

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ КОНЦЕПЦИИ КАСКАДНЫХ РЕАКТОРОВ

В. Ф. Колесов, Н. В. Завьялов

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

Прослежена история развития концепции каскадных реакторов и разработки на ее основе проектов импульсных реакторных устройств с предельно короткой длительностью импульсов и blankets электроядерных установок с многократно сниженными требованиями к мощности ускорителя протонов. Показано, что значительный вклад в развитие концепции каскадных реакторов внесен сотрудниками ИЯРФ ВНИИЭФ.

Ключевые слова: каскадные реакторы, импульсные реакторные устройства, длительность импульса, электроядерные установки, blankets, ускоритель протонов.

EVOLUTION HISTORY OF CASCADE REACTORS CONCEPT // V. F. KOLESOV, N. V. ZAVYALOV // The history of cascade reactor concept evolution and the development on its base of pulsed reactor devices with ultimately short pulse duration and blankets of electronuclear facilities with multiply decreased requirements to proton accelerator power is traced back. It is demonstrated that considerable contribution to the development of cascade reactor concept is made by the specialists of INRP VNIIEF.

Key words: cascade reactor, pulsed reactor devise, pulse duration, electronuclear facility, blanket, proton accelwrtor.

Реактор можно называть связанным, если его активная зона (АЗ) состоит из двух частей, отличающихся составом, формой, геометрическими размерами или разделенных пространственно, а некоторая доля делений, хотя бы в одной части АЗ, вызывается нейтронами от делений в другой части. Устройства указанного типа иначе называют двухсекционными реакторами. Двухсекционные реакторы с односторонней или преимущественно односторонней нейтронной связью секций называют каскадными. Это тот случай, когда нейтроны одной секции влияют на цепную реакцию в другой секции, а нейтроны другой секции на цепную реакцию в первой не влияют.

Первое упоминание о реакторных системах каскадного типа содержится в работе 1957 г. [1]. Односторонность нейтронной связи секций в ней создавалась экраном из погло-

тителя нейтронов. Предполагалось, что этот принцип может быть использован в целях достижения более высокого выгорания топлива и получения высоких потоков тепловых нейтронов. Идея каскадных реакторов возродилась в ИЯРФ ВНИИЭФ в конце 1970-х гг. в связи с поиском конструкций реакторов с возможно более короткими импульсами n -, γ -излучений.

В разработку концепции каскадных реакторных систем значительный, во многом основополагающий вклад внесен сотрудниками ИЯРФ ВНИИЭФ. Участие ИЯРФ ВНИИЭФ в этих работах выразилось в следующем:

1. В выдвижении и теоретическом обосновании каскадных импульсных реакторов и бустеров, в частности, таких вариантов этих устройств, материалом одной из секций которых является нептуний-237 – порогово деля-

щееся вещество [2]. Как оказалось, использование в реакторе принципа каскадности открывает возможность десятикратного и более снижения длительности импульса. Это свойство каскадных реакторов очень важно, поскольку генерирование мощных импульсов n -, γ -излучений с требуемой для ряда опытов малой длительностью обычно сопряжено с огромными трудностями.

На основании указанной работы в ИЯРФ ВНИИЭФ был разработан проект бустера-реактора «Каскад» (БР-К), способного выдавать импульсы делений длительностью от 1 до 300 мкс при флюенсах нейтронов соответственно от $1 \cdot 10^{14}$ до $2,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в больших объемах [3]. Позднее направление каскадных бустеров получило новый импульс в Сандийских национальных лабораториях США. В докладе [4] представлен проект каскадного бустера, разработанного под влиянием российской публикации [5]. По мнению авторов проекта, этот бустер полностью удовлетворит требования к импульсному источнику ядерных излучений будущего поколения, ориентированному на проведение испытаний по радиационной стойкости.

2. В распространении принципа каскадности на бланкеты электроядерных установок (ЭЛЯУ), т. е. на подкритические реакторы, действующие в комплексе с мощными ускорителями протонов. Одно из главных препятствий на пути реализации ЭЛЯУ – слишком высокие требования к мощности ускорителя. В работе ИЯРФ [6] было показано, что смягчение остроты указанных требований может быть достигнуто при использовании в бланкете указанного принципа каскадности. На основе расчетов получено, что использование в ЭЛЯУ бланкета каскадного типа предоставит возможность десятикратного и более снижения мощности ускорителя протонов, т. е. достижение такого же эффекта, как в случае уменьшения длительности импульса в каскадных бустерах.

Первые тщательные расчеты ЭЛЯУ с каскадным бланкетом были выполнены в ИЯРФ по контракту с американской корпорацией «Грумман» [7]. За ними последовали другие

расчетно-теоретические исследования и концептуальные проектные проработки [8].

В 2003–2004 гг. в ИЯРФ была выполнена серия развернутых экспериментов на лабораторных моделях уран-нептуниевых каскадных бланкетов [9].

Каскадные импульсные реакторы

Проведение в ИЯРФ ВНИИЭФ теоретических работ по связанным реакторам поддерживалось не только стремлением к расширению полостей для облучения образцов, но и еще одним не менее важным стимулом – надеждой уменьшения длительности импульсов излучений с помощью привлечения фактора двухсекционности реактора. Важность этого стимула следует из того, что генерирование мощных импульсов n -, γ -излучений с требуемой для ряда опытов малой длительностью сопряжено с очень серьезными трудностями.

Как оказалось, возможности уменьшения, и притом значительного, длительности импульса в двухсекционных реакторах существуют. С помощью расчетов в 1979 г. было показано, что эти возможности связаны с использованием каскадных систем [2, 10]. Указанные работы, как уже говорилось, возродили идею каскадных реакторов, впервые высказанную в 1957 г. [1], но в течение 20 лет пребывавшую в полном забвении.

В указанных работах предложен и способ реализации односторонней нейтронной связи за счет использования в одной из секций порогово делящегося вещества, лучше всего ^{237}Np . В импульсных реакторах с коротким импульсом присутствие сильных замедлителей противопоказано. Вентили из статьи [1] в виде комбинации сильного замедлителя и поглотителя нейтронов были бы в этом случае неэффективными.

Таким образом, был предложен каскадный аperiodический импульсный реактор (АИР) или бустер, делящимся материалом одной из секций которого является ^{237}Np , а другой секции – уран высокого обогащения. Секции в

этом АИР разделяет стенка из вещества с большой атомной массой, например, слой вольфрама или молибдена. В предложенной композиции можно достигать глубоких перепадов в коэффициентах нейтронной связи двух АЗ и при этом исключать фазу замедления нейтронов до промежуточных и тепловых энергий.

Показателем эффективности принципа каскадности применительно к импульсным реакторам и бустерам является отношение ξ длительности импульса в обычной (односекционной) (T_0) и каскадной (T) реакторной системе при условии одинакового энерговыделения за импульс в каждой из них, в случае бустеров – также и равного числа нейтронов в инициирующем нейтронном импульсе:

$$\xi = T_0 / T. \quad (1)$$

На основании результата работ [2, 10] в ИЯРФ ВНИИЭФ в начале 1980-х гг. был разработан проект бустера-реактора «Каскад» (БР-К) с внутренней активной зоной из сплава ^{237}Np с галлием и внешней активной зоной из уран-молибденового сплава [3]. Предполагалось, что БР-К будет действовать в комплексе с сильноточным ускорителем электронов ЛИУ-30, который должен был поставлять в секцию из $^{237}\text{Np} \sim 1 \cdot 10^{15}$ первичных нейтронов.

БР-К является реакторной установкой с двумя цилиндрическими АЗ, способной генерировать при совместной работе с сильноточным ускорителем электронов мощные импульсы делений с максимальным выходом энергии 120 МДж, длительностью 1–300 мкс и соответственно флюенсом нейтронов $1 \cdot 10^{14} - 2,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ в больших объемах (рис. 1). В этой установке АЗ из сплава ^{237}Np с галлием (АЗ1) расположена в полости внешней АЗ, выполненной из сплава урана с молибденом (АЗ2). АЗ1 и АЗ2 разделены слоем вольфрама.

Эффективная толщина вольфрамового слоя в БР-К равна 13–14 см, что обеспечивает примерно 10-кратное обусловленное спектральными эффектами уменьшение коэффициента k_{12} нейтронной связи секций. Для проводки тормозного излучения от ускорителя

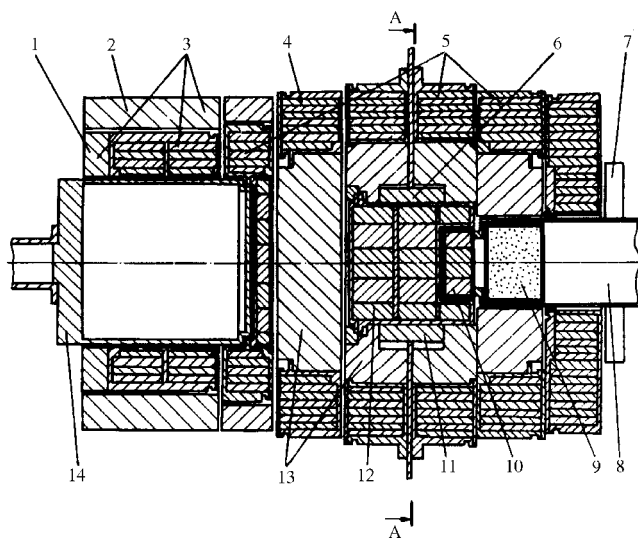


Рис. 1. Вид БР-К в осевом разрезе [3]: 1 – отражатель нейтронов; 2 – регулирующий блок АЗ2; 3 – подвижный блок АЗ2; 4 – аварийный блок; 5 – неподвижные блоки АЗ2; 6 – регулирующий блок АЗ1; 7 – стоп-блок и импульсный блок; 8 – канал для проводки тормозного излучения; 9 – замедлитель нейтронов типа ^6LiH ; 10 – подвижный блок АЗ1; 11 – импульсный блок АЗ1; 12 – неподвижный блок АЗ1; 13 – массив вольфрама; 14 – контейнер для облучаемых образцов

к АЗ1 во внешних слоях реактора создан цилиндрический канал, в области вольфрамового слоя заполненный замедлителем нейтронов типа ^6LiH (или бериллия), хорошо пропускающим тормозное излучение. Предполагалось, что при номинальном токе и энергии электронов от ускорителя в материале АЗ1 в результате фотоядерных реакций будет возникать $\sim 1 \cdot 10^{15}$ первичных нейтронов.

БР-К имеет цилиндрическую полость для облучения образцов диаметром и глубиной ~ 35 см, в которой могут быть реализованы флюенсы нейтронов до $2,2 \cdot 10^{15} \text{ см}^2$. Направленность оси симметрии БР-К – горизонтальная.

Расчеты БР-К выполнены на основе программ Монте-Карло, сферических гармоник и дискретных ординат в многогрупповом приближении. Переходные процессы в БР-К определялись на основе численного решения уравнений кинетики связанных реакторов [11]. При этом предполагалось, что допустимое повышение температуры в АЗ1 и

А32 ограничено соответственно 500 и 680 °С. Номинальные импульсы делений в БР-К, будь он реализован, имели бы в сравнении с импульсами в односекционном устройстве в 7–10 раз меньшую длительность.

Проект был разработан в 1980–1981 гг. Тогда же было развернуто строительство БР-К, но не завершилось из-за осложнений, связанных с изготовлением большого числа деталей из нептуния, и возраставших сомнений относительно реальности получения с помощью ЛИУ-30 требуемого импульса первичных нейтронов. Действительно, как было установлено позднее, число нейтронов за импульс, генерируемых электронами ЛИУ-30, равно примерно 10^{14} [12]. К настоящему времени реализован лишь сниженный вариант проекта – реактор БР-К1 без внутренней активной зоны из нептуния. Это обычный, т. е. односекционный импульсный реактор с активной зоной и полостью больших размеров [13].

В 1990-х гг. направление проектирования каскадных бустеров получило новый импульс в Сандийских национальных лабораториях США. В докладе [4] их сотрудников было дано описание концептуального проекта каскадного бустера, разработанного под влиянием российской публикации [5] и являвшегося своеобразным продолжением работ американской программы EDNA.

В докладе констатируется, что желательными параметрами импульсного реакторного устройства, ориентированного на исследования радиационной стойкости различных узлов, должны быть цилиндрическая полость диаметром ~60 см, длиной ~150 см, флюенс нейтронов в полости $8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$ и ширина импульса на половине высоты 10–20 мкс. Сказано также, что ввиду жестких требований по ширине импульса эта установка должна быть бустером. Аргументами в пользу бустера являются также гарантированная в этом случае подкритичность установки и необходимость наличия отрицательного температурного коэффициента реактивности. Благодаря последнему фактору становится допустимой изначальная фрагментация топливного массива активных зон, тем самым

снижая механические напряжения, связанные с тепловым ударом.

Предполагалось, что это устройство будет действовать в комплексе с ускорителем электронов, генерирующим в активной зоне бустера $5 \cdot 10^{15}$ первичных нейтронов в импульсе длительностью 0,1 мкс и представляющим собой усовершенствованную версию ускорителя HERMES III.

В итоге был разработан концептуальный проект каскадного бустера, состоящего из двух активных зон и разделяющего их полусферического слоя вольфрама толщиной 10 см (рис. 2). Предполагалось, что первая активная зона изготовлена из NpO_2 в форме сферы с внешним диаметром 35 см. Она подкритична с $k_{эф} = 0,989$. Вторая активная зона изготовлена из UO_2 в форме цилиндра с полостью диаметром 61 см, высотой 152 см. Она надкритична (с учетом запаздывающих нейтронов) с $k_{эф} = 1,003$. Повышение средней температуры первой активной зоны за импульс равно 360 °С, второй – 379 °С. Ширина импульса делений в первой активной зоне ~2 мкс, во второй ~20 мкс. В докладе сказано, что этот бустер удовлетворит сформулированным требованиям к импульсному источнику ядерного излучения будущего поколения.

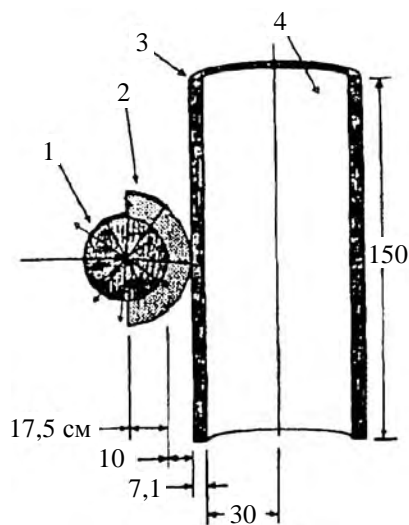


Рис. 2. Схематическое изображение двухсекционного бустера Сандийских национальных лабораторий (США) [4]: 1, 3 – активные зоны из диоксида нептуния и урана 93 %-ного обогащения соответственно; 2 – промежуточный слой из вольфрама; 4 – экспериментальная полость

Каскадные бланкеты электроядерных установок

Реализованные на практике полномасштабные ЭЛЯУ до сих пор отсутствуют. Одно из основных препятствий на пути их реализации заключается в слишком высоких требованиях к мощности ускорителя и ускорительной мишени. Смягчение остроты указанных требований, как сказано выше, может быть достигнуто на основе использования принципа каскадных реакторов. Это распространение принципа каскадности на стационарные системы типа ЭЛЯУ было проведено в работах [6, 7]. Было получено на основе расчетов, что использование в ЭЛЯУ бланкета каскадного типа предоставляет возможность десятикратного снижения мощности ускорителя протонов, т. е. такого же, как уменьшение длительности импульса в каскадных бустерах.

В качестве показателя эффективности принципа каскадности применительно к бланкетам ЭЛЯУ принят коэффициент каскадного усиления A , равный отношению чисел делений в каскадном (P) и обычном (P_0) бланкетах, нормированных на один нейтрон источника со спектром нейтронов деления ^{252}Cf , при условии равенства $k_{\text{эф}}$ того и другого бланкета,

$$A = P/P_0. \quad (2)$$

Среди других данных в работах [6, 7] приведены найденные из аналитических решений соотношения между параметрами бланкета. Получено, что для симметричного по $k_{\text{эф}1}$ и $k_{\text{эф}2}$ каскадного бланкета подкритичность всего бланкета $\Delta k_{\text{эф}}$ ($\Delta k_{\text{эф}} = 1 - k_{\text{эф}}$) равна

$$\Delta k_{\text{эф}} = \Delta k_{\text{эф}1} - \sqrt{k_{12}k_{21}}, \quad (3)$$

коэффициент каскадного усиления A равен

$$A = 1 + \frac{k_{21} - \sqrt{k_{12}k_{21}}}{\Delta k_{\text{эф}} + 2\sqrt{k_{12}k_{21}}}, \quad (4)$$

доля энерговыделения в 1-м каскаде α составляет

$$\alpha = \frac{\Delta k_{\text{эф}} + \sqrt{k_{12}k_{21}}}{\Delta k_{\text{эф}} + k_{21} + \sqrt{k_{12}k_{21}}} \quad (5)$$

(здесь k_{12}, k_{21} – коэффициенты нейтронной связи секций).

В бланкете с абсолютно односторонней связью секций коэффициент $k_{12} = 0$. В этом случае

$$\Delta k_{\text{эф}} = \Delta k_{\text{эф}1}; \quad A = 1 + \frac{k_{21}}{\Delta k_{\text{эф}}}; \quad (6)$$

$$\alpha = \frac{\Delta k_{\text{эф}}}{\Delta k_{\text{эф}} + k_{21}} = \frac{1}{A}.$$

Если не ставить условия равенства $k_{\text{эф}1}$ и $k_{\text{эф}2}$ и рассматривать в качестве источника нейтронов числа первичных делений S_1, S_2 в секциях 1 и 2, то можно получить более общие в сравнении с (3)–(5) формулы:

$$P_1 = \frac{k_{12}S_2 + (1 - k_{\text{эф}2})S_1}{(1 - k_{\text{эф}1})(1 - k_{\text{эф}2}) - k_{12}k_{21}};$$

$$P_2 = \frac{k_{21}S_1 + (1 - k_{\text{эф}1})S_2}{(1 - k_{\text{эф}1})(1 - k_{\text{эф}2}) - k_{12}k_{21}}; \quad (7)$$

$$k_{\text{эф}} = \frac{k_{\text{эф}1} + k_{\text{эф}2}}{2} + \sqrt{\left(\frac{k_{\text{эф}1} - k_{\text{эф}2}}{2}\right)^2 + k_{12}k_{21}}.$$

С помощью аналитических соотношений (3)–(7) легко прослеживаются качественные зависимости параметров каскадных систем. Аналитические соотношения, однако, применимы не во всех случаях. Их результаты, например, слишком грубы для систем с большими размерами. Более точные и более близкие к конкретным условиям данные следуют из численных расчетов по программам Монте-Карло. Даже применительно к аналитическим соотношениям коэффициенты связи k_{21}, k_{12} , вообще говоря, приходится определять с помощью численных расчетов. Во ВНИИЭФ такие расчеты проводятся преимущественно по программам С-95, С-007 – программам решения методом Монте-Карло уравнений переноса нейтронов и γ -квантов.

Первые тщательные расчеты параметров ЭЛЯУ с каскадным бланкетом [7] относились к бланкету с расплавленной фторидной солью плутония и ториевой мишенью (рис. 3) [14]. Предполагалось, что пучок протонов с энергией 0,8 ГэВ падает сверху на мишень в осевом

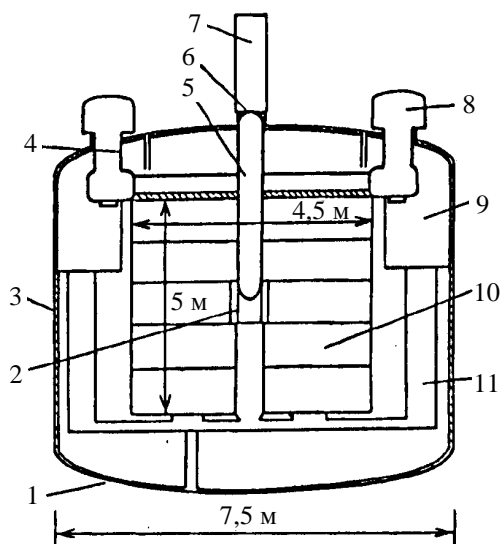


Рис. 3. Бланкет на расплавленной соли плутония и ториевая мишень в проекте АТВ [14]: 1 – дренаж; 2 – мишень из металлического тория; 3 – корпус из хастелоя; 4 – устройство для откачки ксенона, криптона, трития; 5 – труба для проводки пучка протонов, заполненная гелием; 6 – инконелевое окно; 7 – пучок протонов; 8 – насосы; 9 – теплообменник; 10 – расплавленная соль с плутонием в графитовой решетке; 11 – каналы возвращения теплоносителя

направлении. Форма пучка протонов – тонкий шнур вдоль оси мишени.

Концепция каскадного реактора в этих расчетах нашла выражение в виде комбинации проектного бланкета (секция 2) и размножающей мишени из металлического ^{237}Np (секция 1). Проводились тщательные расчеты электроядерной установки как с ториевой, так и с нептуниевой мишенью. В качестве показателя эффективности бланкета принималось число делений в плутонии на 1 протон ускорителя. Основная цель расчетов заключалась в определении отношения чисел делений плутония, производимых в системе с нептуниевой мишенью и в системе с ториевой мишенью, при нормировке на 1 протон ускорителя и при равенстве полных подкритичностей той и другой системы.

Полученные расчетные данные подтвердили предсказываемые на основе аналитических соотношений свойства рассматриваемой ЭЛЯУ [7]. Полный перепад в коэффициентах нейтронной связи секций получен равным

2000: 10-кратный – за счет геометрического фактора, 200-кратный – за счет пороговости ^{237}Np . Из этих расчетов следовало, в частности, что при полной подкритичности ЭЛЯУ 5% ($k_{эф} = 0,95$) переход к нептуниевой мишени, т.е. к варианту ректора каскадного типа, позволяет в 10 раз снизить мощность ускорителя протонов, а при полной подкритичности 1% ($k_{эф} = 0,99$) – в 26 раз. Существенно, что эти данные получены непосредственно для электроядерного устройства в проекте АТВ [14], с реалистичными параметрами blankets, пучка протонов и мишени.

Другие варианты каскадных blankets

В последующие годы появился целый ряд концептуальных проектов ЭЛЯУ с каскадными blankets, основанными как на нептунии, так и на разделительной стенке. Наиболее заметной из этих ЭЛЯУ, получившей резонанс и широко обсуждаемой в качестве объекта разнообразных и глобальных применений, был каскадный подкритический жидко-солевой реактор (КПЖСР), разработанный в «Курчатовском институте» (г. Москва) [15].

КПЖСР представляет собой комбинацию быстрой и тепловой АЗ, разделенных стенкой из поглотителя (рис. 4). Пучок ускоренных заряженных частиц поступает во внутреннюю активную зону с жестким спектром нейтронов. Очень обнадеживающей и до поры казавшейся оригинальной основой идеи КПЖСР было предположение об эквивалентности (в аспекте свойств каскадности) двух близких систем: системы со стенкой из поглотителя тепловых нейтронов и аналогичной системы без стенки с растворенным в объеме быстрой АЗ ее материалом.

Последующие расчеты, однако, не подтвердили этого предположения [16]. Было показано, что распределенный в объеме 1-й секции поглотитель нейтронов не подавляет коэффициент связи k_{12} , а относительно небольшое отличие коэффициентов k_{12} , k_{21} и незначительное проявление каскадности в blankets создаются исключительно за счет геометрического фактора.

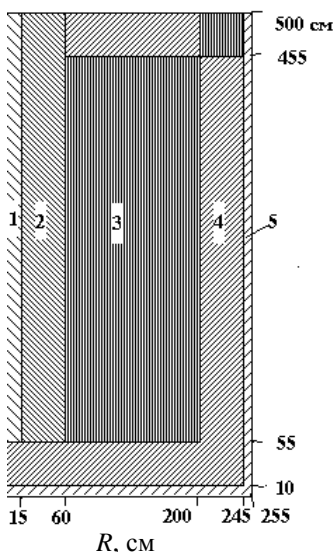


Рис. 4. Расчетная модель КПЖСР: 1 – 1-я секция на быстрых нейтронах; 2, 3 – 2-я секция на тепловых нейтронах; 4 – графитовый отражатель; 5 – корпус [15]

В планах, связанных с бланкетом на расплавленных фторидах, были заложены предположения о намного более интенсивных проявлениях эффекта каскадности. Ввиду этого потребовались видоизменения конфигурации бланкета. Рассматривались возможности повышения эффекта каскадности за счет:

- порогости делящегося вещества и усиления роли геометрического фактора в результате замены в зоне 1 исходного топлива расплавленным металлическим ^{237}Np ;

- дальнейшего усиления роли геометрического фактора в результате профилирования осевого распределения нептуния в зоне 1.

Расчеты, выполненные в рамках проекта МНТЦ № 1486, ведомом в основном «Курчатовским институтом» и ВНИИЭФ, показали, что коэффициент A в КПЖСР с нептунием может достигать высоких значений. Было очевидно, однако, что бланкету этого типа свойствен очень важный недостаток – чрезмерно высокая удельная мощность 1-го каскада, обусловленная слишком малым его объемом. В этой связи были предприняты попытки увеличения объема 1-го каскада с помощью замены расплавленного металлического нептуния взвесью нептуния в расплавленном свинце или висмуте. Расчеты показали очень хорошие результаты, но вопрос о практиче-

ской реализуемости указанных взвесей остается открытым.

В статье [17] приведены результаты расчета существенно модернизированного реактора КПЖСР. В этих расчетах были учтены технологические и конструкционные ограничения, характерные для техники энергетических реакторов. В качестве драйвера в этом варианте КПЖСР принят протонный ускоритель с энергией частиц 1 ГэВ и током протонного пучка 10 мА. Материалом мишени является свинцово-висмутовая эвтектика. Каскадный бланкет реактора сформирован в виде двух секций: внутренней секции из трех идентичных модулей и внешней секции, являющейся зоной трансмутации младших актинидов (рис. 5).

В целях смягчения теплофизических ограничений внутренняя зона разбита на три идентичных модуля. Внутри каждого модуля расположены конечный участок трубы проводки протонов и два концентрических слоя твэлов, охлаждаемых свинцово-висмутовой эвтектикой. Решетка твэлов из плутония и ^{237}Np размножает первичные нейтроны, рождающиеся в эвтектике под воздействием протонов, и передает их в зону трансмутации, где происходит их дальнейшее размножение и осуществляется сжигание актинидов.

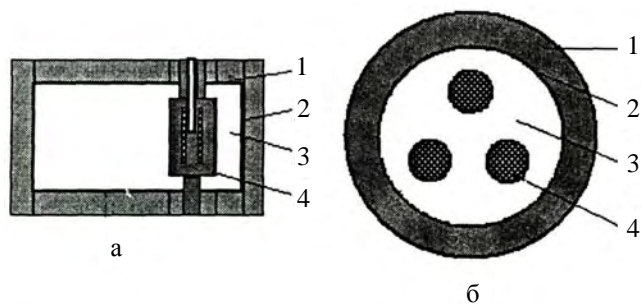


Рис. 5. Общая компоновка варианта КПЖСР [17]. Вертикальное (а) и горизонтальное (б) сечения бланкета: 1 – графитовый отражатель; 2 – кожух; 3 – зона трансмутации; 4 – модуль внутренней секции

По замыслу авторов конструкции, обратный поток нейтронов промежуточной энергии, дополнительно замедляясь во внешнем слое эвтектики модулей, интенсивно захватываясь без делений в слое твэлов из ^{237}Np , не

будет достигать плутониевых твэлов. В итоге это будет способствовать подавлению коэффициента нейтронной связи k_{12} .

В результате расчетов было получено, что достигаемое в рассматриваемом реакторе значение коэффициента каскадного усиления A равно ~ 3 . При значении $k_{эф}$ 0,95 тепловая мощность реактора составит 800 МВт. В общем балансе энерговыделения на модули внутренней зоны приходится 20 %, на внешнюю зону – 80 %. Объемная удельная мощность в модулях составляет $0,49 \text{ МВт}\cdot\text{л}^{-1}$, во внешней зоне – $36 \text{ кВт}\cdot\text{л}^{-1}$.

Топливная композиция в зоне трансмутации составлена из отработавшего топлива ВВЭР обогащением 4,4 % и глубиной выгорания $40 \text{ ГВт}\cdot\text{сут}\cdot\text{кг}^{-1}$ при 30-летней выдержке после облучения. В качестве носителя топлива выбрана соль $\text{NaF}(50\%) - \text{ZrF}_4(50\%)$. Для этой соли при рабочей температуре 650°C молярная растворимость $\text{PuF}_4 + \text{PuF}_3$ составляет 5–5,5 %, а $(\text{Am} + \text{Cm} + \text{Np})\text{F}_x$ равна 1,5–2 %. Производительность этого варианта КПЖСР по сжиганию Np , Am , Cm составляет $\sim 70 \text{ кг}\cdot\text{год}^{-1}$.

Полученное в рассматриваемом реакторе значение коэффициента A , равное ~ 3 , значительно ниже теоретических значений. Основная причина этого – необходимость учета в реалистичных конструкциях тех теплофизических ограничений, которые приняты в технологиях энергетических реакторов.

К настоящему времени выполнено большое число других работ по каскадным реакторам. Серьезное внимание к этой теме проявлено в России (ВНИИЭФ, ФЭИ, ИТЭФ, «Курчатовский институт»), ВНИИТФ, ОИЯИ), США, Белоруссии, Индии, Китае, Армении (Ереванском университете).

Помимо рассмотренных выше, опубликован ряд других предложений и концептуальных проектов ЭЛЯУ с бланкетами каскадного типа. К их числу относятся:

- бланкет в составе малогабаритного водородяного транспортногo реактора АБВ типа ВВР мощностью 50 МВт (т), подкритической сборки из двуокиси нептуния-237 (ВНИИЭФ, г. Саров и ОКБМ, г. Нижний Новгород) [8];

- бланкет в составе быстрого реактора с тепловыделяющими сборками БН-350 и теплового реактора типа ВВЭР-1000, CANDU или расплавленно-солевого графитового реактора типа MSBR-1000. Теплосъем в быстрой зоне осуществляется с помощью свинцово-висмутовой эвтектики [18];

- бланкет в составе быстрого и теплового реакторов с единой системой газового охлаждения. Активная зона быстрого реактора состоит из стержневых твэлов опытно-промышленной установки БГР-300. Реактор на тепловых нейтронах типа HTGR конструктивно является внешним по отношению к реактору на быстрых нейтронах. Одна зона от другой отделена кадмиевым экраном-вентилем. Пучок протонов от ускорителя бомбардирует мишень из тяжелого инертного металла, расположенную вдоль оси быстройнейтронной зоны [19];

- цилиндрический бланкет со свинцово-висмутовой мишенью, бомбардируемой протонами с энергией 1 ГэВ, буферной зоной, активной зоной на быстрых нейтронах, экранирующим слоем из V_4C , CO_2 – пространством и активной зоной на тепловых нейтронах (Шанхайский университет, Китай) [20]. Диаметр и высота мишени равны 40 и 78 см соответственно. Предполагалось, что в среднем каждый протон генерирует в мишени 30 нейтронов. Назначение экрана из V_4C и CO_2 -пространства, разделяющих две активные зоны, – осуществление односторонней нейтронной связи секций за счет поглощения тепловых нейтронов в V_4C и геометрического фактора;

- тщательно анализируемая с помощью аналитических решений в диффузионном и транспортном приближениях теории переноса нейтронов схема подкритического уранториевого бланкета с повышенным умножением нейтронов источника и, следовательно, сниженными требованиями в отношении тока протонов от ускорителя (Центр ядерных исследований, г. Тромбей, Индия) [21]. Авторы этой статьи с удивлением констатируют (они не знали, что это явление давно известно), что требования к току протонов существенно снижаются, если подкритический бланкет komponуется из двух односторонне связанных

активных зон. В статье показано, что в такой системе можно получать в четыре-пять раз более высокое умножение нейтронов источника, в сравнении с однозонным бланкетом типа используемого в «Усилителе энергии» К. Руббиа, и иметь тепловую мощность blankets на уровне 750 МВт при токе протонов с энергией 1 ГэВ на уровне 1 мА, т. е. при мощности ускорителя порядка 1 МВт;

- бланкет ЭЛЯУ, в котором внутренняя АЗ на быстрых нейтронах, выполненная из металлического нептуния-237, является одновременно мишенью реакций расщепления (ВНИИТФ, г. Снежинск) [22]. В указанной публикации приведена информация о предварительной проработке конструкции, оценке эффективности предложенной концепции «активной» мишени и результатах нейтронно-физических и теплогидравлических ее расчетов;

- бланкет в составе быстрого реактора с активной зоной из двуокиси нептуния и оружейного плутония, теплового реактора типа ВВЭР-1000 и легководного отражателя нейтронов. Активные зоны blankets разделены экраном-вентилем из двуокиси обедненного урана. В качестве материала мишени и теплоносителя в быстрой АЗ и вентиле используется свинцово-висмутовая эвтектика. Теплоотвод в активной зоне на тепловых нейтронах осуществляется с помощью легкой воды [23];

- бланкет, разработанный в ИТЭФ (г. Москва) и в свое время предлагавшийся в качестве основной идеи создания будущих ЭЛЯУ [24]. Как и в большинстве других каскадных систем, внутренняя секция blankets ИТЭФ представляет собой активную зону с быстрым спектром нейтронов, внешняя секция – активную зону на тепловых нейтронах. В быстрой секции в качестве теплоносителя используется свинцово-висмутовая эвтектика с естественной циркуляцией. Секция на тепловых нейтронах являлась канално-корпусной конструкцией с тяжелой водой в качестве теплоносителя и замедлителя. Обе секции загружаются топливом в виде смеси двуокиси плутония и тория. Водный раствор технеция-99 используется в качестве компенсатора реактивности.

В заключение настоящего раздела отметим, что специфическими проблемами каскадных blankets являются слишком высокая удельная мощность в ведущей секции и опасные последствия аварийного разрушения вентильной стенки между секциями, если таковая имеется. Опасность, связанная с разрушением стенки, заключается в возможном при этом перемешивании материалов двух секций, ослаблении отрицательного действия поглотителя нейтронов на цепную реакцию и в результате увеличении $k_{эф}$ blankets выше допустимого уровня. В blankets на основе использования нептуния проблема второго типа отсутствует. Но первого типа проблема свойственна всем каскадным blankets.

Отметим также, что в качестве альтернативы системам, управляемым протонными пучками, иногда рассматривают электроядерные установки с ускорителем электронов. Интерес к системам этого типа определяется относительно простой конструкцией электронных ускорителей и надежностью их работы. Главный недостаток таких систем – относительно малый выход нейтронов на один электрон ускорителя.

Список литературы

1. Borst L. B. The convergatron, a neutron amplifier // *Phys. Rev.*, 1957, v. 107, № 3, p. 905–906.
2. А. с. 786619, МПК G21C1/28. Двухкаскадный умножитель нейтронов / В. Ф. Колесов, А. А. Малинкин // *Открытия. Изобретения*. 1991, № 30, с. 240.
3. Павловский А. И., Малинкин А. А., Колесов В. Ф. и др. Двухсекционный бустер-реактор «Каскад» (БР-К) // *ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов*, 1992, вып. 3, с. 3–11.
4. Griffin P. J., Miller J. D., Harms G. A. et al. Design trade-off study for a large volume short pulse neutron assembly // *Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors. Proc. of the International Topical Meeting on physics, safety, and applications of pulse reactors held at Washington, D.C., November 13–17, 1994*, p. 292–299.

5. Kolesov V. F., Malinkin A. A. Two-section pulsed reactor with asymmetrical neutron coupling between sections. Proceedings on International Workshop on Pulsed Advanced Neutron Sources. Dubna, 25–27 June 1991 // Pulsed nuclear reactors: new capabilities for scientific research. – Препринт № ДЗ-92-76. Дубна: ОИЯИ, 1992.
6. Колесов В. Ф., Гужовский Б. Я. Повышение эффективности электроядерного трансмутационного устройства за счет многосекционной структуры blankets // Атомная энергия, 1994, т. 76, вып. 1, с. 71–77.
7. Kolesov V. F., Shtarev S. K., Khoruzhii V. Kh. et al. Transmutation efficiency calculation in the blanket on melted salts with central neptunium target // AIP Conference Proceedings 346. International Conference on accelerator-driven transmutation technologies and applications. – Las Vegas, NV, 1994. Woodbury, New York. 1995, p. 569–574.
8. Воинов А. М., Воинов М. А., Воронцов С. В. и др. Расчетно-теоретическая и конструкторская проработка физического макета двухкаскадного blankets для электроядерного реактора // Второй научный семинар памяти В. П. Саранцева. – Дубна: Д9-98-153, 1998, с. 69–76.
9. Завьялов Н. В., Колесов В. Ф., Иванов И. А., Илькаев Р. И., Житник А. К., Кувшинов М. И., Нефедов Ю. Я., Пунин В. Т., Тельнов А. В., Хоружий В. Х. Эксперименты на моделях реакторов каскадного типа // Атомная энергия, 2006, т. 100, вып. 2, с. 107–116.
10. Колесов В. Ф., Малинкин А. А. Кинетика двухсекционного бустера-реактора с асимметричной нейтронной связью секций // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 1991, вып. 4, с. 10–23.
11. Колесов В. Ф. История становления и практической реализации концепции связанных реакторов // ВАНТ. Физика ядерных реакций, 2016. Вып. 4.
12. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Савченко В. А. и др. Моделирующие облучательные комплексы и установки РФЯЦ-ВНИИЭФ // 65 лет ВНИИЭФ. Физика и техника высоких плотностей энергии». Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2011. Вып. 1, с. 165–191.
13. Босамыкин В. С., Малинкин А. А., Колесов В. Ф. и др. Конструкция и физико-технические характеристики бустера-реактора БР-К1 // ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 1996, вып. 1, с. 3–12.
14. Bowman C., Toevs J., Arthur E. et al. ABC Concept Presentations the Los Alamos Accelerator Based Conversion Concept for Plutonium Disposition (ABC). JASON Review, La Jolla, CA, January 18, 1994.
15. Алексеев П. Н., Игнатьев В. В., Коляскин О. Е. и др. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности // Атомная энергия, 1995, т. 79, вып. 5, с. 327–337.
16. Колесов В. Ф., Хоружий В. Х. Нейтронные характеристики моделей каскадного двухсекционного blankets // Там же, 2000, т. 88, вып. 5, с. 330–337.
17. Дегтярев А. М., Калугин А. К., Коляскин О. Е., Мясников А. А., Пономарев Л. И., Карманов Ф. И., Серегин М. Б., Сидоркин С. Ф. Каскадный подкритический жидкосолевой реактор для сжигания трансплутониевых актиноидов // Там же, 2006, т. 101, вып. 2, с. 116–125.
18. Бзнуни С. А., Барашенков В. С., Жамкочан В. М. и др. Перспективные электроядерные установки // ЭЧАЯ. 2003, т. 34, вып. 4, с. 977–1032.
19. Жамкочан В. М., Жамкочан С. В. Газоохлаждаемый каскадный реактор в подкритическом режиме // Известия НАН Армении, Физика, 2006, т. 41, № 1, с. 69–78.
20. Jiang X., Huang H., Xie Z. S. Conceptual design of Accelerator Driven Fast/Thermal spectrum subcritical system // Trans. Amer. Nucl. Soc., 2006, vol. 94, № 1, p. 97-98.
21. Degweker S. B., Lawande S. V., Kapoor S. S. Accelerator driven sub-critical systems with enhanced neutron multiplication // Ann. Nucl. Energy, 1999, v. 26, p. 123-140.
22. Гребенкин К. Ф., Жеребцов А. Л., Кандиев Я. З. и др. Концепция активной мишени электроядерного реактора. – Препринт ВНИИТФ, 1998, № 81.
23. Шмелев А. Н., Апсэ В. А., Куликов Г. Г., Киселев Г. В. О возможности дости-

гания отработанного топлива энергетических реакторов в электроядерных установках // Известия вузов. Ядерная энергетика, 1996, № 3, с. 61–68.

24. Кочуров Б. П., Шведов О. В., Ко-нев В. Н. и др. Подкритический бланкет с быстрым и тепловым спектром и оружейным плутонием в качестве топлива // Усовершенствованные тяжеловодные реакторы. Сб. докладов. – ИТЭФ, 1998, с. 196–207.

Контактная информация –

Колесов Владимир Федорович,
главный научный сотрудник ИЯРФ,
РФЯЦ-ВНИИЭФ,
e-mail: kolesov@expd.vniief.ru

Статья поступила в редакцию 10.06.2016.

Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов, 2016, вып. 4, с. 53–63.