нейтрона и $\sim 0,1$ протона [13]).

Принято считать, что граница между каскадными («быстрыми») процессами и процессами, протекающими через образование составного ядра («медленными»), - проходит в районе энергии ~ 50 МэВ, при которой примерно половина процессов идет через каскадный механизм, а половина – через механизм образования составного ядра. Эта граница зависит от массы ядра, и в случае тяжелых ядер считается, что она расположена в районе ~ 80 МэВ.

Отметим, что в реакциях, протекающих через образование составного ядра, также доминируют процессы эмиссии нейтронов: деление и реакции типа (n, xn) .

Так при энергии нейтрона на уровне 14 МэВ сечение деления урана-238 составляет ~ 1,2 барна, сумма сечений реакций $(n,2n)$ и $(n,3n)$ составляет ~ 1,6 барна, а сечения реакций (n,p) и (n,α) в сумме составляют ~ 3 мбарн [18].

При этом для оценок, в первом приближении можно считать, что спектр нейтронов, эмитируемых в реакциях (n,xn) , примерно такой же, как и делительный, со средней энергией ~ 2 МэВ.

«Электроядерный» процесс размножения нейтронов, сопровождаемый их умягчением, будет продолжаться до тех пор, пока энергия основной массы нейтронов не опустится **ниже порога реакции $(n,2n)$** в уране, т.е. ~ 6-7 МэВ (рис. 1).

Далее процесс размножения нейтронов пойдет в рамках **быстро затухающей цепной реакции** деления в силу реакции неупругого рассеяния $(n,n'\gamma)$, сечение которой в уране-238 в диапазоне энергий нейтронов ниже порога реакции $(n,2n)$, т.е. ниже ~ 6-7 МэВ, - значительно превосходит сечение деления.

Именно реакция неупругого рассеяния $(n,n'\gamma)$, определяет коэффициент размножения нейтронов в бесконечной среде из природного урана в делительном спектре на уровне ~ 0,36.

Нейтроны, ушедшие под порог деления урана-238, продолжают «умягчаться», в первую очередь, за счет реакции неупругого рассеяния $(n,n'\gamma)$, до энергии ~ 50 кэВ, где практически затухает реакция $(n,n'\gamma)$ и далее будут поглощаться в основном ураном-238, нарабатывая плутоний.

По мере наработки значимых количеств ядер плутония в сильноточной системе, все большее количество нейтронов, уходящих под порог деления урана-238, будет дополнительно делить плутоний, увеличивая, таким образом, коэффициент размножения нейтронов делительного спектра в системе, а также количество делений и, соответственно, коэффициент усиления мощности пучка, о котором чуть ниже.

В конкуренции между наработкой и делением, количество плутония выйдет на равновесную концентрацию, которая, по оценкам группы В.С. Барашенкова для квазibesконечной мишени из природного урана массой ~ 20 т при энергии пучка 1 ГэВ, будет составлять ~ 6% в «сверхбыстрой» АЗ ЯРТ-реактора. Коэффициент усиления мощности пучка при выходе на равновесную концентрацию, по оценкам той же группы возрастет в ~ 6-12 раз [9÷11].

Оценки группы авторов по коду **SHIELD** [19], выполненные: **для мишени массой ~ 30 т** из обедненного урана; и для мишени такой же массы из урана с обогащением 6%, но содержащей в своем составе центральную «классическую» свинцовую мишень, - дают увеличение коэффициента усиления в мишени с обогащением 6% по ^{235}U в ~ 10 раз.

С учетом того, что центральный свинцовый сердечник уменьшает выход нейтронов и, соответственно, количество делений в ~ 2 раза [8], можно ожидать, исходя из этих оценок, увеличения коэффициента усиления на равновесной концентрации плутония в ~ 20 раз.

Оценки группы В.С. Барашенкова показывают, что при выходе на равновесную концентрацию плутония, спектр нейтронов в такой системе в жесткой его части практически не претерпит изменений [9, 10]. Это, в целом, вполне понятно, поскольку обогащение в быстром реакторе составляет (для свинцового теплоносителя) ~ 14% [20].

Т.е. можно ожидать, что при выходе на стационарный режим равновесной концентрации, - активная зона ЯРТ-реактора останется глубоко подкритичной.

По сути, она останется «пороговой», просто интегральный, или, возможно корректнее, средневзвешенный порог деления в АЗ снизится с ~ 1 МэВ (для урана-238) до, скажем, ~ 100 кэВ.

Таким образом, **схема ЯРТ**, по сути, **есть целенаправленная реализация 2-го промышленного способа производства нейтронов – электроядерного**, т.е. получения нейтронов за счет взаимодействия пучков высокоэнергетических частиц с веществом.

Именно поэтому, мы иногда называем ее «истинным электроядером».

Исходя из вышеизложенного, **электроядерными нейтронами** в схеме ЯРТ, т.е. в квази-бесконечной, глубоко подкритичной АЗ, - **являются нейтроны, порожденные** (после прохождения комплекса каскадных процессов) **в результате реакций деления и (n,xn) при энергии нейтронов выше порога реакции (n,2n),** составляющего для урана ~ 6,5 МэВ.

Консервативные оценки показывают, что в схеме ЯРТ можно ожидать величины полной энергетической цены электроядерного нейтрона (без учета кпд ускорителя и кпд преобразования тепла в электричество) на уровне ~ 6÷7 МэВ, в отличие от ~ 42 МэВ в классической электроядерной схеме - ADS. (Отметим, что речь идет о цене именно электроядерного нейтрона, поскольку учет быстро затухающей цепной реакции в глубоко подкритичной квазибесконечной системе даже из чистого урана-238, - уменьшит эту величину еще примерно в 2 раза).

4. Некоторые ожидаемые преимущества реализации схемы ЯРТ

1. Прямое «сжигание» для производства энергии базового материала активной зоны – 238-урана или тория, - **без использования урана-235.**

2. Возможность эффективной утилизации ОТВС, при **кардинальном снижении объемов** их сложной радиохимической переработки.

(Отделению и радиохимической переработке будут подвергаться только газообразные продукты, образующиеся в ТВС в процессе работы и хранения).

3. Возможность работы в маневренном режиме.

4. В обычном реакторе накопившиеся осколки деления «паразитируют», поглощая значительную часть нейтронного потока, необходимого для поддержания работоспособности реактора (цепной реакции). Именно поэтому, в первую очередь, каждые три года извлекаются ОТВС и загружаются свежие. И их количество непрерывно копится в течение всего активного времени жизни реактора (~ 60 лет с учетом продления ресурса).

А в ЯРТ-реакторе эти осколки, так же как и все остальные компоненты ОТВС, содержащих ОЯТ, – «работают» на производство высокоэнергетичных нейтронов и, в конечном итоге, на получение ядерной энергии. Причем работают в течение всего времени жизни реактора, т.е. непрерывно находятся под воздействием жесткого нейтронного поля, и не 3 года, а, как минимум 60. Естественно, при периодической рефабрикации (т.е. восстановлении формы и покрытий) шаровых капсул - микротвэлов. Отметим, что как было указано выше, в рамках Проекта «ЯРТ-ОЯТ» отдельно планируется детальная проработка комплекса вопросов использования жидкосолевой загрузки АЗ в интересах проекта.

Исходя из анализа имеющихся экспериментальных данных и расчетно-теоретических оценок, предполагается, что ЯРТ-реактор будет работать следующим образом.

При загрузке АЗ шаровым капсулированным топливом, выполненным на основе природного урана или ОЯТ РБМК (содержат ~ 0,7% легкоделящихся изотопов), - на старте работы ЯРТ-реактора можно ожидать коэффициент усиления мощности релятивистского пучка ($K_{ум}$) ~ 20 при его энергии ~ 10 ГэВ. (Для того чтобы ЯРТ-реактор работал в режиме самообеспечения энергией, необходим минимальный коэффициент усиления мощности около 7,0 при полном («от розетки») кпд ускорителя ~ 30% и кпд преобразования тепла в электричество ~ 50%).

При работе сильноточной квазибесконечной системы на основе природного (обедненного) урана, тория или ОЯТ, каковой и является ЯРТ-реактор, уже в течение первых недель его работы в АЗ будет накапливаться большое количество ядер ^{239}Pu (^{233}U в случае ториевой АЗ), деление которых значительно увеличивает поток нейтронов. Это, в свою очередь, вначале увеличивает, а затем, благодаря слишком большому числу делений, - снижает выход плутония, и **система из эффективного наработчика плутония (^{233}U) превращается в реактор, по сути «сжигающий» ^{238}U (^{232}Th).**

При концентрации плутония ~ 6%, согласно оценкам группы В.С. Барашенкова (ОИЯИ), выполненным для энергии протонов 1 ГэВ, - наступит равновесие между наработкой и делением. При выходе на равновесную концентрацию плутония в АЗ, коэффициент усиления мощности пучка, согласно оценкам этой и других групп, возрастет от 6 до 20 раз. Таким образом можно ожидать, что при выходе на равновесную концентрацию плутония в АЗ, т.е. на стационарный режим работы, - $K_{ум}$ ЯРТ-реактора составит от 120 до 400.

Длительность «стартового», т.е. пускового, режима по оценкам составит ~ 1÷2 года.

При загрузке АЗ топливом, выполненным на основе ОЯТ реакторов ВВЭР-1000 (содержит ~ 2,0% легкоделящихся изотопов), - длительность пускового режима значительно сократится, а стартовый $K_{ум}$ – существенно возрастет. В принципе, после проведения соответствующих работ, будет возможно подмешать в топливную шихту высокообогащенный ОЯТ транспортных и/или быстрых реакторов, что позволит сформировать стартовую загрузку АЗ сразу с равновесной концентрацией легкоделящихся изотопов, что будет весьма полезным для энергосистемы.

Т.е. **ОЯТ** оказывается **наиболее экономически эффективным топливом в рамках этой схемы.**

Таким образом, **ЯРТ-реактор** будет постоянно работать в **глубоко подкритическом режиме, на загрузке из ОЯТ, обедненного (отвального) урана или тория, - непрерывно воспроизводя** легкоделящиеся элементы топливной композиции (^{239}Pu или ^{233}U в случае ториевой АЗ), необходимые для поддержания его высокой энергоэффективности в течение многих десятков лет, **не потребляя** при этом уран-235.

На основе схемы ЯРТ **возможно кардинально сменить парадигму отношения к ОЯТ**, а также **экологически чисто решить проблему топливного обеспечения ядерной энергетики.**

Т.е. **ОЯТ** из серьезнейшей проблемы атомной отрасли может стать **высокоэффективным, практически готовым топливом** для множества **блоков ядерных релятивистских электростанций (ЯРЭС).**

Оценки показывают, что при загрузке в активную зону ЯРТ-реактора ~ 200 т шаровых капсул, изготовленных из тонкомолотых материалов ОТВС на основе микротвэльной технологии, - ЯРТ-реактор чисто физически (естественно, при периодической циркуляции и рефабрикации топливных капсул) сможет вырабатывать на одной такой загрузке ~ 2000-3000 МВт электричества в течение ~ 60 лет. Жизненный цикл ЯРТ-реактора после этих ~ 60 лет завершится режимом глубокой переработки, продолжительностью ~ 1-2 года, сопровождаемым затухающим производством электроэнергии в сочетании со значительным ужесточением нейтронного спектра. В результате в активной зоне наиболее вероятно останутся, в основном, короткоживущие, легкие нейтронно-дефицитные изотопы [4].

Один блок ВВЭР-1000, выводимый из эксплуатации после 60 лет работы, может обеспечить топливом (ОЯТ) - 8 блоков ЯРЭС-2500 на 60 лет работы каждого из них.

5. Предпосылки, суть и ожидаемые результаты Проекта «ЯРТ –ОЯТ»

В 2009÷13 г.г. на пучках Нуклотрона ЛФВЭ ОИЯИ по инициативе ЦФТП «Атомэнергомаш», в т.ч. и в рамках проекта «Э и Т – РАО», выполнен комплекс уникальных экспериментов по облучению пучками релятивистских частиц массивной мишени из природного урана массой ~ 500 кг (установка «Квинта»), ограниченно моделирующей центральную область АЗ ЯРТ-реактора, - направленных на проверку ряда базовых ядерно-физических принципов схемы ЯРТ.

Эксперименты проводились при поддержке ЛФВЭ ОИЯИ, с привлечением ученых и специалистов ведущих лабораторий (ЛНФ, ЛФВЭ, ЛЯП, ЛИТ) и других ключевых подразделений ОИЯИ, а также при активном системном участии ученых из содружества государств: Радиово-

го института им. Хлопина, ГНЦ РФ ФЭИ им. Лейпунского, КЦЯТ НИЦ «Курчатовский институт», ИФ им. Степанова НАН Беларуси, ОИЭИЯИ – Сосны НАН Беларуси, ННЦ ХФТИ (Украина), ИЯФ НЯЦ РК (Казахстан). Всего в проекте участвуют представители 15 стран СНГ, Европы, Азии, Австралии. Наиболее активное участие, в т.ч. и в виде ограниченной финансовой поддержки, помимо ученых России, Беларуси, Казахстана и Украины, - принимают ученые Болгарии, Польши и Чехии.

Результаты этих экспериментов [21÷27] **убедительно указывают** на перспективность основных принципов схемы ЯРТ для эффективной утилизации ОЯТ и производства энергии.

В частности, при энергиях дейтронов в диапазоне от 1 ГэВ до 8 ГэВ (0,5÷4 ГэВ/нуклон) надежно установлено, что **с ростом энергии пучка** наблюдается **значительный рост средней энергии нейтронов утечки** и нейтронов, вызывающих деление в мишени, а также (при энергиях выше 4 ГэВ) **рост доли высокоэнергетичной (с $E_n > 20$ МэВ) компоненты нейтронов утечки**, т.е. происходит значительное ужесточение нейтронного спектра.

Эти результаты **указывают на перспективу существенного, опережающего** рост энергии, **размножения этих реакционно-способных нейтронов, с ростом энергии пучка в мишени большего размера**, и, соответственно, на перспективу роста коэффициента усиления с ростом энергии пучка в схеме ЯРТ. Результаты по ужесточению нейтронного спектра также **указывают на возможность** использования **в качестве топлива ЯРТ-реактора материалов ОТВС, содержащих ОЯТ**, при кардинальном снижении объемов их предварительной радиохимической переработки (переработка только газообразных продуктов, образующихся в ТВС).

Кроме того, полученные результаты показывают значительное **(в разы) занижение расчетных** (по сравнению с экспериментальными) **характеристик нейтронного спектра** в массивных мишенях, особенно **в высокоэнергетической его части**, определяющей развитие процессов в квазибесконечной системе. Это требует серьезной коррекции как ядерно-физических моделей, используемых в современных расчетных кодах, так и самих этих кодов.

Поэтому **только прямые эксперименты могут дать достоверную информацию** о достижимых **Кум** в квазибесконечных, глубоко подкритических электроядерных системах и перспективах их практической реализации, а также об оптимальных энергии и типе бомбардирующих частиц.

Полученные **результаты** являются **убедительными**, но всего лишь - **указаниями на перспективность** схемы ЯРТ.

Получить ее «стартовые» количественные **характеристиках** будет возможно только **в процессе проведения** комплекса экспериментов **на квазибесконечной урановой мишени**, полномасштабно моделирующей ядерно-физические процессы в АЗ ЯРТ-реактора в его «стартовом» состоянии.

В 2013 г. ПКК ОИЯИ по физике частиц утвердил продолжение этих работ в 2014÷2016 г.г. в рамках проекта «Энергия и трансмутация ОЯТ. Часть II. Квазибесконечная мишень» (Проект «Э и Т – ОЯТ»), подготовленного ЦФТП «Атомэнергомаш», ЛНФ, и ЛФВЭ ОИЯИ. Это решение было поддержано ПКК ОИЯИ по ядерной физике. Проект «Э и Т – ОЯТ» направлен на создание экспериментальной установки «Буран», на базе имеющейся в ОИЯИ и принадлежащей Курчатовскому институту квазибесконечной мишени из металлического обедненного урана массой ~ 21 т, позволяющей полномасштабно моделировать ядерно-физические процессы в АЗ ЯРТ-реактора в его «стартовом» состоянии.

Создание установки «Буран» требует принципиально иных, несопоставимых с уровнем предыдущего **Проекта «Э и Т – РАО»**, который **выполнялся в основном на энтузиазме участников**, - материальных и трудовых затрат, а также принципиально иного уровня организации и финансирования этих работ. По сути, речь идет о создании бенчмарка мирового класса. Без привлечения значительных внебюджетных (относительно бюджета ОИЯИ) источников финансирования - этот проект практически нереализуем. (По предварительным оценкам стоимость организации и проведения комплекса работ составит ~ 1,5÷2 млрд. руб.).

Достаточно сказать, что измерения параметров процессов необходимо провести (при энергиях протонов и дейтронов в диапазоне от $\sim 1\div 2$ ГэВ до $\sim 10\div 15$ ГэВ и различных конфигурациях центральной области мишени) в 200 точках мишени, что потребует более 2000 детекторных систем, каналов электроники и т.д.

Ситуация усугубляется тем, что предварительные расчетные оценки показывают, что на пучках Нуклотрона ОИЯИ невозможно реализовать решение основных задач экспериментов и получение полного комплекса необходимых ядерных данных, - ввиду крайне низкого тока ускорителя - $\leq 10^{10}$ частиц в цикле, и ограничений по энергии пучка. Это делает необходимым проведение экспериментальных работ с квазибесконечной мишенью из металлического обедненного урана массой ~ 21 т на базе ускорителя У-70 и инфраструктуры ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт» (Протвино), который может обеспечить $\sim 10^{12}\div 10^{13}$ частиц за импульс.

Кроме того, в рамках проекта «Э и Т – ОЯТ» невозможно получить ответы на большинство вопросов в целом ряде научно-технологических областей, определяющих реальную применимость схемы ЯРТ для крупномасштабной утилизации ОЯТ и производства энергии, в частности, в реакторной технологии, в проблемах топливного цикла, тепло- массообмена в активной зоне и динамики ее состава, в создании ускорителей мегаваттного класса.

Реальные же характеристики работы схемы ЯРТ, такие, в частности, как динамика выхода на равновесную концентрацию, динамика состава АЗ и утилизации компонентов ОЯТ, отработка всего необходимого комплекса технологий и т.д., - можно получить только в сильно-точной системе, каковой и является электроядерный реактор.

Фактически речь идет о создании, в конечном итоге, полномасштабной опытно-промышленной электроядерной энергоустановки, которая на старте при токе ускорителя ~ 1 мА и его энергии ~ 10 ГэВ может вырабатывать ~ 100 МВт электричества, а при выходе на равновесную концентрацию легкоделящихся изотопов в АЗ – от 600 до 2000 МВт.

Исходя из этого понимания, в 2011-13 г.г. **ЦФТП «Атомэнергомаш» в инициативном порядке**, при участии ученых и специалистов большинства лабораторий ОИЯИ и ведущих ядерных центров России, Беларуси, Казахстана и Украины, - были разработаны Концепция международного Проекта «ЯРТ-ОЯТ» и его физико-техническое обоснование, а также основные положения 1-й фазы проекта - комплексной Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ».

Именно в инициативном порядке, поскольку прорывные направления, в отличие от совершенствования существующих технологий, - требуют принципиально иных подходов к реализации. Прорывные направления ведут к серьезному перераспределению финансовых потоков и руководящего кадрового обеспечения, в силу чего сталкиваются как с пассивным, так и с весьма активным противодействием официального руководства науки и промышленности.

Этот Проект, основанный на **практической реализации схемы ЯРТ**, направлен на создание многоцелевого релятивистского электроядерного реактора «АЛЬБАТРОС» (*АЛЬтернативный Быстрый АТомный Релятивистский Опытно-промышленный реактор, создаваемый в рамках Содружества государств*). Он предназначен для отработки комплекса стратегических инновационных технологий, в первую очередь, в области утилизации ОЯТ и вовлечения запасов отвалного урана и тория в производство энергии.

Проект основан на максимальном использовании существующих технологий, а также на технологиях, для реализации которых имеются значительные научно-технические заделы. В качестве примеров можно привести: серьезные наработки НПО «Луч» в области микротвэльной технологии; разработки НПО «Радиевый институт им. Хлопина» по РЕМИКС-топливу и ЗСЖЦ в рамках проекта создания ОДЦ в Железногорске, а также опыт ОКБМ в области технологии высокотемпературного гелиевого теплоносителя.

Концепция Проекта «ЯРТ-ОЯТ» и ее физико-техническое обоснование рассмотрены и поддержаны ведущими научными организациями Беларуси, Казахстана, России и Украины, в частности, НПО «Радиевый институт им. В.Г. Хлопина», НИЦ «Курчатовский институт», Институтом физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, ННЦ «Харьковский физико-технический институт», Институтом ядерной физики НЯЦ Республики Казахстан.

Например, в заключении НИЦ «Курчатовский институт» от 02.04.2015 г. на концепцию проекта «ЯРТ-ОЯТ», подготовленном по запросу ГК «Росатом», в частности сказано: «Представленная ЗАО «ЦФТП «Атомэнергомаши» Концепция Проекта «ЯРТ-ОЯТ», на наш взгляд, является хорошей основой для разработки комплексной международной инновационной Программы прикладных исследований и разработок. Эта Программа может быть реализована как в рамках Комиссии государств-участников СНГ по использованию атомной энергии в мирных целях (Комиссия «Атом – СНГ»), или с более широким (Китай, Индия) международным участием, - так и исключительно на базе российских предприятий и организаций».

В рамках 1-й фазы проекта – комплексной Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ» - предполагается проведение работ по 21-му основному прикладному направлению, которые объединены в 4 блока работ, определяющих создание основ реализации комплекса стратегических инновационных технологий, таких, в частности, как:

- Ø создание стратегического кода для стран-участниц, на основе которого будет возможно проводить расчеты и лицензирование реальных электроядерных систем;
- Ø технологии сильноточных ускорителей легких ионов мегаваттного класса на теплых ускоряющих структурах с аномальной дисперсией в 3D-геометрии (УЛОВ) [28];
- Ø технологии релятивистского топливного цикла, включая комплекс вопросов микровзвальной технологии и технологий жидкосолевой АЗ;
- Ø технологии высокотемпературного гелиевого теплоносителя; -

что и определяет многоцелевой статус реактора «АЛЬБАТРОС».

Безусловно, полученные к настоящему времени результаты **убедительно указывают на перспективность** основных принципов схемы ЯРТ для утилизации ОЯТ и производства энергии из ОЯТ, отвалного урана и тория. Однако, **делать окончательные выводы**, тем более количественные, о конкретных энергетических приложениях схемы ЯРТ было бы **пока преждевременно**, как минимум до получения комплекса экспериментальных результатов ядерно-физического блока работ 1-й фазы проекта «ЯРТ-ОЯТ» в рамках бенч-марка мирового класса, который может быть создан только на базе ИФВЭ НИЦ «Курчатовский институт».

Важным аспектом и итогом реализации как Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ», так и Проекта в целом, станет широкое вовлечение в решение задач молодых ученых и специалистов. Это позволит обеспечить преемственность, а также формирование системы жизненных ценностей и целеполагания молодежи, адекватных задачам развития и процветания России.

Кроме того, в процессе реализации Программы будут созданы уникальные площадки мирового класса, на базе которых будут проходить подготовка и формирование научно-технических кадров высшей квалификации.

Опыт реализации Атомного и Ракетно-Космического Проектов в СССР убедительно показал, что именно при участии в решении масштабных задач - растут и системно формируются высоко профессиональные кадры, коллективы, Школы.

В процессе выполнения Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ» будет реализован комплекс системно увязанных, самодостаточных локальных инновационных проектов, каждый из которых сам по себе имеет важное научно-техническое и народно-хозяйственное значение.

6. Проблемы, риски и потенциальные конкуренты Проекта «ЯРТ-ОЯТ»

ГК «Росатом» всячески «заматывает» и блокирует продвижение этого инициативного прорывного проекта. Если раньше все возражения его представителей базировались на принципе: «Этого не может быть, потому что не может быть никогда», на основании чего повсеместно блокировались все попытки получить хотя бы небольшое финансирование на проверку основных принципов схемы ЯРТ, то сейчас, после кулуарных слов: «Это очень интересные результаты и перспективы» - следуют рассказы об известных финансовых проблемах.

А на официальном уровне ГК «Росатом», после почти двухлетних проволочек и игр в «молчанку», прислал высокомерное, недобросовестное, изобилующее ошибками и полностью искажающее суть Проекта «Экспертное заключение ...» на одной страничке, подписанное в т.ч. и авторами «кулуарных» слов, все содержание которого можно выразить одной фразой:

«Мы Проект не читали, но мы категорически не согласны с тем, что такие деньги могут пройти мимо нас, и мы сделаем всё, чтобы этого не произошло, в том числе и категорически осудив всех тех, кто смеет поддерживать этот Проект».

Главным риском как при реализации комплексной Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ», так и всего Проекта «ЯРТ-ОЯТ», - является затягивание времени с принятием решения о начале их реализации, и потеря, таким образом, имеющегося пока серьезного конкурентного преимущества России.

Тревожность ситуация усугубляется тем, что, с одной стороны, мы сегодня на ~ 2 года опережаем потенциальных конкурентов, которыми являются, в первую очередь, США (благо они, как и весь мир, идут пока путем классической, мало перспективной схемы электроядерного способа производства нейтронов – ADS).

Однако, с другой стороны, мы располагаем информацией, что в Фермилабе (FNAL, США) прорабатываются и продвигаются в DOE предложения по работам, аналогичным по физической сути блоку работ прикладных ядерно-физических исследований Программы НИОКР «ЯРТ-ОЯТ» (Препринт Fermilab-Conf-14-177-APC-TD). Причем предложения Фермилаба, по сути, инициированы нашими работами и результатами. А финансовые возможности, оперативность принятия решений в интересах национальной безопасности, да и ускорительная база, и детекторные возможности, - у них гораздо серьезнее, чем в России.

Кроме того, уходят естественным образом, в силу возраста, из жизни носители ключевых идей, знаний, умений, технологий, - усугубляется разрыв поколений, и теряются последние шансы на реализацию преемственности. Уходят Люди, распадаются школы, а с ними шансы на возрождение науки и техники. И потом никакими деньгами и заклинаниями об инновациях и модернизациях, а также надеждами, что вот придет талантливая молодежь, и все решит, - не решить многие сегодня еще решаемые задачи – потребуются десятилетия.

С учетом сложной финансово-экономической ситуации в России, и в тесно связанных с ней экономиках стран Евразийского Союза, - на сегодня нам представляется наиболее перспективным привлечение Китайской Народной Республики к работам и финансированию Проекта. Как нам представляется, это возможно было бы реализовать как на двухсторонней основе, так и в рамках Шанхайской организации сотрудничества.

Крайне важным здесь является тот факт, что **все ключевые** научно-технологические **наработки и инструменты**, а также **системные вопросы реализации Проекта**, - **находятся в руках российских специалистов и организаций**, что практически полностью исключает возможность утраты лидерства нашей страны в Проекте.

7. Объемы финансирования и сроки выполнения Проекта «ЯРТ-ОЯТ»

Ориентировочный (оптимистичный) срок формирования Программы «ЯРТ-ОЯТ» на основе Концепции, включая: детальную разработку и согласование планов и сметы работ; формирование организационной структуры; заключение соответствующих межгосударственных договоров; выполнение предварительных работ по наиболее подготовленным направлениям Программы и т.п., - составит ~ 1,5 года и потребует ориентировочных затрат (в зависимости от величины выделенных объемов финансирования предварительных работ по направлениям Программы) от ~ 40,0 до ~ 200,0 млн. руб.

При наличии адекватного финансирования и реализации организационных принципов, соответствующих масштабу проекта и сформулированных в Концепции, - Программу «ЯРТ-ОЯТ» можно реализовать за ~ 4÷5 лет.

Ориентировочный объем финансирования Программы «ЯРТ-ОЯТ» составляет ~ 14,0 млрд. руб., и будет уточнен в процессе разработки, формирования и согласования Программы на основе Концепции Проекта.

Стоимость создания многоцелевой релятивистской электроядерной установки «АЛЬБАТРОС» будет определена и обоснована в ТЭО по завершении 1-й фазы Проекта «ЯРТ-ОЯТ», а срок ее создания составит (с учетом планируемой параллельно – последовательной схемы реализации Проекта) по предварительным оценкам ~ 7÷8 лет.

Заключение

Выполнение проекта «ЯРТ-ОЯТ» обеспечит возможность разработки и реализации **принципиально новой стратегии развития** атомной энергетики, обеспечивающей **создание широкомасштабной** (т.е. замещающей) энергетику, основанную на сжигании **органического топлива) атомной энергетики.**

В результате реализации стратегического инновационного **Проекта «ЯРТ-ОЯТ»** - Россия и другие заинтересованные страны – участницы Проекта, - смогут **занять лидирующие позиции на мировом рынке** в области стратегических инновационных ядерно-физических технологий на многие десятилетия вперед.

Проект «ЯРТ-ОЯТ» по своей сути может стать **научно-техническим фундаментом Евразийского Союза и стран-членов ШОС.**

Успешная демонстрация применимости схемы ЯРТ для крупномасштабной утилизации ОЯТ и производства энергии (в результате выполнения Проекта «ЯРТ-ОЯТ»), позволит **создать ядерную энергетику доступную всем без исключения странам, сняв проблему нераспространения** на детерминистском уровне.

Совокупный потенциал мирового рынка составляет до ~ 10000 блоков мощностью 1 ГВт с учетом замещения органики.

Прорывной характер Проекта «ЯРТ-ОЯТ» требует принятия политического решения о его реализации и серьезного административного ресурса для его выполнения в кратчайшие сроки. Нами подготовлен для обсуждения комплекс предложений по организации финансирования и реализации Проекта.

ЗАО «Центр Физико-Технических Проектов «Атомэнергомаш»

(ЗАО «ЦФТП «Атомэнергомаш»)

Ген. директор – ген. конструктор – Чилап Валерий Викторович.

Контакты на сайте: www.cftp-aem.ru

Литература

1. <http://www.ieer.org/ensec/no-10/no10russ/russia.html>.
2. В.И. Рачков, А.В. Тюрин, В.И. Усанов, А.П. Вошинин. Эффективность ядерной энерготехнологии. Системные критерии и направления развития. ФГУП «ЦНИИАтоминформ», М., 2008.
3. Y. Kadi. Examples of ADS design II: The Energy Amplifier DEMO. ICTP, Trieste, Italy, 20 october 2005.
4. Проблемы создания широкомасштабной ядерной энергетики и ядерные релятивистские технологии (ЯРТ). <http://www.cftp-aem.ru/Data/RADS02.pdf>.
5. Г.И. Марчук. Численные методы расчетов ядерных реакторов. М., Атомиздат, 1958.
6. Балдин А.А. Белов Е.М., Галанин М.В. и др. Ядерные релятивистские технологии (ЯРТ) для производства энергии и утилизации отработанного ядерного топлива (ОЯТ). Результаты первых экспериментов по физическому обоснованию ЯРТ. Письма в ЭЧАЯ т.8, в.6, с. 1007-1023 (2011).

7. Чилап В.В. и др. Ядерная релятивистская энергетика - физико-технические основы и результаты первых экспериментов. Вестник НЯЦ РК, №4 (48), 2011, с. 68-76.
8. Р.Г. Васильков, В.И. Гольданский, Б.А. Пименов, Ю.Н. Покотиловский, Л.В. Чистяков. Размножение нейтронов в уране, бомбардируемом протонами с энергией 300-660 МэВ. «Атомная энергия», т. 44, вып. 4, 1978, с. 329.
9. В.С. Барашенков, А.Н. Соснин, С.Ю. Шмаков. Зависимость характеристик электроядерного бридинга от примеси ^{239}Pu и ^{235}U . Препринт ОИЯИ, P2-91-422, Дубна, 1991.
10. В.С. Барашенков, А.Н. Соснин, С.Ю. Шмаков. Временная зависимость характеристик электроядерной системы («эффект разгонки»). Препринт ОИЯИ, P2-92-125, Дубна, 1992.
11. В.С. Барашенков, А.Н. Соснин, С.Ю. Шмаков. Электроядерный бридинг в ториевых мишенях. Препринт ОИЯИ, P2-92-285, Дубна, 1992.
12. В.И. Юревич, Р.М. Яковлев, В.А. Николаев, В.Г. Ляпин, Н.С. Амелин. Исследование эмиссии нейтронов при взаимодействии релятивистских протонов и дейтонов со свинцовыми мишенями. Письма в ЭЧАЯ, 2006, т.3, с.49.
13. В.С. Барашенков, В.Д. Тонеев. Взаимодействия высокоэнергетических частиц и атомных ядер с ядрами. М., Атомиздат, 1972.
14. Н.А. Перфилов, О.В. Ложкин, В.И. Остроумов. Ядерные реакции под действием частиц высоких энергий. М., Изд-во Академии наук СССР, 1962.
15. Э. Хайд, И. Перлман, Г. Сиборг. Ядерные свойства тяжелых элементов. Вып. 5. Деление ядер. М., 1969.
16. А.И. Обухов. Деление ядер при взаимодействии с протонами и нейтронами промежуточных энергий. ЭЧАЯ, т. 32, вып.2, 2001.
17. К.Д. Толстов, Р.А. Хошмухамедов, Сообщения ОИЯИ, P1-6897, Дубна, 1973.
18. В.М. Горбачев, Ю.С. Замятнин, А.А. Лбов. Взаимодействие излучений с ядрами тяжелых элементов и деление ядер. Справочник. М., Атомиздат, 1976.
19. В.Ф. Батяев, М.А. Бутко, ..., Н.М. Соболевский и др. Анализ основных ядерно-физических особенностей взаимодействия протонных пучков с тяжелыми металлическими мишенями. Атомная энергия, т. 104, вып. 4, 2008.
20. А. Уолтер, А. Рейнольдс. Реакторы – размножители на быстрых нейтронах. Энергоатомиздат, М., 1986.
21. W. Furman et al, Recent results of the study of ADS with 500 kg natural uranium target assembly QUINTA irradiated by deuterons with energies from 1 to 8 GeV at JINR NUCLOTRON. PoS (Baldin ISHEPP XXI) 086, http://pos.sissa.it/archive/conferences/173/086/Baldin%20ISHEPP%20XXI_089.pdf.
22. W. Furman et al. («E&T – RAW» Collaboration) RESULTS OF EXPERIMENTS 2012-2013 WITH MASSIVE URANIUM TARGET SETUP QUINTA AT NUCLOTRON AND PLANS FOR 2014 -2016. Доклад на 21-м Международном семинаре по взаимодействию нейтронов с ядрами – ISINN-21, 20-25 мая 2013 г., Алушта, Украина. <http://www.cftp-aem.ru/Data/Furman%20report%20ISINN-21.pdf>.
23. W. Furman et al. («E&T – RAW» Collaboration) Study of neutron fields and nuclear reactions in massive natural uranium target irradiated by deuteron Nuclotron beams with energy (0.5 - 4) GeV/nucleon and perspectives for ADS with deep subcritical active core. Доклад на Международном симпозиуме «Ядерная физика: настоящее и будущее» 29 мая–05 июня 2013 г., Боппард, Германия. <http://www.cftp-aem.ru/Data/Furman%20report%20at%20Boppard-2013.pdf>.
24. W. Furman et al. («E&T – RAW» Collaboration) Research of accelerator-driven systems at JINR and their development prospects. Доклад на заседании Программно-Консультативного Комитета ОИЯИ по ядерной физике 20-21 июня 2013 г., Дубна, Россия. <http://www.cftp-aem.ru/Data/Furman%20PAC%20NP%2006%202013.pdf>.
25. 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.

26. Adam, J. Measurement of the High-Energy Neutron Flux on the Surface of the Natural Uranium Target Assembly QUINTA Irradiated by Deuterons of 4-and 8-GeV Energy [Препринты] /J.Adam, A.A.Baldin, V.Chilap, W.Furman, K.Katovsky, J.Khushvaktov, V.Kumar, V.Pronskikh, I.Mar'in, A.Solnyshkin, M.Suchopar, V.Tsoupko-Sitnikov, S.Tyutyunnikov, J.Vrzalova, V.Wagner, L.Zavorka. – Dubna: JINR, 2014 . – 18 p. :il. – (JINR; E3-2014-92).
27. J. Adam, A.A. Baldin, V.V. Chilap, W.Furman et al., Measurement of highenergy neutron flux on surface of natural uranium target assembly QUINTA irradiated by deuterons of 4 and 8 GeV., Physics Procedia 80 (2015) p. 94 – 97 DOI 10.1016/j.phpro.2015.11.101.
28. А.С. Богомолов, Т.С. Бакиров. Ионные ускорители для использования в индустрии. М.: Куна, 2012.