

СТАТЬИ

УДК 621.039.573

КИНЕТИКА АПЕРИОДИЧЕСКИХ КАСКАДНЫХ БУСТЕРОВ В АСПЕКТЕ ИХ БЫСТРОДЕЙСТВИЯ И БЕЗОПАСНОСТИ

Колесов В.Ф., Хоружий В.Х. (РФЯЦ—ВНИИЭФ)

В настоящей статье приведены результаты выполненных с помощью программы Монте-Карло расчетов простых сферически-симметричных систем, моделирующих аperiodический бустер. Расчеты преследовали цель наглядной демонстрации особенностей кинетики каскадных реакторных систем и возможностей, привносимых использованием принципа каскадности в аperiodическом бустере в аспекте повышения безопасности и улучшения временных параметров импульсов. Имелась в виду также цель определения материалов замедлителя, наиболее перспективных с точки зрения оптимизации параметров бустера. Основному содержанию статьи предпослана краткая справка об истории каскадных систем.

Каскадные реакторные системы. С 90-х годов прошлого века в печати часто стали обсуждаться двухсекционные ядерные реакторы с односторонней нейтронной связью секций, так называемые каскадные реакторные системы. Реакторную систему можно называть двухсекционной, если ее активная зона состоит из двух частей, чем-то отличающихся одна от другой или разделенных пространственно. Двухсекционные системы с односторонней или преимущественно односторонней связью секций называют каскадными (иногда по аналогии с электрическими цепями их называют диодными). Это тот случай, когда нейтроны одной секции влияют на процессы в другой секции, нейтроны другой секции на процессы в первой секции не влияют. Наиболее важными параметрами каскадных реакторных систем являются собственные коэффициенты размножения нейтронов в первой и второй секциях $k_{\text{эф}1}$, $k_{\text{эф}2}$, во всей системе $k_{\text{эф}}$ и коэффициенты нейтронной связи секций k_{21} , k_{12} .

Первое упоминание о реакторных системах каскадного типа содержится в статье Л. Борста (1957 г.) [1]. Односторонность нейтронной связи секций в модели Л. Борста создавалась экранами из поглотителей нейтронов, устанавливаемыми между секциями. Первоначально предполагалось, что принцип каскадности может быть использован в системах с запальным реактором для достижения более высокого выгорания топлива в подкритических секциях и получения предельно высоких потоков тепловых нейтронов. Вскоре после опубликования указанной статьи последовал отклик на нее со стороны ФЭИ. Появилось сообщение Б.Г. Дубовского [2] о секционированных реакторах, были проведены некоторые расчеты с тем же прицелом, что и в статье Л. Борста, и с неярко выраженным эффектом, затем идея каскадных реакторов была надолго забыта [3].

Идея каскадных реакторов возродилась во ВНИИЭФ в конце 70-х годов в связи с поиском и разработкой конструкций аperiodических импульсных реакторов с возможно более короткими импульсами n -, γ -излучения. В 1979 г. было показано, что значительного укорочения длительности импульса в реакторе можно достичь путем использования двухсекционных систем каскадного типа. Одновременно был предложен способ осуществления односторонней нейтронной связи секций, заключающийся в использовании в качестве активного материала одной из секций ^{237}Np — порогового делящегося вещества, а также в разделении секций промежуточным слоем замедлителя типа вольфрама [4, 5]. Слой вольфрама даже при значительной толщине хорошо пропускает нейтроны, по существу не выводит их из ряда быстрых и, следовательно, не увеличивает существенно время жизни нейтронов в секциях. Вместе с тем этот слой в результате неупругого рассеяния эффективно переводит энергию нейтронов ниже порога деления в нептунии ($\sim 0,5$ МэВ).

После прохождения слоя инертного материала большая часть нейтронов уже не способна вызывать деления в нептунии и вследствие этого выпадает из процесса ядерной цепной реакции в этой секции. Однако эффективность нейтронов, прошедших слой в противоположном направлении и также потерявших значительную часть энергии, по отношению к цепной реакции во второй секции не понижается. Таким образом, в рассматриваемой системе в зависимости от толщины промежуточного слоя действительно можно достигать больших различий в коэффициентах нейтронной связи двух секций и тем самым осуществлять каскадные реакторные системы. Важно при этом, что обсуждаемое устройство, несмотря на наличие в нем слоя инертного вещества, остается системой на быстрых нейтронах с характерным малым временем жизни последних.

Показателем эффективности принципа каскадности применительно к импульсным реакторам и бустерам является отношение ξ длительностей импульсов 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:

$$\xi = T_0/T.$$

Оперативный метод оценки параметров импульсов делений в каскадных бустерах приведен в статье [5]. Для близкого показателю ξ параметра (обозначим его ξ^*) получено следующее выражение:

$$\xi^* = T_2/T = \frac{p_2}{1-p_1} \left(\frac{1+p_1}{1-p_1} \right)^{(1-p_1)/2p_1}; \quad p_1 = \sqrt{1 - \frac{\eta_0 \eta_2 k_{21}}{S_0} p_2^2}; \quad (1)$$

$$p_2 = \frac{2S_0}{\eta_0 \eta_2} \left(\frac{k_{12} \eta_2}{\eta_1} + \frac{k_{21} \eta_1}{\eta_0 \eta_2} + \frac{S_0}{\eta_1} \right)^{-1}; \quad \eta_0 = \frac{\tau_2}{\tau_1}; \quad \eta_1 = v_1 J_1; \quad \eta_2 = v_2 J_2,$$

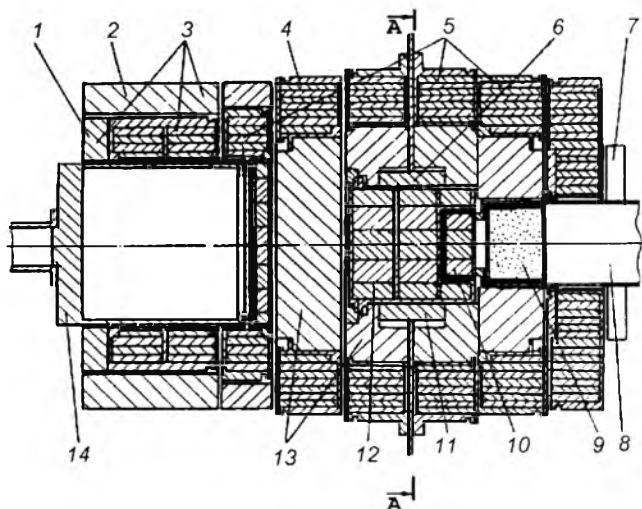
где T_2 — длительность импульса во 2-й секции каскадного бустера; S_0 — число нейтронов источника, представляемого в виде дельта-функции $S(t) = S_0 \delta(t)$ (источник действует или в односекционном бустере, или в первой секции каскадного бустера); k_{jk} ($j, k = 1, 2$) — коэффициент размножения нейтронов в j -й секции, относя-

щийся к нейтронам k -й секции (коэффициент нейтронной связи j -й секции с k -й секцией); ν_j — число нейтронов на акт деления в секции j ; τ_j, J_j — среднее время жизни мгновенных нейтронов и число делений за импульс в секции j соответственно.

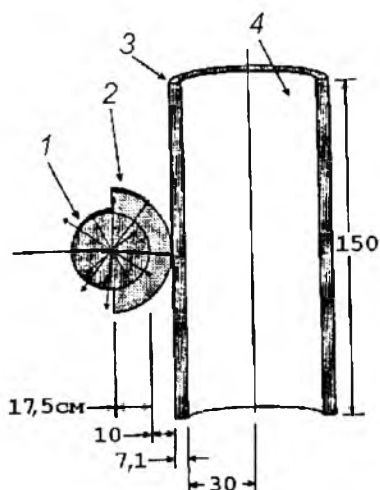
На основании предложения и анализа работ [4, 5] в начале 80-х годов во ВНИИЭФ был разработан проект бустера-реактора «Каскад» (БР-К) с внутренней активной зоной из сплава ^{237}Np с галлием и внешней активной зоной из уран-молибденового сплава [6]. Предполагалось, что БР-К будет действовать в комплексе с сильноточным ускорителем электронов ЛИУ-30 [7], который должен был поставлять в секцию из ^{237}Np $1 \cdot 10^{15}$ первичных нейтронов в импульсе длительностью 20—100 нс. В конструкции БР-К в максимальной степени учтены требования, диктуемые стремлением получить более высокий флюенс нейтронов и дозу γ -излучения за импульс в местах облучения образцов, большой объем мест облучения, а также облегчить доступ к местам облучения образцов. Этими требованиями определен выбор цилиндрической геометрии бустера-реактора, горизонтальной ориентации его оси симметрии, степени обогащения урана во внешней активной зоне, объема и конфигурации внутренней полости (рис. 1).

Коэффициенты нейтронной связи секций в БР-К получены равными $k_{12} = 2,124 \cdot 10^{-3}$, $k_{21} = 0,1661$. Импульсы делений в БР-К в сравнении с импульсами в односекционном устройстве имеют в 7—10 раз меньшую длительность. Преимущество БР-К в сравнении с односекционным устройством проявляется и при работе в режиме импульсного реактора: и в этом случае импульсы в БР-К в сравнении с импульсами односекционного реактора имеют значительно меньшую длительность.

В 90-х годах направление проектирования двухсекционных бустеров получило новый импульс в Сандиевской национальной лаборатории (США). В докладе [8] дано описание концептуального проекта двухсекционного бустера с односторонней нейтронной связью секций, который разработан под влиянием российской публикации [9] и является продолжением работ, проводившихся ранее по программе EDNA. Предполагается, что это устройство будет действовать в комплексе с ускорителем электронов, генерирующим в активной зоне бустера $5 \cdot 10^{15}$ первичных нейтронов в



Р и с. 1. БР-К в осевом разрезе: 1 — отражатель нейтронов; 2, 3 — регулирующий и подвижный блоки второй секции; 4 — аварийный блок; 5 — неподвижные блоки второй секции; 6, 10, 11, 12 — регулирующий, подвижный, импульсный и неподвижный блоки первой секции соответственно; 7 — стоп-блок и импульсный блок второй секции; 8 — канал для проводки тормозного излучения; 9 — замедлитель нейтронов типа ^6LiH ; 13 — вольфрам; 14 — контейнер для облучаемых образцов [6]



Р и с. 2. Схематическое изображение каскадного бустера Сандиевской национальной лаборатории (США) [8]: 1 — первая секция из диоксида нептуния; 2 — промежуточный слой из вольфрама; 3 — вторая секция из диоксида урана 93%-ного обогащения; 4 — экспериментальная полость

ния A , равный отношению чисел делений в каскадном (P) и обычном бланкете (P_0), нормированных на один нейтрон источника со спектром нейтронов деления ^{252}Cf , при условии равенства $k_{\text{эф}}$ того и другого бланкета:

$$A = P/P_0.$$

В первой работе по каскадным бланкетам, посвященной электроядерным установкам [11], среди других данных были приведены найденные из аналитических решений соотношения между параметрами бланкета. С помощью этих соотношений, как и по формулам (1), легко прослеживаются качественные зависимости параметров каскадных систем. Аналитические соотношения, однако, применимы не во всех случаях. Их результаты, например, слишком грубы в применении к системам 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 в настоящее время такие расчеты проводят преимущественно с помощью программы С-95. Программа С-95 [12] является новой версией программ ВНИИЭФ решения методом Монте-Карло уравнений переноса нейтронов и γ -квантов в трехмерных системах с использованием как спектральных, так и групповых констант.

Обширная сводка данных по различным моделям каскадных бланкетов, полученных с помощью программы С-95, содержится в статьях [13, 14].

В прежние годы работы по реакторам каскадного типа велись по существу только во ВНИИЭФ, но в настоящее время они ведутся во многих институтах России и в зарубежных лабораториях. К этой теме проявлен интерес со стороны ИТЭФ и РНЦ «Курчатовский институт», ВНИИТФ, ОИЯИ, Лос-Аламосской и Сандиев-

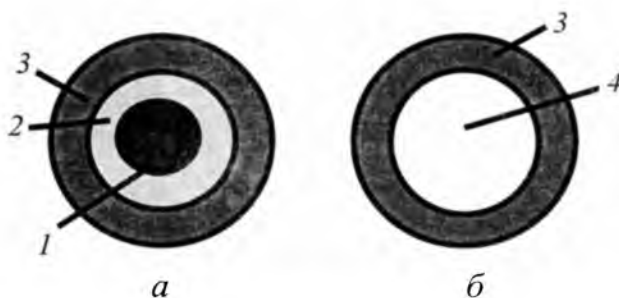
импульсе длительностью 0,1 мкс и представляющим собой усовершенствованную версию ускорителя HERMES III [10].

Схематическое изображение этого бустера показано на рис. 2. Ширина импульса делений в первой активной зоне ~ 2 мкс, во второй ~ 20 мкс. По мнению авторов проекта [8], этот каскадный бустер удовлетворяет требованиям к импульсному источнику излучения будущего поколения, ориентированному на проведение исследований по радиационной стойкости.

В 1993 г. во ВНИИЭФ принцип каскадных реакторных систем был естественным образом распространен на стационарные энергетические системы, а именно на электроядерные установки [11]. Было показано, что использование в электроядерной установке бланкета каскадного типа предоставляет возможность существенного снижения мощности ускорителя протонов. В качестве показателя эффективности принципа каскадности применительно к бланкетам электроядерных установок принимается коэффициент каскадного усиления

ской национальных лабораторий (США). К настоящему времени разработаны концептуальные проекты электроядерных устройств с бланкетами каскадного типа, в том числе бланкет в составе малогабаритного водо-водяного транспортного реактора АБВ типа ВВР мощностью 50 МВт и подкритической сборки из диоксида ^{237}Np (ВНИИЭФ и ОКБМ), бланкеты на расплавленной соли (РНЦ «Курчатовский институт») и тяжелой воде (ИТЭФ) [3, 15—20]. В июльском (2001 г.) выпуске журнала «Атомная энергия» содержится обзорная статья о возможностях совершенствования электроядерных установок [3]. В статье идея каскадных реакторов названа технически революционной.

Исследуемые модели каскадного бустера. Рассматривались простые сферически-симметричные модели каскадных и односекционных бустеров (рис. 3). Односторонность нейтронной связи секций в каскадных сборках создавалась в результате применения в первой (внутренней) секции металлического ^{237}Np — порогового делящегося вещества. Металлический уран 90%-ного обогащения по ^{235}U являлся материалом второй секции. Две секции в каскадных сборках разделяли слоем вольфрама, молибдена, висмута, свинца, ^{208}Pb и алюминия. Вторая секция, немного увеличенная по массе, использовалась также в роли односекционной системы. В центрах как каскадных, так и односекционныхборок действовал мгновенный импульсный источник нейтронов со спектром деления.



Р и с. 3. Простейший пример каскадного (а) и односекционного бустера (б): 1 — металлический ^{237}Np ; 2 — металлический замедлитель нейтронов; 3 — металлический уран 90%-ного обогащения по ^{235}U ; 4 — полость

С помощью расчетов подбирали размерыборок, приблизительно соответствующие заданному полному коэффициенту размножения нейтронов в сборках ($k_{\text{эф}}$) и удовлетворяющие условию близости коэффициентов размножения нейтронов во внутренней ($k_{\text{эф}1}$) и внешней секции ($k_{\text{эф}2}$). На каждом этапе подбора конфигурации конкретной сборки рассчитывали $k_{\text{эф}}$, $k_{\text{эф}1}$, $k_{\text{эф}2}$, k_{21} и k_{12} . Для окончательно подобранной сборки, кроме этих величин, рассчитывали также числа первичных делений S_1 , S_2 и полные числа делений P_1 , P_2 во внутренней и внешней секциях, нормированные на один нейтрон источника. Определяли и сумму $S = S_1 + S_2$ и $P = P_1 + P_2$. Числа первичных делений S_1 , S_2 , S могут быть полезны при оценке вклада в коэффициент ξ специфических эффектов размножения нейтронов в сборках [13].

Для односекционныхборок рассчитывали размеры, соответствующие тем же, что и в каскадных системах, заданным значениям $k_{\text{эф}}$ или тем же полным числам делений P ($(k_{\text{эф}})_0 = k_{\text{эф}}$ или $P_0 = P$), а также числа первичных делений S_0 . Одновременно рассчитывали импульсы делений в каскадных и односекционныхбороках, а именно временные распределения чисел вылетевших изборок нейтронов. По ним находили длительность импульсов, определенную как временная метка вылета 70% нейтронов утечки (обычно используемое понятие ширины импульса на половине высоты в данном случае малопредставительно). Указанные расчетные данные позволили провести сравнение $\Delta k_{\text{эф}}$ и длительности импульсов в каскадных и односекционныхбороках при одинаковых полных числах делений. Плотность непутия

Таблица 1. Нейтронные параметры каскадного и односекционного бустеров при использовании в качестве замедлителя слоя вольфрама толщиной 10 см

Тип бустера и замедлителя	Внутренний и внешний радиус зон бустера, см	$\Delta k_{эф}, \Delta k_{эф2}, \Delta k_{эф} (\Delta k_{эф})_0$	k_{21}, k_{12}	$S_1, S_2, S, S_0,$ дел./нейтр.	$P_1, P_2, P, P_0,$ дел./нейтр.	$T, T_0,$ мкс, число нейтронов утечки	При $P = P_0$ $\Delta k_{эф}/(\Delta k_{эф})_0,$ $\xi = T/T_0$
Каскадный, вольфрам	№ 0—7,2, W 7,2—17,2, U 17,2—21,075	0,08, 0,11, 0,03	0,4, 0,0098	0,41, 0,102, 0,512	13, 47,5, 60,5	0,55, 72,5	5,3, 5,7
Односекционный	U 17,2—21,246	0,031	—	0,32	10,6	0,52, 17	
Каскадный, вольфрам	U 17,2—21,405	0,0059	—	0,332	58,1	3,0, 88,1	
Односекционный	№ 0—7,2, W 7,2—17,2, U 17,2—21,3	0,08, 0,076, 0,014	0,42, 0,0098	0,409, 0,106, 0,515	20,9, 115,3, 136,2	1,05, 167	4,7, 6
Каскадный, свинец	U 17,2—21,35 U 17,2—21,426 № 0—6,4, Pb 6,4—16,4, U 16,4—19,9	0,014 0,0028 0,041, 0,047, 0,015	— — 0,576 0,0288	0,328 0,333 0,384, 0,153, 0,537	23,2 139 19,6, 77,7, 97,3	1,09, 35,7 6,2, 209 0,989, 4,47, 143,9	4,36, 4,52

и урана в сборках принимали равной 20,45 и 18,7 г/см³, вольфрама, молибдена, висмута, свинца и алюминия — 19,35, 10,2, 9,79, 11,34 и 2,7 г/см³ соответственно.

Результаты расчетов. Наглядная демонстрация особенностей кинетики каскадных реакторных систем и возможностей, привносимых использованием принципа каскадности в аperiодическом бустере в аспекте повышения безопасности и улучшения временных параметров импульсов, проведена на примере каскадной системы с вольфрамовым замедлителем толщиной 10 см. Данные расчета этой системы представлены в табл. 1—3 и на рис. 4. В табл. 1 приведены параметры указанной системы при $k_{эф} = 0,97$ и $0,986$ ($\Delta k_{эф} = 0,03$ и $0,014$) и односекционной системы при тех же значениях $(k_{эф})_0$ и значениях $(k_{эф})_0$, соответствующих случаю приближительного равенства полных чисел делений в каскадной и односекционной сборках. В табл. 2, 3 представлено временное распределение чисел нейтронов, вылетающих из сборок, длительность импульсов, а также полное число делений и нейтронов утечки, нормированное на один нейтрон источника. На рис. 4 показана зависимость от времени интенсивности делений в представленных в табл. 3 импульсах в каскадном и односекционном бустерах.

Как видно из табл. 1—3 и рис. 4, рассматриваемая двухсекционная сборка является каскадной. Отношение коэффициентов нейтронной связи k_{21}, k_{12} в ней равно примерно 40. В условиях фиксированного значения $k_{эф}$ эта сборка в сравнении с односекционной позволяет генерировать импульсы в 5,8 раза большие по выходу делений, в условиях фиксированного выхода делений — примерно во столько же раз более короткие по длительности (показатель ξ).

Таблица 2. Временные параметры каскадной сборки при $k_{\text{эф}} = 0,97$ и односекционной сборки при $(k_{\text{эф}})_0 = 0,969$ или $0,9941$

Сборка	Каскадная $k_{\text{эф}1} = 0,92; k_{\text{эф}2} = 0,89; k_{\text{эф}} = 0,97;$ $k_{21} = 0,4; k_{12} = 0,0098$	Односекционная	
		$(k_{\text{эф}})_0 = 0,969$	$(k_{\text{эф}})_0 = 0,9941$
Внутренний и внешний радиус, см:			
нептуниевая секция	0 — 7,2		
слой вольфрама	7,2 — 17,2		
урановая секция	17,2 — 21,075	17,2—21,246	17,2—21,405
Число нейтронов, вылетающих из сборок во временных интервалах, мкс:			
0—0,001	0	0	0
0,001—0,002	0	0	0
0,002—0,004	0	0,00019	0,00016
0,004—0,006	0,0012	0,0269	0,0251
0,006—0,01	0,0160	0,264	0,253
0,01—0,02	0,181	0,671	0,678
0,02—0,04	1,16	0,850	0,906
0,04—0,06	2,01	0,727	0,806
0,06—0,1	5,29	1,29	1,53
0,1—0,2	13,6	2,65	3,61
0,2—0,4	19,7	3,76	6,69
0,4—0,6	12,1	2,41	6,22
0,6—1	11,9	2,53	11,1
1—2	6,08	1,59	20,0
2—4	0,508	0,186	21,3
4—6	0	0	9,58
6—10	0	0	5,01
10—20	0	0	0,403
20—40	0	0	0
40—60	0	0	0
Полное число за импульс на один нейтрон источника:			
нейтронов утечки	72,5	17	88,1
делений	60,5	10,6	58,1
Длительность импульса, мкс	0,55	0,52	3,0

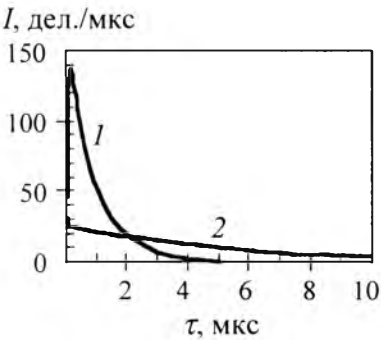
Существенно также, что в условиях фиксированного выхода делений глубина подкритичности каскадной сборки в приведенных здесь конфигурациях примерно в 5 раз больше глубины подкритичности односекционной сборки. Этот факт с полным основанием можно трактовать как очевидное свидетельство повышенной безопасности каскадного бустера.

Неожиданной особенностью показателя ξ и отношения $\Delta k_{\text{эф}}/(\Delta k_{\text{эф}})_0$ каскадной сборки является их полное совпадение при $k_{\text{эф}} 0,97$ и $0,986$. Эта особенность связана с ограниченной степенью каскадности двухсекционной сборки. При более высоких значениях отношения коэффициентов связи k_{21}/k_{12} преимущество сборки при $k_{\text{эф}} = 0,986$ было бы существенно более выраженным.

В целях сравнения в табл. 1 приведены также параметры каскадной системы со свинцовым замедлителем толщиной 10 см.

Таблица 3. Временные параметры каскадной сборки при $k_{эф} = 0,986$ и односекционной сборки при $(k_{эф})_0 = 0,986$ или $0,9972$

Сборка	Каскадная $k_{эф1} = 0,920; k_{эф2} = 0,924;$ $k_{эф} = 0,986;$ $k_{21} = 0,420; k_{12} = 0,0098$	Односекционная	
		$(k_{эф})_0 = 0,986$	$(k_{эф})_0 = 0,9972$
Внутренний и внешний радиус, см: нептуниевая секция слой вольфрама урановая секция	0—7,2 7,2—17,2 17,2—21,3	17,2—21,35	17,2—21,426
Число нейтронов, вылетающих из сборки во временных интервалах, мкс:			
0—0,001	0	0	0
0,001—0,002	0	0	0
0,002—0,004	0,00001	0,0002	0,00021
0,004—0,006	0,00117	0,026	0,0242
0,006—0,01	0,0154	0,257	0,254
0,01—0,02	0,171	0,677	0,679
0,02—0,04	1,15	0,886	0,920
0,04—0,06	2,11	0,780	0,832
0,06—0,1	5,84	1,43	1,58
0,1—0,2	16,8	3,22	3,77
0,2—0,4	29,8	5,40	7,24
0,4—0,6	23,6	4,42	6,95
0,6—1	33,1	6,46	13,2
1—2	37,5	7,98	30,0
2—4	15,2	3,66	45,9
4—6	1,37	0,382	31,3
6—10	0,168	0,084	34,3
10—20	0	0	26,3
20—40	0	0	5,39
40—60	0	0	0,0018
Полное число за импульс на один нейтрон источника:			
нейтронов утечки	167	35,7	209
делений	136	23,2	139
Длительность импульса, мкс	1,05	1,09	6,2



Р и с. 4. Импульсы делений в каскадном (1) и односекционном бустере (2) при приблизительно равных полных числах делений, нормированный на один нейтрон источника ($k_{эф} = 0,986, (k_{эф})_0 = 0,9972$; полное число делений равно 136 и 139 дел.нейтр.⁻¹ соответственно)

В табл. 4 приведены результаты расчетов для сборок, отличающихся от представленных в табл. 1 большей (равной 20 или 15 см) толщиной слоя замедлителя нейтронов и использованием в качестве последнего не только вольфрама и свинца, но и четырех других металлических материалов, а также комбинации двух замедлителей. Сравнивались параметры импульсов делений в каскадных бустерах, генерируемых при $\Delta k_{эф} = \sim 0,03$, и импульсов в односекционных бустерах с теми же полными числами делений.

Как видно из табл. 4, двухсекционные бустеры с каждым из рассмотренных замедлителей нейтронов являются существенно каскадными, а общие свойства

Т а б л и ц а 4. Нейтронные параметры каскадного и односекционного бустеров при использовании в качестве замедлителя слоев вольфрама, молибдена, висмута, свинца, ^{208}Pb и алюминия (толщина слоя замедлителя 20 см)

Тип бустера и замедлителя	Внутренний и внешний радиус зон бустера, см	$\Delta k_{\text{эф1}}, \Delta k_{\text{эф2}}, \Delta k_{\text{эф}} (\Delta k_{\text{эф}})_0$	k_{21}, k_{12}	S_1, S_2, S, S_0 , дел./нейтр.	P_1, P_2, P, P_0 , дел./нейтр.	T, T_0 , мкс, число нейтронов утечки	При $P = P_0$ $\Delta k_{\text{эф}}/(\Delta k_{\text{эф}})_0$, $\xi = T/T_0$
Каскадный, вольфрам	Np 0—7,6, W 7,6—27,6, U 27,6—31,85	0,048, 0,039, 0,03	0,176, 0,00088	0,423, 0,043, 0,466	14,9, 67,2, 82,1	0,9, 86,6	7,2, 6,7
Односекционный	U 27,6—31,537	0,0043	—	0,318	79,8	5,9, 120,6	—
Каскадный, молибден	Np 0—7,05, Mo 7,05—27,05, U 27,05—30,98	0,062, 0,058, 0,031	0,343, 0,0024	0,176, $4 \cdot 10^{-5}$, 0,176	11,82, 70,98, 82,8	0,99, 101	8,3, 6,2
Односекционный	U 27,05—30,998	0,0038	—	0,319	81,8	6,1, 124	—
Каскадный, висмут	Np 0—6,8, Bi 6,8—26,8, U 26,8—30,17	0,113, 0,123, 0,031	0,571, 0,013	0,396, 0,15, 0,546	10,9, 51,4, 62,3	0,88, 92	5,4, 5
Односекционный	U 26,8—30,742	0,0058	—	0,318	61,7	4,4, 93,4	—
Каскадный, свинец	Np 0—6,6, Pb 6,6—26,6, U 26,6—30,03	0,108, 0,111, 0,03	0,578, 0,011	0,395, 0,153, 0,548	10,4, 55,2, 65,6	0,58, 96,23	6,1, 8
Односекционный	U 26,6—30,55	0,005	—	0,319	64,0	4,54, 96,9	—
Каскадный, ^{208}Pb	Np 0—6,5, ^{208}Pb 6,5—26,5, U 26,5—29,91	0,117, 0,116, 0,031	0,58, 0,013	0,391, 0,154, 0,545	9,76, 50,04, 59,8	0,54, 88,95	5,5, 7,9
Односекционный	U 26,5—30,447	0,0059	—	0,319	57,4	4,1, 87	—
Каскадный, алюминий	Np 0—7,05, Al 7,05—27,05, U 27,05—30,41	0,111, 0,111, 0,031	0,614, 0,01	0,399, 0,158, 0,557	10,9, 61,7, 72,6	1,14, 104,6	7, 4,6
Односекционный	U 27,05—30,994	0,0046	—	0,319	69,4	5,04, 105	—
Каскадный, вольфрам + свинец	Np 0—7,4, W 7,4—17,4, Pb 17,4—27,4, U 27,4—31,14	0,061, 0,069, 0,031	0,347, 0,00325	0,415, 0,087, 0,502	13,2, 66,8, 80	0,94, 5,77, 102,5	7,67, 6,11
Каскадный, вольфрам	Np 0—7,4, W 7,4—22,4, U 22,4—26,55	0,06, 0,057, 0,03	0,286, 0,00285	0,415, 0,072, 0,487	12,4, 62,1, 74,5	0,74, 4,4, 84,5	6,81, 5,98
Каскадный, свинец	Np 0—6,4, Pb 6,4—21,4, U 21,4—24,85	0,131, 0,127, 0,031	0,583, 0,0164	0,388, 0,155, 0,543	9,5, 44,4, 53,9	0,74, 3,31, 79,8	4,99, 4,5

этих бустеров такие же, как у систем, представленных в табл. 1—3. При одинаковых полных числах делений нейтронные импульсы в каскадном бустере в сравнении с импульсами в односекционном бустере генерируются в условиях существенно более глубокой подкритичности и имеют во много раз меньшую длительность. Два указанных свойства каскадных бустеров неразрывно связаны. Можно сказать, что импульсы делений в каскадном бустере именно потому имеют меньшую длительность, что генерируются при более глубокой подкритичности. Данные табл. 4 и их сравнение с данными табл. 1 показывают также, что степень каскадности сборок повышается с увеличением толщины слоя замедлителя (в случае замедлителя из вольфрама отношение коэффициентов связи секций k_{21}/k_{12} при толщине слоя замедлителя 20 см равно 200 вместо ~ 40 при толщине 10 см). Однако при большой толщине замедлителя начинает существенно сказываться паразитный захват нейтронов в замедлителе, приводящий к подавлению коэффициента связи k_{21} и снижению скорости возрастания показателя эффективности бустера ξ . Это обстоятельство в наибольшей степени влияет на показатели системы с вольфрамом ввиду высокого в вольфраме уровня радиационного захвата нейтронов. Значение показателя ξ в бустере с вольфрамовым слоем толщиной 15 и 20 см лишь незначительно превышает значение ξ в бустере с вольфрамом толщиной 10 см.

При толщине 10—15 см вольфрам в качестве замедлителя нейтронов в каскадных бустерах явно превосходит другие материалы. Но при большой толщине он, по-видимому, уже не является оптимальным. Как видно из табл. 4, при толщине замедлителя 20 см наиболее высокое значение параметра ξ (8) достигается в бустере со свинцом, наибольший выигрыш по глубине подкритичности — в бустере с молибденом (8,3). Замедлитель в виде комбинации слоев вольфрама и свинца суммарной толщиной 20 см не имеет преимуществ в сравнении с монозамедлителями той же толщины.

Следует отметить, что помимо отраженного в табл. 4 сравнения параметров бустеров при условии $P = P_0$ проводилось также сравнение этих параметров при условии равенства чисел нейтронов утечки. Данные сравнения не отличаются от представленных в табл. 4. Проводилось также сравнение показателей P/P_0 и T/T_0 при условии равенства подкритичности $\Delta k_{\text{эф}}$ и $(\Delta k_{\text{эф}})_0$. Результат сравнения примерно такой же, что и для системы, представленной в табл. 1—3.

Работа выполнена в рамках проекта МНТЦ № 1932.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Borst L. The convergatron, a neutron amplifier. — Phys. Rev., 1957, v. 107. № 3, p. 905—906.
2. Дубовский Б.Г. Секционированные реакторные системы. — Атомная энергия, 1959, т. 7, вып. 5, с. 456—457.
3. Киселев Г.В. Возможности усовершенствования характеристик электроядерных установок. — Там же, 2001, т. 91, вып. 1, с. 54—63.
4. Колесов В.Ф., Малинкин А.А. Двухкаскадный умножитель нейтронов. Авт. свидет. 786619. — Бюл. изобрет., 1991, № 30, с. 240 (приоритет от 17.07.1979 г.).
5. 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.
6. Павловский А.И., Малинкин А.А., Колесов В.Ф. и др. Двухсекционный бустер-реактор «Каскад» (БР-К). — Там же, 1992, вып. 3, с. 3—11.

7. Босамыкин В.С., Кошелев А.С., Герасимов А.И. и др. Высокоинтенсивный источник нейтронов на базе мощного ускорителя электронов ЛИУ-30 и импульсного ядерного реактора БР-1. — In: Advanced Pulsed Neutron Sources: Physics of/at Advanced Pulsed Neutron Sources, PANS-2. 14—17 June 1994; Дубна. ОИЯИ, 1995. с. 114—121.
8. Griffin P., Miller J., Harms G. e.a. Design trade-off study for a large volume short pulse neutron assembly. — In: Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors. Proc. Intern. Topical Meeting on Physics, Safety, and Applications of Pulse Reactors, Washington, D.C., November 13—17, 1994. p. 292—299.
9. Kolesov V.F., Malinkin A.A. The two-section pulsed reactor with asymmetrical neutron coupling between sections. — In: Proc. Intern. Workshop on Pulsed Advanced Neutron Sources. Dubna, 25—27 June 1991. Препринт № ДЗ-92-76, Дубна, ОИЯИ, 1992. с. 6—15.
10. Sanford T., Lorence I., Halbleib J. e.a. Photoneutron production using bremsstrahlung from the 14 TW pulsed-power HERMES III electron accelerator. — Nucl. Sci. Engng. 1993, v. 114, № 3, p. 190—213.
11. Колесов В.Ф., Гужовский Б.Я. О возможности повышения эффективности электроядерного трансмутационного устройства на базе перехода к многосекционной структуре blankets: Препринт ВНИИЭФ 2793, 1993.
12. Кочубей Ю.К., Житник А.К., Артемьева Е.В. и др. Программа С-95. Моделирование совместного переноса нейтронов и γ -квантов методом Монте-Карло. — Вопросы атомной науки и техники. Сер. Математическое моделирование физических процессов, 2000, вып. 2, с. 49—52.
13. Колесов В.Ф., Хоружий В.Х. Нейтронные характеристики моделей каскадного двухсекционного blankets. — Атомная энергия, 2000, т. 88, вып. 5, с. 330—337.
14. Колесов В.Ф., Завьялов Н.В., Иванов И.А. и др. Экспериментальное исследование моделей каскадного blankets электроядерного устройства. — Там же, 2002, т. 92, вып. 1, с. 42—50.
15. Abalin S.S., Alexeev P.N., Menshikov L.I. e.a. Conception of electron beam-driven molten-salt ultimate safety reactor. — In: Intern. Conf. on Accelerator-Driven Transmutation Technologies and Applications. Las Vegas, NV, 1994. Woodbury, New York, 1995, p. 527—534.
16. 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.
17. Герасимов А.С., Киселев Г.В. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт). — Физика элементарных частиц и атомного ядра, 2001, т. 32, вып. 1, с. 143—188.
18. Барзилов А.П., Гулевич А.В., Кухарчук О.Ф. и др. Подкритическая реакторная система с каскадным умножением нейтронов. — Известия вузов. Ядерная энергетика, 1997, № 2, с. 59—66.
19. Воинов А.М., Воинов М.А., Воронцов С.В. и др. Расчетно-теоретическая и конструкторская проработка физического макета двухкаскадного blankets для электроядерного реактора. — В сб.: Второй научный семинар памяти В.П. Саранцева. Дубна, 23—24 сентября 1997 г., Дубна, Д9-98-153. 1998. с. 69—76.
20. Барашенков В.С., Шелаев И.А. Электроядерные усилители энергии с низкоэнергетическими пучками протонов. — Атомная энергия, 1998, т. 85, вып. 5, с. 409—411.

Поступила в Редакцию 12.08.02

УДК 621.039:33

ПРОЕКТНЫЙ КИУМ КАК ПОКАЗАТЕЛЬ ЭФФЕКТИВНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ УСТАНОВЛЕННОЙ МОЩНОСТИ АЭС

Сигал Е.М. (ВНИИАЭС)

При оценке эффективности использования установленной мощности АЭС с энергоблоками определенного типа как при технико-экономическом обосновании проектов АЭС, так и при анализе эффективности работы действующих станций в настоящее время широко применяется проектный коэффициент использования