

В. А. Бабенко¹, В. И. Гулик², В. Н. Павлович²¹ *Институт теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова НАН Украины, Киев*² *Институт ядерных исследований НАН Украины, Киев***МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВУХЗОННЫХ ЭЛЕКТРОЯДЕРНЫХ СИСТЕМ**

Рассмотрено нейтронно-физическое моделирование двухзонной подкритической системы, управляемой мощным нейтронным генератором. Обсуждается принцип каскадности при построении подкритических реакторов, использование которого может позволить существенно усилить поток нейтронов внешнего источника. Рассмотрены направления практической реализации каскадной подкритической системы, а именно возможные практические методы устранения обратной нейтронной связи между секциями реактора. Представлены и проанализированы результаты нейтронно-физического моделирования таких систем с помощью метода Монте-Карло.

Ключевые слова: электроядерная система, подкритическая зона.

Введение

Для дальнейшего развития атомной энергетики необходимо решить три основные проблемы: безопасность эксплуатации ядерных реакторов; способы обращения, переработки и хранения накапливающихся при работе АЭС радиоактивных отходов; также наличие ресурсов. Все эти проблемы возможно решить внедрением в атомную энергетику электроядерных систем, которые по своей сути имеют более высокий уровень безопасности, обусловленный подкритическим режимом работы такой системы. С другой стороны, электроядерные системы могут работать на различных видах топлива (в том числе на ториевом топливе), а также они могут нас приблизить к решению проблемы переработки радиоактивных отходов методом трансмутации [1 - 3]. Отметим также, что подобные электроядерные системы могут использоваться не только для переработки радиоактивных отходов, наработанных в процессе эксплуатации традиционных реакторов, но и для проведения физических исследований, где требуются мощные источники нейтронов разной энергии.

В данной статье представлено продолжение работ по моделированию исследовательского двухзонного подкритического реактора, управляемого внешним источником нейтронов [4, 5].

Моделирование двухзонной электроядерной системы методом Монте-Карло

Ранее нами было проведено изучение однозонных и двухзонных гомогенных подкритических систем [4 - 7]. С помощью нейтронно-физических кодов MCNP 4c и Scale 4.4a были проанализированы системы с различной геометрией, материальным составом и уровнем подкритичности. При

этом в качестве основного оптимизационного параметра выбирался коэффициент усиления потока нейтронов внешнего источника (отношение суммарного числа нейтронов N_S , проходящих через внешнюю граничную поверхность за единицу времени, к интенсивности источника нейтронов I_0 : $q = N_S/I_0$), поскольку основной целью построения исследовательских реакторов является получение высоких потоков нейтронов. Важной характеристикой является также коэффициент энергетического усиления G , определяемый как отношение энергии, выделившейся в реакторе, к энергии нейтронов источника.

На основании этих расчетов были сделаны следующие выводы: 1. Двухзонная подкритическая система действительно более эффективно усиливает поток нейтронов по сравнению с однозонной. 2. Наиболее оптимальное расположение зон – зона с быстрым спектром нейтронов находится внутри, зона с тепловым спектром нейтронов располагается снаружи. 3. В хорошо оптимизированной подкритической системе коэффициент усиления потока нейтронов может достигать нескольких сотен единиц.

Полученные результаты дают основания приступить к разработке физического проекта подкритического исследовательского высокопоточного реактора, который будет управляться мощным нейтронным генератором или установкой плазменного фокуса с энергией нейтронов 14 МэВ [8, 9]. Первым шагом к проектированию такого реактора является исследование возможных параметров активной зоны подкритической системы в отношении материальных характеристик. Упрощенная схема подкритической активной зоны показана на рис. 1.

Рассмотрим представленную модель более подробно. Поток заряженных частиц (дейтронов)

движется сверху вниз по центральной трубке, пока не попадает на титановую мишень, насыщенную тритием, где происходит D-T реакция с образованием нейтронов с энергией 14 МэВ. Титановая мишень расположена на медной подложке, которая охлаждается водой. Трубки водного охлаждения медной подложки размещены в нижней части центральной трубки, под мишенью. Быстрая зона, которая окружает центральную трубку, расположена в баке из нержавеющей стали. Быстрая зона набрана из укороченных твэлов реактора ВВЭР-1000 с разным обогащением по ^{235}U , которые охлаждаются газовым теплоносителем. Тепловая зона окружает быструю, она также набрана из твэлов реактора ВВЭР-1000, но охлаждение осуществляется с помощью водного тепло-

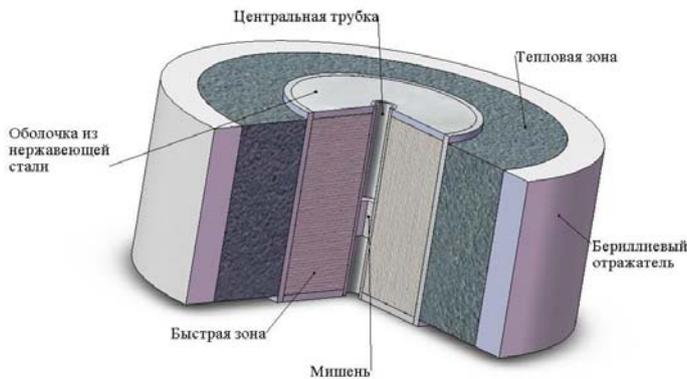


Рис. 1. Упрощенная схема двухзонной подкритической сборки.

Моделирование проводилось нами в два этапа: вначале для гомогенизированной системы оценивались геометрические размеры, соответствующие выбранному значению $k_{эф}$, а затем производился полный расчет гетерогенной системы с помощью программы расчета переноса нейтронов методом Монте-Карло MCNP-4с. При этом использовалась библиотека ядерных данных ENDF/B-VI [10, 11]. Основными характеристиками системы, которые были рассчитаны, являются поток нейтронов через внешнюю граничную поверхность, отнесенный к одному нейтрону внешнего источника, а также коэффициенты усиления потока нейтронов и энергии. В качестве варьируемых параметров исследуемой системы выступали обогащение по ^{235}U быстрой и тепловой зон, а также тип теплоносителя в быстрой зоне.

Изменение обогащения быстрой зоны. Обогащение быстрой зоны по ^{235}U изменялось при расчетах в интервале от 10 до 100 %. При этом

носителя. По периметру активной зоны расположен бериллиевый отражатель.

Для расчетов была использована модель подкритического реактора, представленная на рис. 1. Физические характеристики реактора выбирались таким образом, чтобы эффективный коэффициент размножения нейтронов был равен $k_{эф} = 0,97$. При этом точечный изотропный источник нейтронов с энергией 14 МэВ располагается в центре сборки, на поверхности мишени. Для систем с различными материальными параметрами размеры подбирались таким образом, чтобы вышеуказанный коэффициент размножения нейтронов оставался неизменным. Поперечный разрез части моделированной в MCNP подкритической системы представлен на рис. 2.

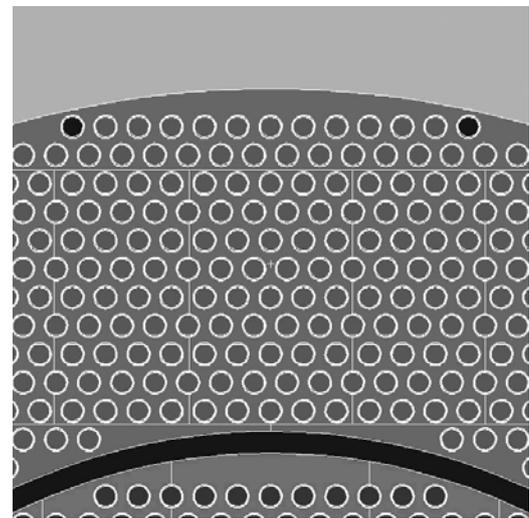


Рис. 2. Визуализация части поперечного разреза подкритической системы в MCNP.

обогащение тепловой зоны оставалось неизменным и фиксировалось равным 4 % по ^{235}U . Высота всей активной зоны при этом варьировалась, в то время как радиусы быстрой и тепловой зон оставались постоянными и равными 25 и 50 см соответственно. В расчетах был получен ряд значений коэффициента усиления потока нейтронов и энергии. Также были рассчитаны потоки нейтронов через основные поверхности системы и средние потоки нейтронов в основных ячейках системы. Для наглядности на рис. 3 и 4 приведены зависимости потока нейтронов через внешнюю граничную поверхность системы и коэффициента усиления потока нейтронов от обогащения быстрой зоны по ^{235}U .

Из рисунков можно видеть, что увеличение обогащения внутренней зоны от значений 15 - 20 % до 90 - 100 % увеличивает эффективность системы приблизительно в два раза. Однако ввиду того, что при этом существенно увеличиваются затраты на получение топлива высоких обо-

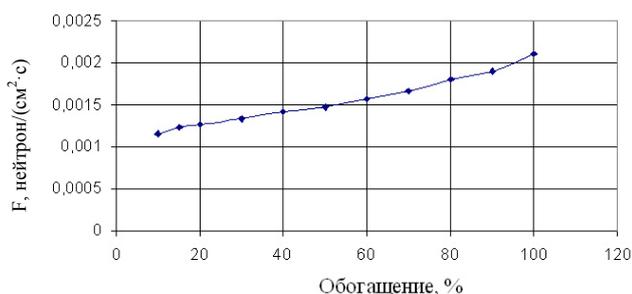


Рис. 3. Зависимость потока нейтронов через внешнюю поверхность, нормированного на один нейтрон внешнего источника, от обогащения быстрой зоны по ^{235}U .

гащений, а также учитывая тот факт, что большинство исследовательских реакторов в мире переходит на обогащение топлива до 20 % по ^{235}U , в быстрой зоне было принято решение использовать топливо с обогащением 15 - 20 %. Дальнейшие расчеты были проведены именно с этими показателями обогащения в быстрой зоне.

Изменение теплоносителя в быстрой зоне.

Для сохранения быстрого спектра нейтронов предлагается использовать газовый теплоноситель в быстрой зоне. Практика использования газовых теплоносителей в мире показывает, что оптимальными являются гелий и углекислый газ [12]. Для одной из моделей системы были проведены нейтронно-физические расчеты с помощью кода MCNP 4с. В этой модели в качестве теплоносителя в быстрой зоне использовались гелий либо углекислый газ. Сравнение результатов расчетов показало незначительное различие между этими газами, так что окончательный выбор между ними будут определять теплофизические и экономические характеристики.

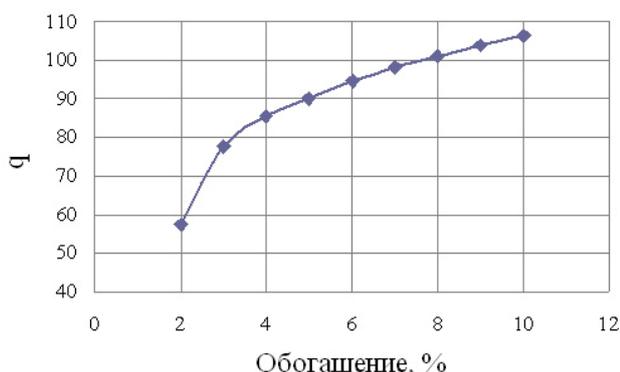


Рис. 5. Зависимость коэффициента усиления потока нейтронов в системе от обогащения тепловой зоны по ^{235}U .

Как показывают расчеты, толщина стенки бака из нержавеющей стали практически не влияет на эффективность системы, поэтому можно принять толщину стенки бака равной 1 см. Эта тол-

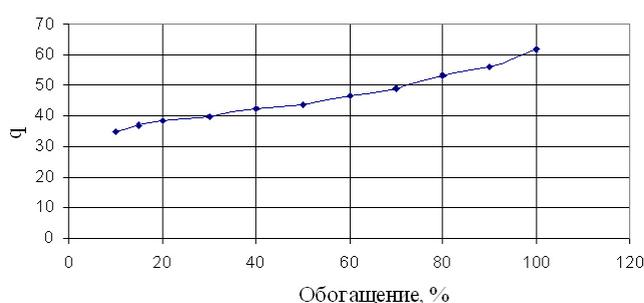


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления потока нейтронов от обогащения быстрой зоны по ^{235}U .

Изменение обогащения тепловой зоны. Обогащение тепловой зоны по ^{235}U изменялось в интервале от 2 до 10 %. При этом обогащение быстрой зоны оставалось фиксированным и равным 15 % по ^{235}U . В качестве варьируемого параметра выступал радиус тепловой зоны, в то время как радиус быстрой зоны и высота активной зоны оставались постоянными и равными 25 и 50 см соответственно. В расчетах был получен ряд значений коэффициентов усиления потока нейтронов и энергии, а также величины потока нейтронов через основные поверхности системы и средние потоки нейтронов в основных ячейках системы. Коэффициент усиления потока нейтронов и поток нейтронов через внешнюю граничную поверхность системы приведены соответственно на рис. 5 и 6. Можно видеть, что полученные кривые имеют небольшой перегиб в области обогащений ~3 - 5 %. Ввиду этого для дальнейших расчетов было решено использовать в тепловой зоне топливо с обогащением ~3 - 5 % по ^{235}U , которое, как следует отметить, уже выпускается промышленностью для энергетических реакторов.

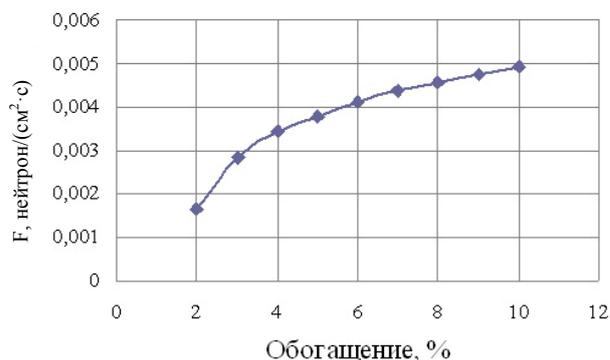


Рис. 6. Зависимость потока нейтронов через внешнюю поверхность системы от обогащения тепловой зоны по ^{235}U .

щина полностью удовлетворяет требованиям по прочности для данной системы.

Также было предложено ввести в подкритическую систему литий. В литии будет происходить

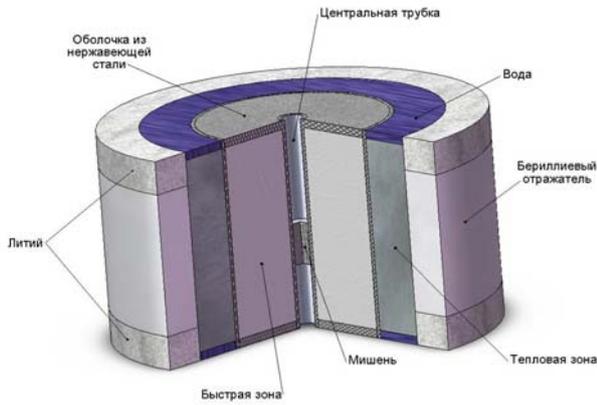


Рис. 7. Двухзонная модель подкритического реактора с литиевыми блоками для наработки трития.

наработка трития для потребностей мишени нейтронного генератора согласно реакции ${}^6\text{Li} + n \rightarrow \text{T} + {}^4\text{He} + E$. При внедрении в такую систему литиевых блоков было максимально уменьшено отрицательное влияние лития на эффективность системы, однако вместе с тем было учтено то, что

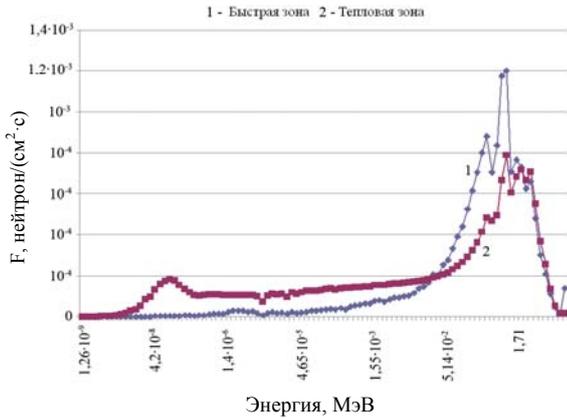


Рис. 8. Поток нейтронов, нормированный на один нейтрон внешнего источника, в зависимости от энергии для быстрой и тепловой зон.

Моделирование каскадных подкритических систем с подавлением обратной нейтронной связи

В связи с развитием подкритических электроядерных систем большой интерес представляет концепция многосекционных связанных реакторов, которая впервые была предложена и разработана Р. Эйвери [14]. Использование многозонного подкритического blankets в общем случае позволяет каскадно умножить нейтроны внешнего источника и таким образом значительно увеличить выход нейтронов, что приводит к существенному росту суммарной мощности установки. Основная идея многосекционности заключается в том, что каждая предыдущая секция подкритического реактора представляет собой внешний источник нейтронов для последующей сек-

в систему необходимо ввести то количество лития, которое будет достаточным для накопления нужного количества трития. На рис. 7 представлена модель подкритической сборки с литиевыми блоками, которые расположены сверху и снизу от бериллиевого отражателя.

В итоге для окончательной конфигурации системы были рассчитаны усредненные спектры нейтронов для быстрой и тепловой зон, которые приведены на рис. 8. Для сравнения на рис. 9 приведены нейтронные спектры для быстрого и теплового реакторов, полученные в работе [13]. Из рисунков можно видеть, что нейтронные спектры в быстрой и тепловой зонах предлагаемого реактора практически не отличаются от стандартных спектров быстрых и тепловых реакторов. Таким образом, в подобном исследовательском реакторе можно проводить эксперименты, для которых необходимы как быстрые, так и тепловые нейтроны, в том числе эксперименты по трансмутации.

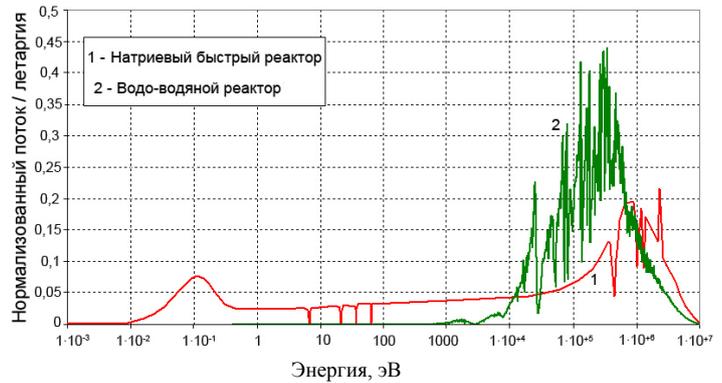


Рис. 9. Поток нейтронов, нормированный на летаргию, в зависимости от энергии для быстрого натриевого реактора (кривая 1) и водо-водяного реактора (кривая 2) [13].

ции, так что с увеличением количества подкритических секций можно существенно усилить поток нейтронов внешнего источника. В простейшем случае двухсекционный подкритический blanket представляет собой двоякую систему быстрого реактора и тепловой подкритической сборки (см., например, рис. 7), которая характеризуется как большим коэффициентом усиления нейтронов внешнего источника, так и большей по сравнению с обычными быстрыми реакторами безопасностью в отношении аварий, обусловленных введением положительной реактивности ввиду своей подкритичности. Основным вопросом, возникающим при построении таких систем, следующий: при каких условиях предыдущую секцию можно считать внешним источником нейтронов для последующей?

В начале 1990-х годов Л. П. Феоктистов также рассматривал практическую возможность создания гибридных ядерных систем, которые соединяют в себе внешний источник нейтронов с ядерным реактором, работающим в подкритическом режиме [15]. В качестве внешнего источника предлагалось использовать лазерный термоядерный реактор. Позже им был предложен вариант подкритического реактора, который состоял из двух частей: быстрой и тепловой зон. Основная идея заключалась в организации преимущественно одностороннего потока нейтронов от центра наружу и подавления их воздействия из периферийной области на центральную. Эффект подавления нежелательных нейтронных связей предполагалось осуществлять за счет размещения между двумя зонами небольшого слоя поглотителя тепловых нейтронов, например бора-10 или гадолия [16], а также за счет соответствующей геометрии системы.

В связи с этим в последнее время широко обсуждаются [17 - 21] многосекционные связанные системы в виде комбинации высоконапряженного реактора и последовательно располагаемых подкритических сборок с односторонней вентильной нейтронной связью между секциями. В качестве вентилей предлагается использовать, к примеру, помещаемые на границах между секциями слои ^{235}U , кадмия и замедлителя. В другом варианте преимущественно односторонняя нейтронная связь между секциями в бланкете в принципе может быть реализована путем чередования слоев непорогового и порогового делящихся веществ с обязательным включением в структуру бланкета замедлителя нейтронов. Практическая реализация системы такого типа предоставляет возможность существенно увеличить глубину выгорания делящихся веществ, во много раз повысить плотность потока нейтронов в активной зоне и гарантировать более безопасные условия производства энергии в результате создания вентилями препятствий распространению аварийного процесса от подкритической сборки к реактору.

Представленные в работах [17, 20, 21] результаты расчетов для многосекционных бланкетов однозначно свидетельствуют о значительных преимуществах бланкета с многосекционной структурой при условии обеспечения односторонности нейтронной связи между секциями. Свойство односторонности нейтронной связи при этом оказывается определяющим – без него многосекционность бланкета преимуществ не дает.

В связи с этим возникает несколько вопросов: поскольку идеальной односторонней нейтронной связи добиться невозможно, то с какой точностью

необходимо обеспечить одностороннюю связь? При наличии нейтронной связи между секциями эффективный коэффициент размножения всей системы превышает коэффициенты размножения отдельных секций, а это значит, что при заданной подкритичности каждой секции система может достичь критичности при некотором количестве секций. Третий вопрос связан со вторым: можно ли добиться неограниченного увеличения количества нейтронов в последней секции, если при росте количества секций необходимо уменьшать коэффициент умножения нейтронов каждой секции для сохранения заданной требованиями безопасности подкритичности всей системы? И наконец, как влияют спектральные характеристики каждой секции на способность всей системы к умножению нейтронов?

Эти вопросы проанализированы в работе Феоктистова [22]. Общее заключение этой работы следующее: на основании одnogруппового точечного анализа нельзя сделать однозначного вывода об эффективности многосекционной системы, особенно если учесть возрастающую с ростом количества секций неустойчивость всей системы по отношению к колебаниям мощности первичного источника нейтронов.

В большинстве рассмотренных работ оценки были сделаны на основе точечных моделей либо одnogруппового диффузионного приближения. Хорошо известно, что указанные приближения дают лишь качественные, а в сложных системах иногда и ошибочные результаты. Поэтому для выбора реальной схемы гипотетического исследовательского подкритического реактора целесообразно: 1) ограничиться для дальнейшего исследования двумя секциями как наиболее реальной конструкцией; 2) воспользоваться принципом работы [18], т.е. исследовать двухзонную систему с внутренним бустером на высокообогащенном топливе (до 20 %) с быстрым спектром и внешней тепловой сборкой; 3) провести математическое моделирование эффективности различных методов создания односторонней связи таких систем на основе одного из наиболее точных методов расчета размножающих систем – метода Монте-Карло.

Из анализа, проведенного в статье [21], на данный момент существуют три основных конструктивных варианта практического создания почти полной односторонней связи между секциями.

1. Каскадные системы с пороговым делящимся веществом. В таких системах две активные зоны разделены промежуточным слоем комбинированного (неупругого и упругого) замедлителя - вольфрама, молибдена и тяжелой воды. В

бустере в качестве материала используется пороговое делящееся вещество типа ^{237}Np , ^{240}Pu , ^{234}U и т.п., а в тепловой зоне – обычное (непороговое) делящееся вещество. Таким образом, нейтроны из быстрой зоны свободно попадают в тепловую зону, вызывая там деления, а нейтроны из тепловой зоны, обладающие меньшей энергией, уже не могут вызвать деления в пороговом веществе быстрой зоны. Недостатки таких систем: в течение работы такой системы в результате ядерных превращений изменяется изотопный состав быстрой зоны (теряется пороговость); при возможном разрушении слоя замедлителя наблюдается значительный скачок реактивности; неупругие замедлители обладают достаточно большим сечением радиационного захвата; высокая стоимость порогового делящегося вещества.

2. Каскадные системы с жидкотопливным бустером. Особенностью таких систем является бустер из солевого раствора, в который включено делящееся вещество и поглотители резонансных и тепловых нейтронов (GdF_4 , SmF_4), сечения поглощения нейтронов которыми в данной области очень велики и быстро спадают с ростом энергии нейтронов. Иными словами, в соляном растворе поглощаются все резонансные и тепловые нейтроны из тепловой зоны, но сохраняются все быстрые нейтроны, которые беспрепятственно попадают в тепловую зону. Недостатки: количество делящегося вещества и поглотителя ограничено растворимостью этих веществ в расплавленных солях; как показано в работах [23, 24] добавление указанных поглотителей в бустер является неэффективным способом подавления обратной нейтронной связи. Моделирование данных систем не проводилось в рамках данной работы.

3. Вентильные каскадные системы. Они представляют собой стандартные двухзонные системы (быстрая зона из обогащенного урана и тепловая зона из урана с меньшим обогащением). Подавление нейтронной связи осуществляется слоем поглотителя тепловых нейтронов (например, кадмия), который размещен между быстрой и тепловой зонами. Недостатком такой системы является значительный скачок реактивности при гипотетическом обрушении вентильного слоя.

Для проверки эффективности вышеперечисленных конструктивных вариантов практического создания почти полной односторонней связи между секциями был проведен ряд нейтронно-физических расчетов с помощью нейтронно-физического кода MCNP 4с. Были промоделированы четыре типа систем:

1. Стандартная двухзонная каскадная подкритическая система без целенаправленного подав-

ления обратной нейтронной связи. Бустер такой системы состоит из высокообогащенного металлического урана (15 % по ^{235}U), тепловая зона состоит из менее обогащенного металлического урана (4 % по ^{235}U). Радиус быстрой зоны составляет 16,1 см, радиус всей системы – 45,6 см.

2. Пороговая каскадная подкритическая система, бустер которой состоит из порогового делящегося вещества ^{237}Np , тепловая зона состоит из слабо обогащенного металлического урана (4 % по ^{235}U). Промежуточный слой между зонами – тяжелая вода с толщинами 2, 4, 6 и 8 см, радиус быстрой зоны – 7,6, 7,9, 8 и 8,05 см соответственно, радиус всей системы 31, 29, 32 и 34 см соответственно.

3. Вентильная каскадная подкритическая система, бустер из высокообогащенного металлического урана (15 % по ^{235}U), тепловая зона из менее обогащенного металлического урана (4 % по ^{235}U). Вентильный слой между зонами – кадмий с толщинами 1, 2 и 3 см, радиус быстрой зоны – 17, 17,3 и 17,7 см соответственно, радиус всей системы 45, 57 и 57 см соответственно.

4. Вентильная каскадная подкритическая система, бустер из высокообогащенного металлического урана (15 % по ^{235}U), тепловая зона из менее обогащенного металлического урана (4 % по ^{235}U). Вентильный слой между зонами – кадмий и легкая вода с толщинами по 1, 2 и 3 см, радиус быстрой зоны – 16,6, 17,3 и 18,3 см соответственно, радиус всей системы 50,6, 56,6 и 59 см соответственно.

Для максимально четкого сравнения все вышеуказанные системы моделировались по возможности в аналогичных условиях. Все твэлы имели геометрические характеристики аналогичные твэлам реактора ВВЭР-1000. Топливо в твэлах – металлическое. Теплоноситель быстрой зоны – гелий. Теплоноситель тепловой зоны – легкая вода. Взаимное расположение мишени, быстрой и тепловой зон и отражателя показано на рис. 1. Во всех системах был использован одинаковый уровень подкритичности с эффективным коэффициентом размножения нейтронов $k_{\text{эф}} = 0,97$. Уровень критичности бустера был равен 0,7 для всех систем, уровень критичности тепловой зоны варьировался в зависимости от особенностей различных систем, но так чтобы $k_{\text{эф}}$ всей системы оставался равным 0,97. При моделировании использовался точечный изотропный источник нейтронов с энергией 14 МэВ в центре сборки, на поверхности мишени.

Результаты моделирования стандартной двухзонной системы и пороговой каскадной системы с промежуточным слоем тяжелой воды при различных толщинах промежуточного слоя пред-

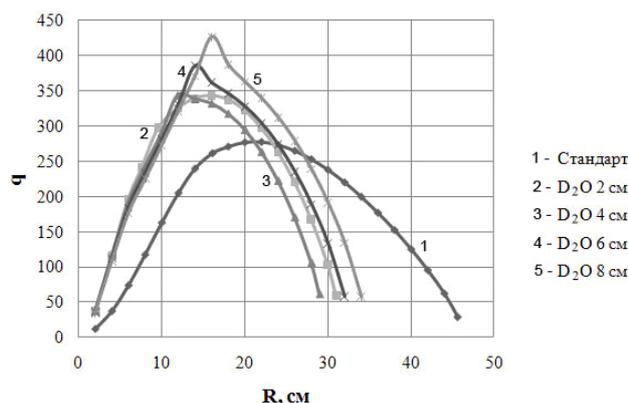


Рис. 10. Коэффициент усиления потока нейтронов в зависимости от радиуса для систем 1 и 2.

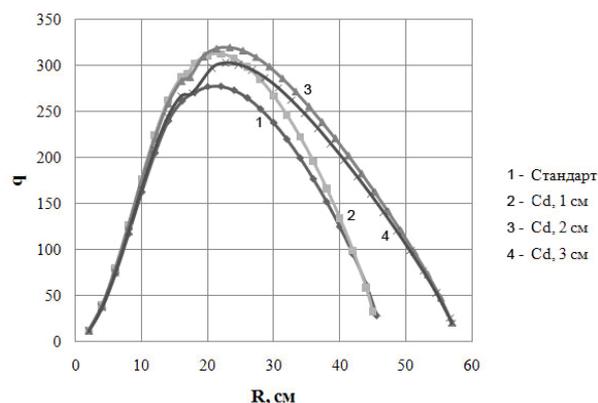


Рис. 11. Коэффициент усиления потока нейтронов в зависимости от радиуса для систем 1 и 3.

ставлены на рис. 10. Результаты моделирования стандартной двухзонной системы и вентильной системы с кадмиевым вентилем при различных толщинах вентильного слоя представлены на рис. 11. Результаты моделирования стандартной двухзонной системы и вентильной системы с вентилем из кадмия и легкой воды при различных толщинах вентильного слоя представлены на рис. 12.

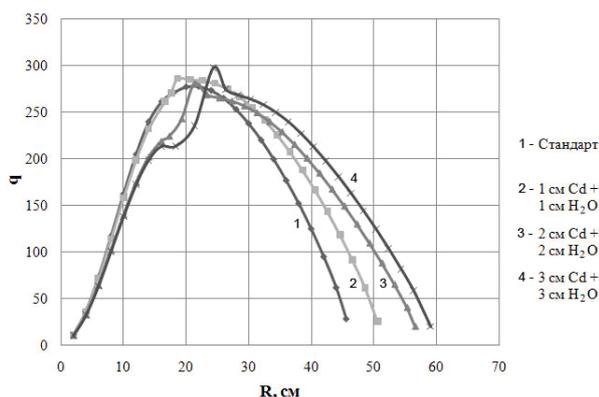


Рис. 12. Коэффициент усиления потока нейтронов в зависимости от радиуса для систем 1 и 4.

Представленный на рисунках коэффициент усиления потока нейтронов внешнего источника определялся как отношение суммарного числа нейтронов, проходящих через выбранную поверхность за единицу времени N_S , к интенсивности источника нейтронов I_0 : $k = N_S/I_0$. Основные показатели моделирования вышеперечисленных систем сведены в таблицу.

Вышеприведенные результаты показывают, что использование вентильного слоя, состоящего из кадмия, приводит к незначительному (на 16 %) увеличению энергетической эффективности тепловой зоны, в то время как поток нейтронов уменьшается по сравнению со стандартной системой (см. рис. 11 и строки 2 - 4 таблицы). Результат в принципе понятен – создание почти односторонней связи приводит к росту количества делений в тепловой зоне, а значит энерговыделения, однако большое количество нейтронов поглощается поглотителем. Эффект усиливается при добавлении замедлителя (легкой воды) в вентильный слой. Энерговыделение в тепловой зоне возрастает на 68 %, а поток нейтронов уменьшается даже по сравнению с вентильным слоем из чистого поглотителя (см. рис. 12 и строки 5 - 7 таблицы). Что касается пороговых каскадных систем, то в случае их применения, можно действительно существенно увеличить эффективность всей системы по сравнению со стандартной, как по энерговыделению, так и по потоку нейтронов (см. рис. 10 и строки 8 - 10 таблицы). Однако практическая реализация такой системы вызывает сомнение, поскольку в бустере использовалось очень дорогое топливо из нептуния (гораздо дороже урана с 15 %-ным обогащением), кроме того, мировые резервы ^{237}Np очень ограничены. Это относится также и к другим пороговым делящимся веществам.

Результаты нейтронно-физического моделирования для всех описанных систем (все величины рассчитаны по отношению к одному нейтрону внешнего источника)

Система	$k_{эф}$	Быстрая зона			Тепловая зона		
		Средний поток, нейтрон/(см ² ·с)	Количество делений	Энерговыделение, МэВ	Средний поток, нейтрон/(см ² ·с)	Количество делений	Энерговыделение, МэВ
Стандартная система	0,97	0,112297	28,2939	4494,88	0,0157272	26,6467	4823,92

Продолжение таблицы

Система	$k_{эф}$	Быстрая зона			Тепловая зона		
		Средний поток, нейтрон/(см ² ·с)	Количество делений	Энерго-выделение, МэВ	Средний поток, нейтрон/(см ² ·с)	Количество делений	Энерго-выделение, МэВ
Вентильная система, Cd 1 см	0,97	0,11766	30,6413	5545,36	0,0189224	26,0035	4707,41
Вентильная система, Cd 2 см	0,97	0,11437	31,1236	5632,61	0,0115047	33,7213	6104,32
Вентильная система, Cd 3 см	0,97	0,105659	31,7356	5743,39	0,010743	31,0683	5624,01
Вентильная система, Cd 1 см и H ₂ O 1 см	0,97	0,107166	30,0645	5440,90	0,0134491	33,6062	6083,35
Вентильная система, Cd 2 см и H ₂ O 2 см	0,97	0,090292	29,3518	5311,98	0,0101947	40,4938	7329,59
Вентильная система, Cd 3 см и H ₂ O 3 см	0,97	0,0834143	30,449	5510,56	0,00954889	44,9015	8127,01
Пороговая система, D ₂ O 2 см	0,97	0,460054	34,5746	6350,31	0,0519805	28,893	5231,18
Пороговая система, D ₂ O 4 см	0,97	0,434285	37,9583	6971,79	0,0560555	25,8622	4682,12
Пороговая система, D ₂ O 6 см	0,97	0,412897	38,1751	7011,62	0,0490937	31,1926	5646,58
Пороговая система, D ₂ O 8 см	0,97	0,392888	37,5749	6901,36	0,0464456	36,7601	6653,91

Целесообразность практического использования вентильных слоев в подкритических системах также вызывает сомнение. В настоящее время считается, что подкритические системы могут быть эффективными при совмещении их функций – энергетический реактор с возможностью трансмутации радиоактивных отходов, исследовательский реактор с широким набором функций. В таких системах высокий поток нейтронов является одной из целей их создания, а введение поглотителя в вентильный слой существенно снижает выход нейтронов.

В итоге приходим к выводу, что хотя теоретические модели использования каскадных подкритических систем с *односторонней* нейтронной связью между зонами и кажутся очень перспективными в результате простого анализа, однако детальный расчет показывает их сравнительно слабую эффективность именно благодаря введению в систему поглотителя, создающего одностороннюю связь.

Выводы

В работе рассмотрено нейтронно-физическое моделирование двухзонной подкритической системы, управляемой мощным нейтронным генератором. Также были промоделированы варианты с возможным повышением эффективности подкритической системы за счет реализации установления преимущественно односторонней нейтронной связи между подкритическими сборками, составляющими каскад. В результате анализа и нейтронно-физического моделирования возможных практических вариантов реализации этой идеи показано, что предлагаемые практические методы осуществления преимущественно односторонней нейтронной связи являются либо недостаточно эффективными, либо сложно осуществимыми с технической и экономической точек зрения.

Основной целью построения подкритических реакторов, кроме полной ядерной безопасности, является получение высоких потоков нейтронов.

С этой точки зрения, по нашему мнению, целесообразно руководствоваться принципом работы [18], т.е. внешний источник нейтронов окружается бустером небольшого размера на высокообогащенном топливе с быстрым спектром, который в свою очередь окружен достаточно большой тепловой зоной без введения вентильного слоя, содержащего поглотителя. Тщательная оптими-

зация размеров и материального состава такого реактора позволит получить достаточно высокие коэффициенты умножения нейтронов внешнего источника. Особенно перспективной такая схема кажется для построения исследовательского реактора, в котором наличие и быстрого, и теплового спектров сочетается с достаточно высоким потоком нейтронов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Accelerator-driven Systems (ADS) and Fast Reactors (FR) in Advanced Nuclear Fuel Cycles* / OECD Nuclear Energy Agency. - Paris, France, 2002.
2. *Lillington J.N. The Future of Nuclear Energy. Chapter 13, Accelerator Driven Systems.* - 2003. - P. 259 - 274.
3. *Бомко В.А., Карнаухов И.М., Лапишин В.И.* Усилитель мощности - основа ядерной энергетики XXI века: Обзор. - Харьков: ННЦ ХФТИ. - 2001. - С. 52.
4. *Babenko V.A., Gulik V.I., Pavlovich V.N., Pupirina E.A.* Research Subcritical reactor // Proc. of the Int. Conf. "Research reactors in 21 century" (Moscow, 20 - 23 June, 2006). - P. 76 - 77.
5. *Бабенко В.О., Гулик В.И., Павлович В.М., Пупіріна О.М.* Двוזонні підкритичні ядерні реактори // Проблеми безпеки атомних електростанцій і Чорнобиля. - 2006. - Вип. 6. - С. 8 - 15.
6. *Babenko V.A., Gulik V.I., Jenkovszky L.L. et al.* On the subcritical neutron amplifier on the basis of enriched uranium // Nuclear Science and Safety in Europe. - 2006. - P. 253 - 263.
7. *Бабенко В.А., Гулик В.И., Павлович В.Н.* Исследовательский подкритический реактор // Ядерная физика та енергетика. - 2008. - № 1(23). - С. 56 - 61.
8. *Voronin G. et al.* Development of the Intense Neutron Generator SNEG-13 // Proc. of the EPAC94 (London, June 27 - July 1, 1994). - Vol. 3. - P. 2678 - 2680.
9. *Sadowski M.J., Scholz M.* Comments on Status of Plasma Focus Research // Proc. of the Int. Workshop on Dense Magnetized Plasmas IWDMP-2003- (Warsaw, Poland, Nov. 25 - 26, 2003).
10. *Harmon C.D. II, Busch R.D., Briesmeister J.F., Forster R. A.* Criticality Calculation with MCNP. A Primer. - Los Alamos, 1994. - (L-I-12827-M).
11. *Briesmeister J.* MCNP General Monte Carlo Code N-Particle Transport Code Version 4C. - Los Alamos, 1994. - (LA-13709-M).
12. *Ратников Е.Ф., Тетельбаум С.Д.* Газы как теплоносители и рабочие тела ядерных энергетических установок. - М.: Атомиздат, 1978. - С. 192.
13. *Hill R.N.* Fuel Cycle Subcommittee: Overview and Status // Fusion-Fission Hybrid Workshop (Gaithersburg, USA, September 30, 2009).
14. *Avery R.* Theory of coupled reactors // Proc. 2nd U.N. Int. Conf. Peaceful Use of Atomic Energy. - United Nations, 1958. - Vol. 12. - P. 182 - 191.
15. *Басов Н.Г., Субботин В.И., Феоктистов Л.П.* Ядерный реактор с лазерным термоядерным источником нейтронов // Вестник Российской Академии наук. - 1993. - Т. 63, № 10. - С. 878 - 884.
16. *Феоктистов Л.П.* Бланкет гибридного реактора // Математическое моделирование. - 1995. - Т. 7, № 3. - С. 41 - 50.
17. *Колесов В.Ф., Гужовский Б.Я.* Повышение эффективности электроядерного трансмутационного устройства за счет многосекционной структуры бланкета // Атомная энергия. - 1994. - Т. 76, вып. 1. - С. 71 - 77.
18. *Daniel H., Petrov Yu.V.* Subcritical fission reactor driven by the low power accelerator // Nucl. Instr. Meth. A. - 1996. - Vol. 373. - P. 131 - 134.
19. *Гулевич А.В., Дьяченко П.П., Зродников А.В., Кухарчук О.Ф.* Связанные реакторные системы импульсного действия. - М.: Энергоатомиздат, 2003.
20. *Гулевич А.В., Земсков Е.А., Кухарчук О.Ф. и др.* Расчетно-экспериментальное обоснование концепции электроядерной системы на базе подкритического реактора с каскадным умножением нейтронов // Тр. регионального конкурса научных проектов в области естественных наук. - Калуга, Россия, 2009. - Вып. 14.
21. *Бзнуни С.А., Барашенков В.С., Жамкоян В.М. и др.* Двухреакторные электроядерные системы с жидкокадмиевым вентилем - Дубна, 2002. - 11 с. - (Препр. / ОИЯИ; P2-2002-105).
22. *Феоктистов Л.П.* Подкритические системы с произвольным энерговыделением // Математическое моделирование. - 2000. - Т. 12, № 2. - С. 27 - 34.
23. *Колесов В.Ф., Хоружий В.Х.* Нейтронные характеристики моделей каскадного двухсекционного бланкета // Атомная энергия. - 2000. - Т. 88, вып. 5. - С. 330 - 337.
24. *Колесов В.Ф., Завьялов Н.В., Иванов И.А. и др.* Экспериментальное исследование моделей каскадного бланкета электроядерного устройства // Атомная энергия. - 2002. - Т. 92, вып. 1. - С. 42 - 50.

В. О. Бабенко, В. І. Гулік, В. М. Павлович

МОДЕЛЮВАННЯ ДВОЗОННИХ ЕЛЕКТРОЯДЕРНИХ СИСТЕМ

Розглянуто нейтронно-фізичне моделювання двозонної підкритичної системи, що керується потужним нейтронним генератором. Також обговорюється принцип каскадності при створенні підкритичних реакторів, використання якого гіпотетично може дозволити суттєво посилити потік нейтронів від зовнішнього джерела. Обго-

ворюються теоретичні передумови принципу каскадності, розглянуто напрями практичної реалізації каскадної підкритичної системи, а саме можливі практичні методи усунення зворотного нейтронного зв'язку між секціями реактора. Представлено та проаналізовано результати нейтронно-фізичного моделювання таких систем за допомогою методу Монте-Карло.

Ключові слова: електроядерна система, підкритична зона.

V. A. Babenko, V. I. Gulik, V. M. Pavlovych

MODELLING OF TWO-ZONE ACCELERATOR-DRIVEN SYSTEMS

Neutron-physical modelings of two-zone subcritical reactor driven by high-intensity neutron generator are considered. The cascade principle in subcritical reactors, the use of which can hypothetically substantially amplify the neutron flux from the external source is discussed in this article. The theoretical preconditions of the cascade principle are discussed, and the directions of practical realization of the cascade subcritical system are considered, namely the possible methods of neutron feedback between reactor sections elimination. The results of Monte Carlo neutron-physical modeling of the cascade subcritical systems are presented and discussed.

Keywords: accelerator-driven systems, subcritical core.

Надійшла 31.05.2012

Received 31.05.2012