

## РАЗВЕРНУТЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ НА ПОДКРИТИЧЕСКИХ СБОРКАХ КАСКАДНЫХ РЕАКТОРНЫХ СИСТЕМ

### COMPREHENSIVE EXPERIMENTS ON SUBCRITICAL ASSEMBLIES OF CASCADE

*Н. В. Завьялов, Р. И. Илькаев, В. Ф. Колесов, И. А. Иванин, А. К. Житник, М. И. Кувишинов,  
Ю. Я. Неведов, В. Т. Пунин, А. В. Тельнов, В. Х. Хоружий*  
*N. V. Zavyalov, R. I. Il'kaev, V. F. Kolesov, I. A. Ivanin, A. K. Zhitnik, M. I. Kuvshinov, Yu. Ya. Nefedov,  
V. T. Punin, A. V. Tel'nov, V. Kh. Khoruzhi*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental Physics

Каскадные реакторы привлекают внимание возможностями улучшения с их помощью параметров импульсных реакторов и реализуемости электроядерных установок. В докладе приведены результаты трех серий экспериментов на уран-нептуниевых каскадных сборках, выполненных в ИЯРФ ВНИИЭФ в течение 2003–2004 гг. Эксперименты подтвердили теоретические заключения о положительных свойствах каскадных бланкетов и эффективности нептуния-237 в качестве средства достижения односторонней связи секций.

Particular attention is attracted by cascade reactors because of the presented by them possibilities to improve with their aid parameters of pulsed reactors and realizability of electronuclear facilities. 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.

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 50-х годов прошлого столетия [1]. Значительный интерес к этим устройствам, наблюдаемый с 80-х годов, 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 ИЯРФ

ВНИИЭФ. Участие ИЯРФ ВНИИЭФ 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 бланкета каскадного типа предоставляет возможность многократного снижения мощности ускорителя протонов.

Отметим, что за единичными исключениями до 2003-го года все работы по каскадным системам были расчетно-теоретическими или проектными. Имелось лишь несколько реальных систем, кото-

рые 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 бланкета в части понижения требований к мощности ускорителя. В течение 2003–2004 гг. были выполнены три серии таких экспериментов на подкритических уран-нептуниевых каскадных и соответствующих им односекционных моделях бланкета [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  $\sim 0,6$  значениям  $k_{\text{эф}}$ . Эти сборки просты по конструкции и компактны, содержат сравнительно небольшое количество делящихся веществ и заведомо, без принятия специальных мер защиты, удовлетворяют требованиям ядерной безопасности. Расчеты ядерно-физических характеристик сборок с низкими значениями  $k_{\text{эф}}$  подтвердили их приемлемость в качестве моделей для намеченных экспериментов [7]. Было показано, что отличие эффективности моделей обычных и каскадных бланкетов в этом случае невелико, но тем не менее достаточно, чтобы быть зафиксированным в эксперименте.

Измерения и первичная обработка их результатов сопровождалась всесторонними расчетами с использованием программы С-95 [8]. Уже при подготовке экспериментов были проведены многочисленные расчеты модельных сборок, 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 бланкетам ЭЛЯУ принят коэффициент каскадного усиления  $A$ , равный отношению чисел делений в каскадном ( $P$ ) и обычном ( $P_0$ ) бланкетах, нормированных на один нейтрон источника со спектром нейтронов деления  $^{252}\text{Cf}$ , при условии равенства  $k_{\text{эф}}$  того и другого бланкета:  $A = P/P_0$ .

Основная задача опытов заключалась в изменении или оценке 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  $k_{\text{эф}}$  в той и другой модели. По этим данным находили коэффициент каскадного усиления  $A$ , важность которого определяется тем, что именно в  $A$  раз можно снизить мощность ускорителя частиц при переходе к бланкету каскадного типа.

**1-ый эксперимент.** В качестве лабораторных моделей для проведения 1-го эксперимента были выбраны сферические сборки из металлического  $^{237}\text{Np}$  и урана 90%-ного 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 размножающих сборок.

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  $^{252}\text{Cf}$  размещалась в шаре из чистого железа диаметром 28 мм.

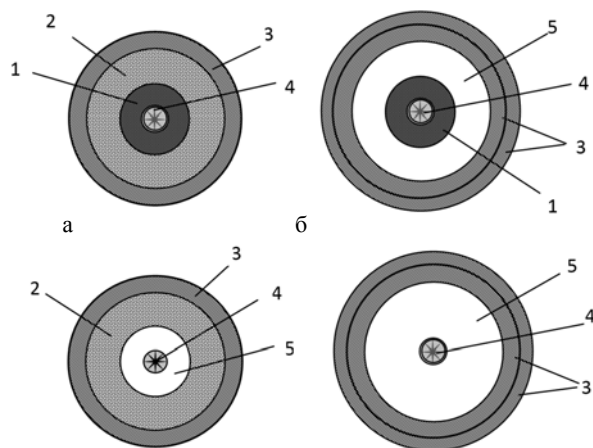


Рис. 1. Схематическое изображение каскадных моделей blankets, содержащих нептуний-237, и соответствующих односекционных моделей [6]: а – модели со слоем замедлителя; б – модели без замедлителя; 1 – нептуний-237; 2 – полиэтилен; 3 – высокообогащённый уран; 4 – источник нейтронов  $^{252}\text{Cf}$ , 5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

Эксперименты проводили на стенде ВНИИЭФ для критических сборок (стенд 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 приносят данных для непосредственного определения коэффициентов каскадного усиления, они тем не менее информативны в аспекте проверки используемых в расчётах математических программ и нейтронных констант.

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  $^{237}\text{Np}$  заключены в непрозрачные для осколков деления чехлы, для выполнения эксперимента были изготовлены слои из  $^{237}\text{Np}$  и специальная камера-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.

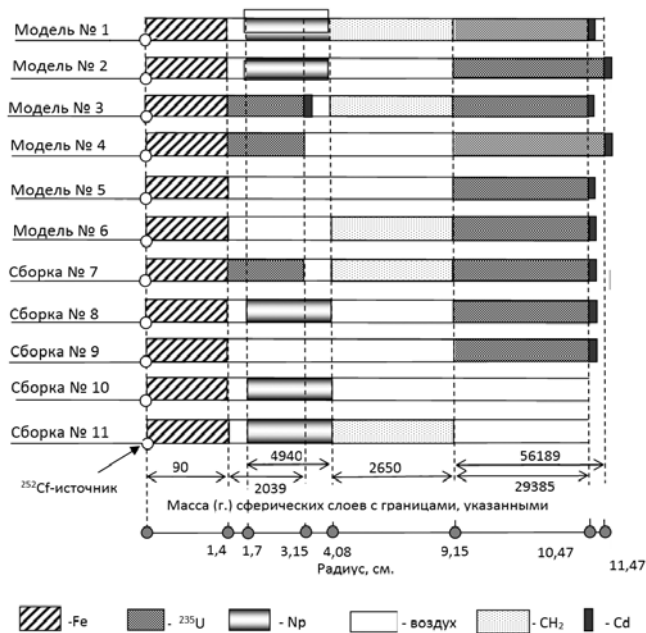


Рис. 2. Схематическое изображение экспериментально изученных сферических модельныхборок [6]

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 был равен 20 мм.

При измерении распределения чисел делений в урановых слоях применялась другая система размещения образцов. Полусные каналы урановых сфер заполнялись дисками диаметром 20 мм, толщиной 0,5 и 1 мм и втулками из  $^{235}\text{U}$  90%-ного 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 ~10000 треков. Это количество 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.

Таблица 1

Итоговые результаты экспериментальных и расчётных исследований ядерно-физических характеристик каскадных и односекционных моделей бланкета

Номер модельной сборки	$k_{эф}$	Число первичных делений	Число делений на 1 нейтрон источника в 1-й, 2-й секциях и в 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)

Результат обработки экспериментальных данных представлен в табл. 1. Коэффициенты  $A$ ,  $A'$  приведены с учетом коррекции  $P_0$ , связанной с уравниванием  $k_{эф}$  каскадной и соответствующей односекционной сборки. Коэффициенты  $A$  соответствуют случаю, когда в качестве односекционной сборки, с которой проводится сравнение, взята модельная сборка 6,  $A'$  – 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 расчётных 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 ~0,1%.

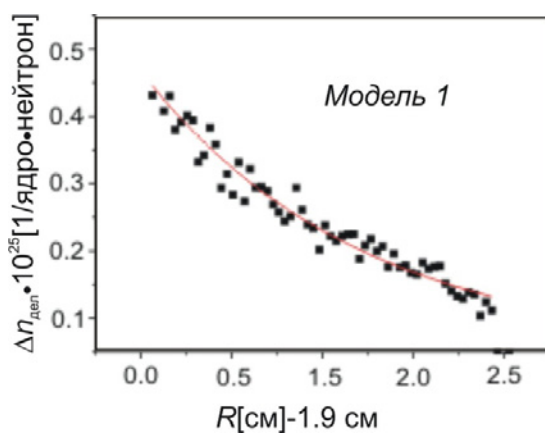


Рис. 3. Распределение плотности делений по радиусу непуниевых слоев модельной сборки [6]

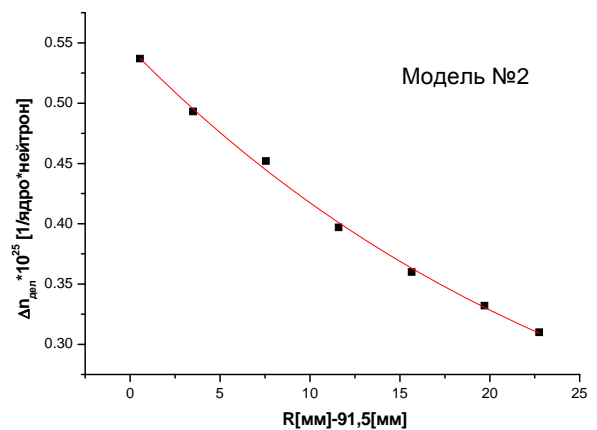


Рис. 4. Распределение плотности делений по радиусу внешнего уранового слоя модельной сборки, не содержащей слоя из CH<sub>2</sub> [6]

**2-ой эксперимент.** Во 2-ом 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 установлена аналогичная по геометрии оболочка из стали марки 20. В качестве первичного источника нейтронов служил свинцовый шарик, нейтроны в котором генерировались пучком тормозного излучения от мишени ускорителя ЛУ-50 [12]. Конструкция сборок 1, 6 представлена на рис. 5.

Ускоренные электроны по тракту транспортировки пучка попадали на танталовую мишень, рассчитанную и изготовленную из условия 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  $0^\circ$  к оси электронного пучка в мишенный бункер, где находилась исследуемая сборка. С помощью системы коллиматоров формировался пучок тормозного излучения диаметром  $\varnothing 10$  мм, приемлемым для ввода его в центр модели бланкета.

Для поглощения первичных электронов, прошедших через мишень, за мишенью перед коллиматором К1 был установлен алюминиевый фильтр толщиной 15 мм.

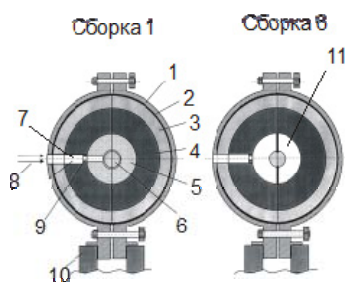


Рис. 5. Конструкция сборок 1 и 6: 1 – Al; 2 – Cd; 3 –  $^{235}\text{U}$  (90%); 4 –  $\text{CH}_2$ ; 5 –  $^{237}\text{Np}$ ; 6 – Pb; 7 – воздушный канал; 8 – пучок  $n$ - $\gamma$ -излучений от ЛУ-50; 9 – ограничительная шайба из Al; 10 – стэнд; 11 – воздушная полость [6]

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, а, следовательно, и выхода нейтронов из исследуемой сборки использовался вторично-эмиссионный детектор тормозного излучения ВЭД-2-01, который располагался в пучке тормозного излучения. Амплитуда токового сигнала пропорциональна мощности дозы тормозного излучения.

На сборку были ориентированы три стальных трубы, проложенных в стенах здания. Противоположные концы труб выведены в соседнее помещение, где располагались детекторы для измерения потока нейтронов из размножающей сборки. Внут-

ри 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-ом эксперименте, в отличие от 1-го и 3-го экспериментов, измерения пространственных распределений плотности делений в АЗ сборок не проводились – по причине заметной анизотропии этих распределений. Во 2-ом эксперименте измерялась 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.

Были проведены фоновое измерение и три эксперимента на разных моделях: на инертной модели; на модели 1 и на модели 6. Фоновое измерение проводилось в отсутствие в мишенной комнате модельной сборки.

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

Таблица 2

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

Коэффициент каскадного усиления $A$	Расчет	Эксперимент
относенный к 1 электрону ускорителя ЛУ-50	$2,78 \pm 0,08$	$3,24 \pm 0,15$
относенный 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  $A$ : там соответственно 1,71 и 1,82, здесь 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 несовпадении значений коэффициента  $A$  нет.

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

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



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

Блок замедлителя-отражателя в модели представляет собой извне кубический массив графита в стальном каркасе с размерами  $1680 \times 1625 \times 1680$  мм. В центре графитового массива находится сварной цилиндрический сосуд из алюминиевого сплава. Расположение сосуда – горизонтальное. Диаметр цилиндра – 600 мм, длина – 600 мм. В объеме сосуда смонтированы трубы из алюминиевого сплава. Пространство между трубами в сосуде 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 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 внутренним диаметром 48 мм. В этих каналах размещали по 6 цилиндров из очехлованной алюминием соли  $\text{ZrF}_4$ , чередующихся с 5 таблетками из урана массой 87,6 г, очехлованными нержавеющей сталью. Общее количество урановых таблеток в солевом блоке равно  $214 (42 \times 5 + 2)$ , 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 проведения эксперимента были использованы следующие методики измерений:

- методика регистрации осколков деления с помощью трековых детекторов. Эта методика предназначалась для определения числа делений ядер нептуния в первом каскаде. Детекторы располагали в плоскости разъема полусфер 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.

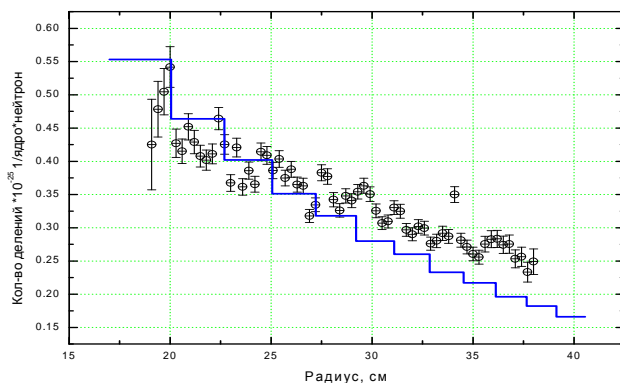


Рис. 7. Распределение плотности делений ядер  $^{237}\text{Np}$  в центральной части модели по радиусу [6]: значки – эксперимент, — — расчет по программе C-95

Пространственное распределение чисел делений в солевой секции модели измерялось с помощью счета гамма-активности осколков деления в

облученных урановых образцах, устанавливаемых в различных точках сборки. Образцы представляли собой диски диаметром – 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 ч и 191 ч. В каждом облучении использовали 14 образцов. Число делений в образцах определялось по гамма-активности дочерних продуктов распада осколков  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Te}$  и  $^{140}\text{Ba}$ . Измерение количества осколков  $^{97}\text{Zr}$ ,  $^{132}\text{Te}$  и  $^{140}\text{Ba}$  осуществлялось по гамма-активности дочерних продуктов –  $^{97}\text{Nb}$ ,  $^{132}\text{I}$  и  $^{140}\text{La}$ .

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

Пространственное распределение чисел делений в солевой секции моделей измерялось также с помощью ионизационных камер. Для этой цели, как сказано выше, в солевой секции были предусмотрены 6 измерительных каналов диаметром 22 мм и изготовлены 3 цилиндрические ионизационные камеры делений со слоями обогащенного урана 90%-ного 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-ем эксперименте приведены в табл. 3.

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.

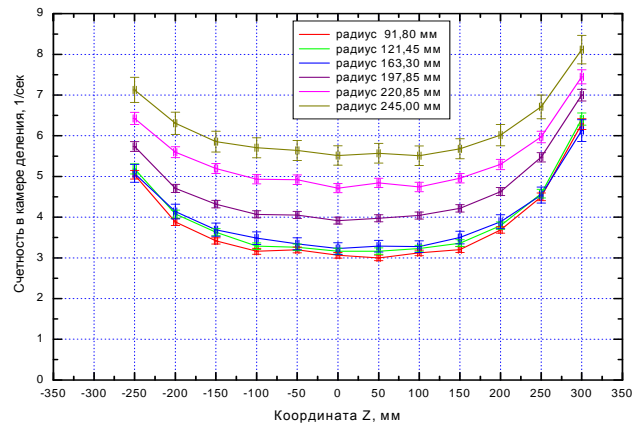


Рис. 8. Пространственное распределение интенсивности делений в солевой секции модели без нептуния, измеренное ионизационными камерами [6]

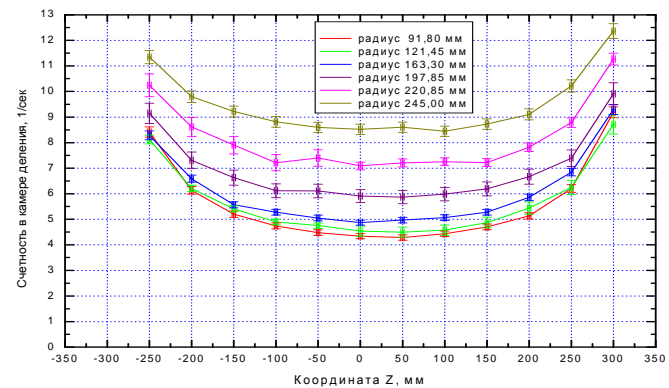


Рис. 9. Пространственное распределение интенсивности делений в солевой секции модели с нептунием, измеренное ионизационными камерами [6]

Из эксперимента следует, что в полном соответствии с данными расчетов и теоретическими представлениями каждая из рассмотренных каскадныхборок 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. Они предоставили, кроме того, ценную информацию о работе каскадных реакторных устройств в комплексе с ускорителем электронов.

Таблица 3

Результаты сравнения измеренных и расчетных характеристик экспериментальных моделей

Параметр	Расчет по программе С-95	Эксперимент
Двухсекционная сборка		
$k_{эф}$	0,619	
$k_{11}$	0,514	
$k_{12}$	0,0068	
$k_{21}$	0,585	
$k_{22}$	0,581	
Односекционная сборка (без непутия)		
$k_{эф}$	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 непутия) с источником		
$S$	0,2618	
$P$	0,6507	0,602±0,030
Коэффициент каскадного усиления	1,94 <sup>*</sup> )	2,015±0,12 <sup>*</sup> )
Отношение числа делений в солевом каскаде с непутием и без него, $P_2/P$	1,424 <sup>*</sup> )	1,413±0,030 <sup>*</sup> )

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

$S$  – 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.

### Список литературы

1. Borst L. B. The convergatron, a neutron amplifier. – Phys. Rev., 1957, v.107, № 3, p.905–906.
2. Колесов В. Ф., Завьялов Н. В. История развития концепции каскадных реакторов. – Доклад на настоящей конференции.
3. Hummel H. H., Cohn C. E., Fischer G. J. et al. Experimental and theoretical studies of the coupled fast-thermal system ZPR-V. – Proceedings of the Second United Nations International Conf. on the peaceful

uses of atomic energy, held in Geneva 1–13 Sept. 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  $^{237}\text{Np}$ . – CP447, Nuclear Fission and Fission-Product Spectroscopy: Second International Workshop, Seyssins, France, April 1998. The American Institute of Physics, p. 61–66, 1998.

6. Завьялов Н. В., Колесов В. Ф., Иванин И. А., Ильяев Р. И., Житник А. К., Кувшинов М. И., Нефедов Ю. Я., Пунин В. Т., Тельнов А. В., Фомушкин Э. Ф., Хоружий В. Х. 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 двухсекционного бланкета. – 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. / VI конференция по радиационной стойкости: Сборник докладов (г. Саров, 14–20 октября 2002 г.). Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2003. С. 100–104.

9. М. И. Кувшинов, С. В. Воронцов, В. П. Горелов и др. Тестовые критические эксперименты на установке ФКБН-2М. – ВАНТ. Сер. Физика ядерных реакторов, 2000, вып. 2/3, с. 142–149.

10. Дюррани С., Балл Р. Твердотельные ядерные детекторы: Пер. с англ. – 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 г. 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. – ВАНТ, 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.