

УДК 621.039. 512:621.039.514

# Развернутые эксперименты на подкритических сборках каскадных реакторных систем

**Н. В. Завьялов, Р. И. Илькаев,  
В. Ф. Колесов, И. А. Иванин,  
А. К. Житник, М. И. Кувшинов,  
Ю. Я. Нефёдов, В. Т. Пунин,  
А. В. Тельнов, В. Х. Хоружий**

*Приведены результаты трех серий экспериментов на уран-нептуниевых каскадных сборках, выполненных в ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ в 2003–2004 гг. Эксперименты подтвердили теоретические заключения о положительных свойствах каскадных бланкетов и эффективности нептуния-237 в качестве средства достижения односторонней связи секций.*

## *Введение*

Реактор можно называть связанным (двухсекционным), 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. 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.

Реакторы каскадного типа известны с 1950-х гг. [1]. Значительный интерес к этим устройствам, наблюдаемый с 1980-х гг., вызван предоставляемыми ими возможностями существенного улучшения параметров импульсных реакторов и реализуемости электроядерных установок (ЭЛЯУ).

В разработку концепции каскадных реакторных систем значительный, можно сказать, основополагающий вклад внесен сотрудниками Института ядерной и радиационной физики (ИЯРФ) РФЯЦ-ВНИИЭФ. Участие ИЯРФ в этих работах выразилось [2]:

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 – пороговое делящееся вещество. Как оказалось, использование в реакторе принципа каскадности открывает возможность многократного сокращения длительности импульсов;

2) в распространении принципа каскадности на бланкеты ЭЛЯУ, т. е. на подкритические реакторы, действующие в комплексе с мощным ускорителем протонов. Одно из главных препятствий на пути реализации ЭЛЯУ – слишком высокие требования к мощности ускорителя. Было показано,

что использование в ЭЛЯУ blankets каскадного типа предоставляет возможность многократного снижения мощности ускорителя протонов.

Отметим, что за единичными исключениями до 2003 г. все работы по каскадным системам были расчетно-теоретическими или проектными. Имелось лишь несколько реальных систем, которые можно отнести к разряду каскадных. Такими системами являлись, например, сборка Аргоннской национальной лаборатории [3], стенды УКС-1М и «Б» ФЭИ [4]. Но эксперименты, ориентированные на изучение свойств собственно каскадных реакторов, на их сравнение со свойствами аналогичных односекционных систем, ранее не проводились.

Постановка таких экспериментов была запланирована во ВНИИЭФ в рамках работ по проектам МНТЦ № 909В и № 1486 [5]. Предполагалось, что опыты будут направлены, прежде всего, на подтверждение действенности использования  $^{237}\text{Np}$  в качестве средства создания односторонней связи секций и проверку преимуществ каскадного blankets в части понижения требований к мощности ускорителя. В 2003–2004 гг. были выполнены три серии таких экспериментов на подкритических уран-нептуниевых каскадных и соответствующих им односекционных моделях blankets [6]:

1) на компактных моделях из металлического нептуния-237 и урана-235 с использованием изотопного источника нейтронов, размещаемого в центре моделей;

2) на таких же моделях с использованием в качестве источника нейтронов ускорителя электронов ЛУ-50;

3) на моделях с первым каскадом из металлического нептуния-237 и вторым каскадом в виде гетерогенной композиции из таблеток урана-235 и фторидных соединений с использованием изотопного источника нейтронов.

В указанных экспериментах особый интерес проявлен к сборкам с низким, равным  $\sim 0,6$ , значением  $k_{эф}$ . Конструкция этихборок проста и компактна, они содержат сравнительно небольшое количество делящихся веществ и заведомо, без принятия специальных мер защиты, удовлетворяют требованиям ядерной безопасности. Расчеты ядерно-физических характеристикборок с низкими значениями  $k_{эф}$  подтвердили их приемлемость в качестве моделей для намеченных экспериментов [7]. Было показано, что отличие эффективности моделей обычных и каскадных blankets в этом случае невелико, но тем не менее достаточно, чтобы быть зафиксированным в эксперименте.

Измерения и первичная обработка экспериментальных результатов сопровождалась всесторонними расчетами с использованием программы С-95 [8]. Уже при подготовке экспериментов были проведены многочисленные расчеты модельныхборок, учитывающие возможность их реализации путем использования имеющихся во ВНИИЭФ деталей (или заготовок) из нептуния и обогащенного урана.

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

$$A = P/P_0.$$

Основной целью опытов было измерение или оценка на основе экспериментальных данных полных чисел делений в каскадной и соответствующей ей односекционной моделях при условии одного и того же источника нейтронов и одинаковых значений  $k_{эф}$  в обеих моделях. По этим данным вычисляли коэффициент каскадного усиления  $A$ , важность которого определяется тем, что именно в  $A$  раз можно снизить мощность ускорителя частиц при переходе к blankets каскадного типа.

**1-й эксперимент.** В качестве лабораторных моделей для проведения 1-го эксперимента были выбраны сферические сборки из металлического  $^{237}\text{Np}$  и урана 90 %-го обогащения по  $^{235}\text{U}$ . Нептуний размещали в центре сборок, уран – на периферии. Пространство между нептунием и ураном заполняли полиэтиленом или оставляли пустым. В центре сборок помещали точечный источник нейтронов с делительным спектром (рис. 1). В качестве источника нейтронов использовали  $^{252}\text{Cf}$ .

В целях сравнения значений коэффициента  $A$  в каскадных бланкетах с различными способами обеспечения односторонности связи секций была изучена также модель, в которой между первой и второй секциями из урана располагали слои из кадмия и полиэтилена. Слой кадмия прилегал к наружной поверхности первой секции. Всего в эксперименте было исследовано 11 разноразличных сборок.

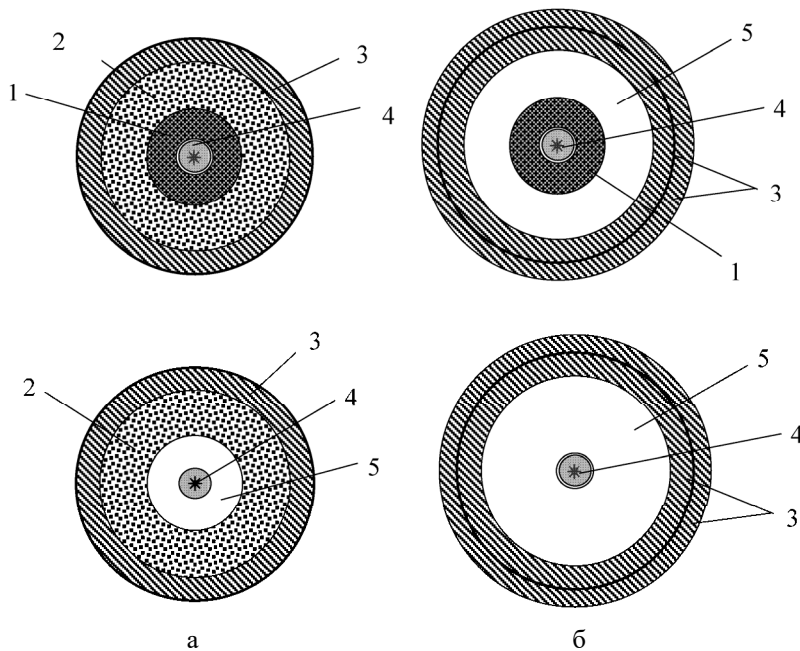


Рис. 1. Схематическое изображение каскадных моделей бланкета, содержащих  $^{237}\text{Np}$ , и соответствующих односекционных моделей [6]: а – модели со слоем замедлителя; б – модели без замедлителя (1 –  $^{237}\text{Np}$ , 2 – полиэтилен, 3 – высокообогащенный уран, 4 – источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , 5 – воздух)

Состав и размеры этих сборок в несколько идеализированном виде представлены на рис. 2. Реально сферические слои состоят из полусфер. Каждая урановая полусфера имеет медно-никелевое покрытие общей толщиной  $\sim 50$  мкм. Полусферы из нептуния заварены в герметичные чехлы из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм. Между полусферами из нептуния по экватору размещалась алюминиевая камера с трековыми детекторами. В одной нептуниевой и во всех урановых полусферах имелись полюсные отверстия диаметром 12 и 27 мм соответственно. Для обеспечения изотропии вылетающих из источника нейтронов ампулу с  $^{252}\text{Cf}$  размещали в шаре из чистого железа диаметром 28 мм.

Эксперименты проводили на стенде для критических сборок ФКБН-2М [9]. В опытах измеряли распределение числа делений по радиусу слоев из нептуния и урана в первых шести сборках, представленных на рис. 2. Этим основным измерениям предшествовали отличающиеся высокой точностью вспомогательные измерения коэффициентов умножения нейтронов центрального источника во всех 11 сборках. Хотя эти измерения и не привносят данных для непосредственного

определения коэффициентов каскадного усиления, однако они информативны в аспекте проверки используемых в расчетах математических программ и нейтронных констант.

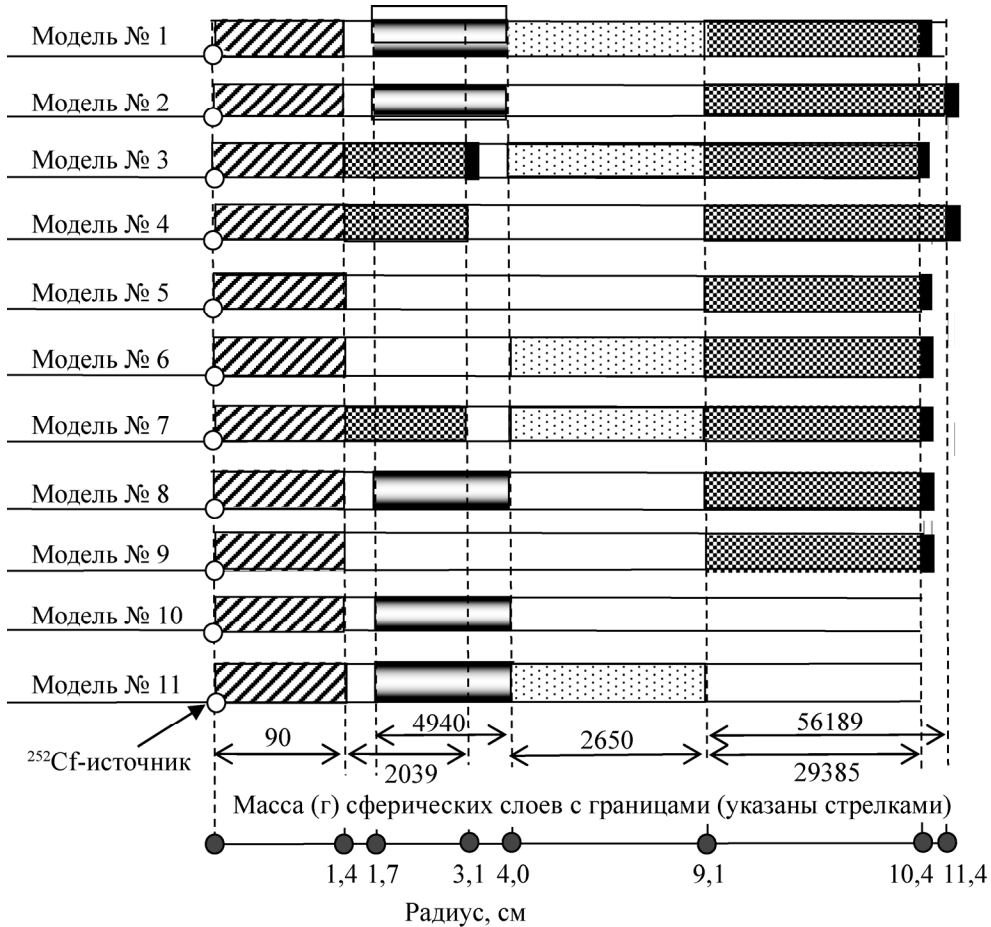


Рис. 2. Схематическое изображение модельных сборок, изученных в эксперименте [6]:

▨ – Fe, ▩ –  $^{235}\text{U}$ , ■ – Np, □ – воздух, ▧ –  $\text{CH}_2$ , ■ – Cd

Основными, как уже отмечено, были измерения распределения числа делений. Для регистрации актов деления ядер  $^{237}\text{Np}$  и  $^{235}\text{U}$  в соответствующих узлах сборок использовали диэлектрические трековые детекторы осколков деления [10]. В этих целях применяли полимерную пленку из поликарбоната толщиной 0,1 мм. Поскольку детали из  $^{237}\text{Np}$  были заключены в непрозрачные для осколков деления чехлы, для эксперимента изготавливали слои из  $^{237}\text{Np}$  и специальную камеру-контейнер для размещения нептуниевых слоев и образцов поликарбонатной пленки. Камеру устанавливали между верхней и нижней частью нептуниевой сборки. При конструировании камеры особое внимание обращали на минимизацию толщины устройства. В камере можно было установить шесть слоев. Нептуний наносился электролитическим методом на алюминиевые подложки толщиной 0,2 мм и диаметром 24 мм. Диаметр нептуниевого слоя составлял 20 мм.

При измерении распределения чисел делений в урановых слоях применялась другая система размещения образцов. Полюсные каналы урановых сфер заполнялись дисками диаметром 20 мм,

толщиной 0,5 и 1 мм и втулками из  $^{235}\text{U}$  90 %-го обогащения. Эти небольшие детали не были покрыты защитным антикоррозионным слоем. Образцы детектирующей пленки диаметром 20 мм и толщиной 0,1 мм устанавливались между урановыми дисками.

В качестве источника первичных нейтронов в измерениях на каскадных и односекционных сборках использовался метрологически аттестованный источник  $^{252}\text{Cf}$ . Облучение одной конкретной сборки продолжалось от нескольких минут до 5 ч. При оптимальном выборе времени облучения в диэлектрическом детекторе фиксировали  $\sim 10000$  треков. Этого количества треков достаточно для получения необходимой статистической точности. Взвешивание образцов для всех слоев  $^{237}\text{Np}$  и урановых дисков проводилось на АИР БИР-2М. Нейтронный спектр в центральном канале реактора БИР-2М метрологически аттестован [11]. Примеры измеренных распределений плотности делений в нептуниевых и урановых узлах некоторых моделей показаны на рис. 3 и 4.

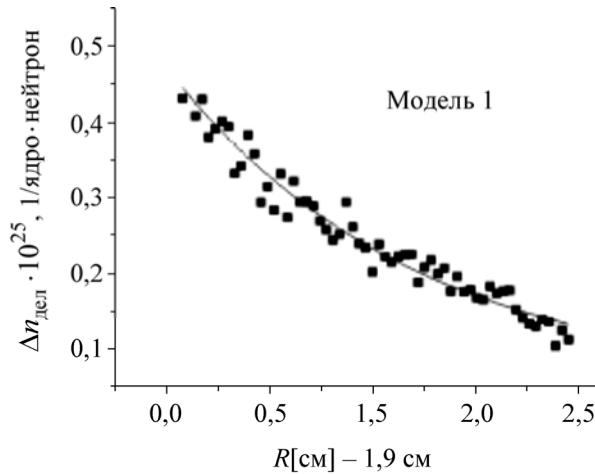


Рис. 3. Распределение плотности делений по радиусу нептуниевого слоя модельной сборки [6]

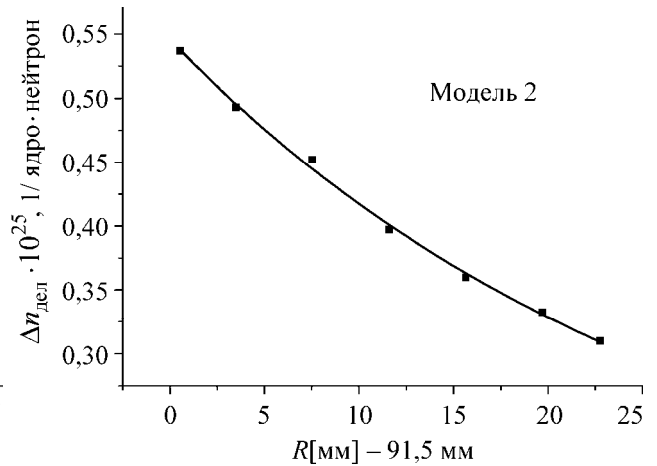


Рис. 4. Распределение плотности делений по радиусу внешнего уранового слоя модельной сборки, не содержащей слоя из  $\text{CH}_2$  [6]

Результаты обработки экспериментальных данных представлены в табл. 1. Коэффициенты  $A$ ,  $A'$  приведены с учетом коррекции  $P_0$ , связанной с уравниванием  $k_{эф}$  каскадной и соответствующей односекционной сборки. Коэффициент  $A$  соответствует случаю, когда в качестве односекционной сборки, с которой проводится сравнение, взята модельная сборка 6, коэффициент  $A'$  – сборка 5. В табл. 1 представлены также расчетные  $k_{эф}$  сборок, числа первичных делений в сборках, погрешности в экспериментальных значениях полных чисел делений и коэффициентов  $A$ ,  $A'$ . Статистическая ошибка в расчетных числах делений в секциях сборок не превышает 0,5 %, в числах делений в трековых детекторах – 3–5 %. Статистическая ошибка в расчетных  $k_{эф}$  сборок составляет  $\sim 0,1$  %.

**2-й эксперимент.** Во 2-м эксперименте измеряли коэффициенты размножения нейтронов подкритическими сборками 1, 6 (см. рис. 2) и инертной моделью, отличающейся от сборки 6 тем, что вместо урановой сферической оболочки в ней установили аналогичную по геометрии оболочку из стали марки 20. Первичным источником нейтронов служил свинцовый шарик, нейтроны в котором генерировались пучком тормозного излучения от мишени ускорителя ЛУ-50 [12]. Конструкция сборок 1, 6 показана на рис. 5.

Таблица 1

Итоги экспериментальных и расчетных исследований  
ядерно-физических характеристик каскадных и односекционных моделей blankets

Номер модельной сборки и ее состав	$k_{эф}$	Число первичных делений	Число делений на 1 нейтрон источника в 1-й, 2-й секциях и сборке в целом		Коэффициент каскадного усиления с коррекцией на $k_{эф}$ односекционной сборки (в скобках – расчет)	
			эксперимент	расчет	$A$	$A'$
1 (Np, CH <sub>2</sub> , U)	0,617	0,364	0,344 + 0,877 = = 1,221 ± 0,085	0,347 + 0,953 = = 1,300	1,71 ± 0,07 (1,82)	2,81 ± 0,11 (2,94)
2 (Np, воздух, U)	0,651	0,294	0,320 + 0,587 = = 0,907 ± 0,065	0,346 + 0,687 = = 1,033	1,16 ± 0,05 (1,32)	1,90 ± 0,10 (2,13)
3 (U, CdCH <sub>2</sub> , U)	0,611	0,353	0,236 + 0,784 = = 1,020 ± 0,075	0,233 + 0,824 = = 1,057	1,45 ± 0,08 (1,50)	2,38 ± 0,10 (2,43)
4 (U, воздух, U)	0,601	0,249	0,172 + 0,574 = = 0,719 ± 0,052	0,160 + 0,513 = = 0,673	1,05 ± 0,05 (0,98)	1,72 ± 0,07 (1,59)
5 (U)	0,584	0,168	0,400 ± 0,025	0,407	0,61 ± 0,03 (0,62)	1 (1)
6 (CH <sub>2</sub> , U)	0,575	0,271	0,645 ± 0,040	0,643	1 (1)	1,65 ± 0,07 (1,61)

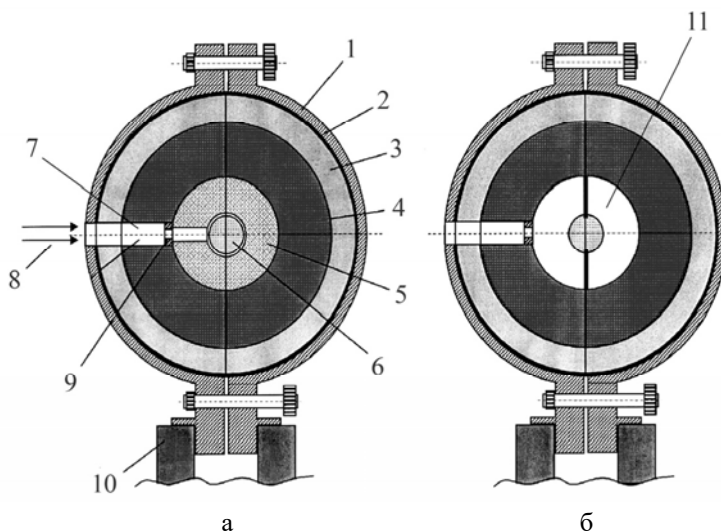


Рис. 5. Конструкция сборок 1 (а) и 6 (б): 1 – Al, 2 – Cd, 3 – <sup>235</sup>U (90 %), 4 – CH<sub>2</sub>, 5 – <sup>237</sup>Np, 6 – Pb, 7 – воздушный канал, 8 – пучок n-γ-излучений от ЛУ-50, 9 – ограничительная шайба из Al, 10 – стэнд, 11 – воздушная полость [6]

Ускоренные электроны по тракту транспортировки пучка попадали на танталовую мишень, рассчитанную и изготовленную с целью получения максимального выхода фотонов. Для уменьшения влияния фоновых нейтронов из мишени она была установлена в ускорительном зале, непосредственно перед вакуумным защитным шибером, отделяющим мишенный бункер от зала ускорителя. Далее тормозное излучение через систему коллиматоров выводили под углом 0° к оси электронного пучка в мишенный бункер, где находилась исследуемая сборка. С помощью системы коллиматоров

формировался пучок тормозного излучения диаметром 10 мм, приемлемым для ввода его в центр моделей blankets.

Для поглощения первичных электронов, прошедших через мишень, за мишенью перед коллиматором был установлен алюминиевый фильтр толщиной 15 мм.

Сферическую сборку устанавливали в точке пересечения оси пучка ускорителя с осями нейтронных каналов. Точность установки сферической сборки и системы коллиматоров в плане и по высоте была не хуже 0,5 мм. Для определения абсолютного выхода нейтронов в каждом эксперименте измерялся суммарный заряд электронов, падающих на мишень, с помощью интегратора тока Ortec 439 Digital Current Integrator и пересчетного устройства.

В целях контроля постоянства выхода тормозного излучения и, следовательно, выхода нейтронов из исследуемой сборки использовался вторично-эмиссионный детектор тормозного излучения ВЭД-2-01, расположенный в пучке тормозного излучения. Амплитуда токового сигнала была пропорциональна мощности дозы тормозного излучения.

На сборку были ориентированы три стальные трубы, проложенные в стенах здания. Противоположные концы труб были выведены в соседнее помещение, где располагались детекторы для измерения потока нейтронов из размножающей сборки. Внутри труб устанавливались коллиматоры, представляющие собой набор чередующихся стальных и полиэтиленовых стаканов. В качестве нейтронных детекторов использовались газоразрядные счетчики (рабочий газ –  $^3\text{He}$ ), окруженные слоем замедлителя (полиэтилена). Параметры нейтронных коллиматоров и ширину временного окна счета нейтронов устанавливали исходя из требования максимального снижения вероятности наложения импульсов в детекторе.

Во 2-м эксперименте, в отличие от 1-го и 3-го, измерения пространственных распределений плотности делений в АЗ сборок не проводились по причине заметной анизотропии этих распределений. Во 2-м эксперименте измеряли интенсивность нейтронов, вылетающих из АЗ сборок под углами, близкими к  $90^\circ$  по отношению к пучку тормозного излучения. Переход от отношения интенсивностей нейтронов утечки в сборках 1 и 6 к коэффициенту каскадного усиления  $A$  выполняли на основе дополнения эксперимента расчетами по программе С-95.

Было проведено фоновое измерение и выполнены три эксперимента на разных моделях: инертной, моделях 1 и 6. Фоновое измерение проводилось в отсутствие в мишенной комнате модельной сборки.

Расчетные и оцененные экспериментальные значения коэффициента  $A$  в модели 1 blankets представлены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные значения коэффициента каскадного усиления  $A$  в модели 1 blankets

Коэффициент каскадного усиления $A$	Расчет	Эксперимент
– отнесенный к 1 электрону ускорителя ЛУ-50	$2,78 \pm 0,08$	$3,24 \pm 0,15$
– отнесенный к 1 нейтрону источника	$2,32 \pm 0,20$	$2,71 \pm 0,25$

Данные табл. 2 по коэффициенту  $A$ , относящемуся к 1 нейтрону источника, можно сравнивать с аналогичными данными в эксперименте с  $^{252}\text{Cf}$ -источником нейтронов (см. табл. 1). По существу, для одних и тех же моделей здесь получены заметно более высокие экспериментальные и расчетные значения коэффициента  $A$ : в табл. 1 – соответственно 1,71 и 1,82, в табл. 2 – 2,71 и 2,32. Указанное выходящее за пределы ошибок отличие значений коэффициента  $A$  может быть приписано влиянию изменений спектра нейтронов источника. Во всяком случае, противоречий в этом несопадении значений коэффициента  $A$  нет.

Более высокие значения коэффициента  $A$ , отнесенного к 1 электрону ускорителя, объясняются возникновением в модели 1 дополнительного источника нейтронов.

**3-й эксперимент.** 3-й эксперимент проведен с более сложными и габаритными сборками, моделирующими бланкет на расплавленных фторидах, разработанный в РИЦ «Курчатовский институт» (система КПЖСР [13]). В качестве первичного источника нейтронов в 3-м эксперименте, как и в 1-м, использован источник  $^{252}\text{Cf}$ . На основании расчетов была разработана конструкция и изготовлена глубоко подкритичная лабораторная модель бланкета (рис. 6).

Блок замедлителя-отражателя в модели представляет собой кубический массив графита в стальном каркасе размерами  $1680 \times 1625 \times 1680$  мм. В центре графитового массива находится сварной цилиндрический сосуд из алюминиевого сплава: расположение сосуда – горизонтальное, диаметр – 600 мм, длина – 600 мм. В объеме сосуда смонтированы трубы из алюминиевого сплава, пространство между трубами заполнено замедляющим нейтроны материалом из NaF. В центральной трубе, на половине ее длины, расположена сферическая сборка из  $^{237}\text{Np}$  (та же, что и в экспериментах 1, 2). Остальной объем трубы заполнен цилиндрическими вкладышами из алюминия, содержащими NaF, имеющими канал с внутренним диаметром 48 мм. В этом канале размещались цилиндры диаметром 47 мм с солью  $\text{ZrF}_4$  и двумя таблетками из очехлованного металлического урана (масса таблетки 87,6 г). Таблетки из урана располагались между цилиндрами из  $\text{ZrF}_4$ .

Вне центральной трубы сборка содержала еще 42 трубы из алюминия с внутренним диаметром 48 мм. В этих каналах размещали по шесть цилиндров из очехлованной алюминием соли  $\text{ZrF}_4$ , чередующихся с пятью таблетками из урана массой 87,6 г, очехлованными нержавеющей сталью. Общее количество урановых таблеток в солевой блоке 214 ( $42 \times 5 + 2 \times 2$ ), суммарная масса урана 18746 г. Шесть каналов диаметром 22 мм были предусмотрены для размещения ионизационных камер, предназначенных для измерения пространственного распределения чисел делений в солевой секции модели.

Основная задача эксперимента заключалась в определении отношений интегральных чисел делений ядер в каскадной и односекционной моделях, нормированных на один нейтрон источника, размещенного в их центре.

В ходе эксперимента были использованы следующие методики измерений:

- методика регистрации осколков деления с помощью трековых детекторов, предназначенная для определения числа делений ядер нептуния в первом каскаде. Детекторы располагали в плоскости разреза полу-сфер из нептуния;

- гамма-спектрометрическая методика, применяемая для определения числа делений в урановых таблетках;

- методика регистрации в тех же целях актов деления ионизационными камерами, содержащими слой из урана-235. Ионизационные камеры размещали в измерительных каналах второго каскада.

Измеренное с помощью трековых детекторов распределение плотности делений ядер  $^{237}\text{Np}$  в центральной части модели приведено на рис. 7.

Пространственное распределение чисел делений в солевой секции модели измеряли с помощью счета гамма-активности осколков деления в облученных урановых образцах, устанавливаемых в различных точках сборки. Образцы представляли собой диски диаметром



Рис. 6. Лабораторная модель бланкета на расплавленных фторидах [6]



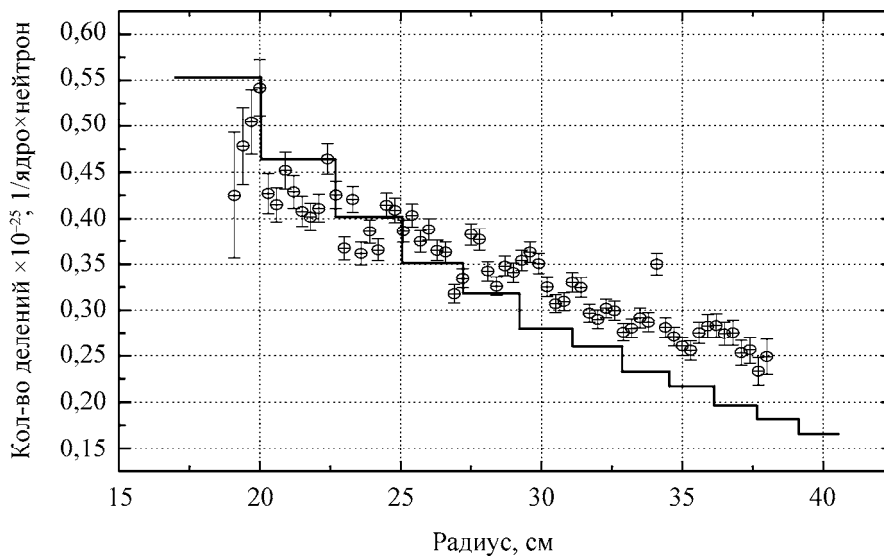


Рис. 7. Распределение плотности делений ядер  $^{237}\text{Np}$  в центральной части модели по радиусу [6]:  $\Phi$  — эксперимент, — — расчет по программе С-95

45 мм, толщиной  $4,34 \pm 0,12$  мм, заключенные в оболочку из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм. Масса урана в диске составляла  $87,86 \pm 0,15$  г.

Были проведены два эксперимента по облучению образцов: облучение в модели с нептуниевой секцией и без нее. Длительность облучения составляла соответственно 168 и 191 ч. В каждом облучении использовали 14 образцов. Число делений в образцах определяли по гамма-активности дочерних продуктов распада осколков  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Te}$  и  $^{140}\text{Ba}$ . Количество осколков  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Te}$  и  $^{140}\text{Ba}$  измеряли по гамма-активности дочерних продуктов —  $^{97}\text{Nb}$ ,  $^{132}\text{I}$  и  $^{140}\text{La}$ .

После облучения  $\gamma$ -активность урановых образцов измеряли несколько раз при различных временах выдержки. Это обеспечивало идентификацию радионуклидов не только по энергии гамма-квантов, но и по периоду полураспада, что позволило с наибольшей достоверностью определить количество делений в образцах.

Пространственное распределение чисел делений в солевой секции моделей также измеряли с помощью ионизационных камер. Для этой цели, как сказано выше, в солевой секции были предусмотрены шесть измерительных каналов диаметром 22 мм и изготовлены три цилиндрические ионизационные камеры делений со слоями урана 90 %-го обогащения. Измерение заключалось в сканировании объема второго каскада экспериментальной модели камерами делений через 50 мм по шести радиусам с обязательным перекрестом каналов в целях определения невязки измерений и уточнения относительных долей камер. Время измерений определялось исходя из достижения статистической погрешности не хуже 1 %. Результаты измерений приведены на рис. 8 и 9. Как видно из рисунков, форма пространственного распределения чисел делений в солевой секции практически одинакова в моделях с нептунием и без нептуния.

Главным результатом 3-го эксперимента является экспериментально определенный коэффициент каскадного усиления  $A$ , равный отношению  $(P_1 + P_2)/P$ . Результаты измерений и расчетов нейтронных характеристик лабораторных моделей в 3-м эксперименте приведены в табл. 3.

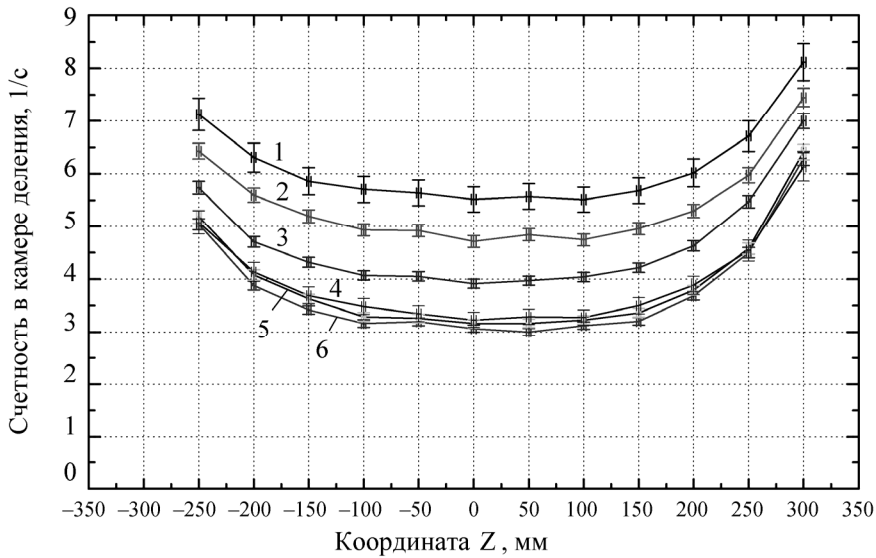


Рис. 8. Пространственное распределение интенсивности делений в солевой секции модели без нептуния, измеренное ионизационными камерами [6]: 1 – радиус 91,80 мм; 2 – радиус 121,45 мм; 3 – радиус 163,30 мм; 4 – радиус 197,85 мм; 5 – радиус 220,85 мм; 6 – радиус 245,0 мм

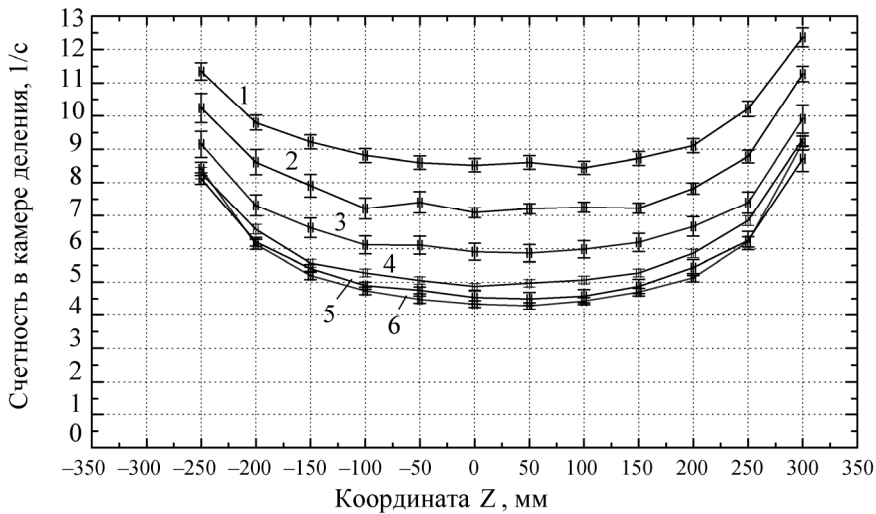


Рис. 9. Пространственное распределение интенсивности делений в солевой секции модели с нептунием, измеренное ионизационными камерами [6]: 1 – радиус 91,80 мм; 2 – радиус 121,45 мм; 3 – радиус 163,30 мм; 4 – радиус 197,85 мм; 5 – радиус 220,85 мм; 6 – радиус 245,0 мм

Таблица 3

Сравнение измеренных и расчетных характеристик экспериментальных моделей

Параметр	Расчет по программе С-95	Эксперимент
Двухсекционная сборка		
$k_{эф}$	0,619	
$k_{11}$	0,514	

Параметр	Расчет по программе C-95	Эксперимент
Двухсекционная сборка		
$k_{12}$	0,0068	
$k_{21}$	0,585	
$k_{22}$	0,581	
Односекционная сборка (без нептуния)		
$k_{эф}$	0,597	
Двухсекционная сборка с источником нейтронов		
$S_1$	0,1591	
$S_2$	0,2016	
$P_1$	0,354	0,383 ± 0,3
$P_2$	0,9801	0,900 ± 0,045
Односекционная сборка (без нептуния) с источником нейтронов		
$S$	0,2618	
$P$	0,6507	0,602 ± 0,030
Коэффициент каскадного усиления	1,94*	2,015 ± 0,12*
Отношение числа делений в солевом каскаде с нептунием и без него, $P_2/P$	1,424*	1,413 ± 0,030*

Примечания:  $S$  – число первичных делений на один нейтрон источника нейтронов;  $P$  – полное число делений на один нейтрон источника. Статистическая ошибка в расчетных числах делений в секциях сборок не превышает 0,5 %, в числах делений в трековых детекторах – 5–8 %. Статистическая ошибка в расчетных  $k_{эф}$  составляет ~0,1 %. Расчеты проведены с использованием библиотеки ядерных данных ENDF BVI.

\* С учетом коррекции  $P_0$  в результате уравнивания  $k_{эф}$  моделей односекционного и каскадного бланкетов.

Таким образом, во всех трех экспериментах для каждой из каскадных моделей получены удовлетворительно согласующиеся с расчетом значения чисел делений в сборках и коэффициентов каскадного усиления, лежащих в диапазоне от 1,7 до 2,8 в зависимости от вида каскадной и сравниваемой с ней односекционной моделей. Расхождение экспериментальных и расчетных значений коэффициента  $A$ , за исключением нескольких случаев, не выходит за пределы суммарных погрешностей.

Из эксперимента следует, что в полном соответствии с данными расчетов и теоретическими представлениями каждая из рассмотренных каскадных сборок отличается довольно значительным каскадным усилением чисел делений в объеме. Таким образом, эксперименты подтвердили теоретические заключения о положительных свойствах каскадных бланкетов и эффективности нептуния-237 в качестве средства достижения односторонней связи секций, а также предоставили ценную информацию о работе каскадных реакторных устройств в комплексе с ускорителем электронов.

### Список литературы

1. Borst L. B. The convergatron, a neutron amplifier // Phys. Rev. 1957. Vol. 107, N 3. P. 905–906.
2. Колесов В. Ф., Завьялов Н. В. История развития концепции каскадных реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2016. Вып. 4. С. 51–61.

3. Hummel H. H., Cohn C. E., Fischer G. J. et al. Experimental and theoretical studies of the coupled fast-thermal system ZPR-V // 2<sup>nd</sup> United Nations International Conf. on the peaceful uses of atomic energy. Geneva, Switzerland, 1–13 September. 1958. Vol. 12. P. 166–181.

4. Гулевич А. В., Дьяченко П. П., Зродников А. В., Кухарчук О. Ф. Связанные реакторные системы импульсного действия. – М.: Энергоатомиздат, 2003.

5. Zavalov N. V., Kolesov V. F., Khokhlov Yu. A. On the possibility of experimental testing for the conception of cascade electronuclear facilities using <sup>237</sup>Np // Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy: 2<sup>nd</sup> Int. Workshop. Seyssins, France, April 1998. – The American Institute of Physics, 1998. P. 61–66.

6. Завьялов Н. В., Колесов В. Ф., Иванин И. А. и др. Эксперименты на моделях реакторов каскадного типа // Атомная энергия. 2006. Т. 100. Вып. 2. С. 107–116.

7. Колесов В. Ф., Хоружий В. Х. Нейтронные характеристики моделей каскадного двух-секционного blankets // Там же. 2000. Т. 88. Вып. 5. С. 330–337.

8. Кочубей Ю. К., Житник А. К., Артемьева Е. В. и др. Программа С-95. Современное состояние и возможности // Сб. докл. VI конф. по радиационной стойкости. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2003. С. 100–104.

9. Кувшинов М. И., Воронцов С. В., Горелов В. П. и др. Тестовые критические эксперименты на установке ФКБН-2М // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Физика ядерных реакторов. 2000. Вып. 2/3. С. 142–149.

10. Дюррани С., Балл Р. Твердотельные ядерные детекторы. – М.: Энергоатомиздат, 1990.

11. Севастьянов В. Д., Кошелев А. С., Маслов Г. Н. и др. Стандартное поле нейтронов в центре активной зоны БИР-2 // Атомная энергия. 1994. Т. 76. Вып. 1. С. 55–61.

12. Zavalov N. V., Telnov A. V., Khokhlov Yu. A., Shorikov I. V. Possibilities of LU-50 linear electron accelerator modification // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Ядерно-физические исследования. 1999. № 4. С. 5–7.

13. Алексеев П. Н., Игнатъев В. В., Коляскин О. Е. и др. Каскадный подкритический реактор повышенной безопасности // Атомная энергия. 1995. Т. 79. Вып. 5. С. 327–337.

## **Comprehensive Experiments on Subcritical Assemblies of Cascade Reactor Systems**

N. V. Zavalov, R. I. Il'kaev, V. F. Kolesov, I. A. Ivanin, A. K. Zhitnik, M. I. Kuvshinov,  
Yu. Ya. Nefyodov, V. T. Punin, A. V. Tel'nov, V. Kh. Khoruzhi

*The results of three series of experiments on uranium-neptunium cascade assemblies performed in INRP VNIIEF within the years of 2003–2004 are presented in the paper. The experiments confirmed theoretical conclusions on positive properties of cascade blankets and effectiveness of using neptunium-237 as a means of achieving one-sided connection between the sections.*