

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ И РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СБОРОК, СОДЕРЖАЩИХ $^{237}\text{Np}$ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ

### EXPERIMENTAL AND CALCULATED RESEARCHES OF NUCLEAR-PHYSICS CHARACTERISTICS OF ASSEMBLIES CONTAINING $^{237}\text{Np}$ IN THE CORE

*А. А. Кайгородов, Э. А. Гуменных, А. А. Девяткин, И. Ю. Дроздов, Н. В. Завьялов,  
М. И. Кувшинов, А. В. Панин, С. В. Финогеев, В. Х. Хоружий*  
*A. A. Kajgorodov, E. A. Gumennykh, A. A. Devyatkin, I. Yu. Drozdov, N. V. Zavialov, M. I. Kuvshinov,  
A. V. Panin, S. V. Finogeev, V. Kh. Khoruzhiy*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия  
Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental Physics

Представляемые в данной работе комплексные ядерно-физические эксперименты на критических сборках, содержащих металлический  $^{237}\text{Np}$ , проведены в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке ФКБН-2М. Масса деталей из металлического нептуния в исследуемых сборках составляла ~5 кг. Для доведения до критического состояния в сборках использовались детали из  $^{239}\text{Pu}$  (98%) в  $\delta$ -фазе и  $^{235}\text{U}$  (36%) в активной зоне, а также детали из дюралюминия и  $^{238}\text{U}$  в качестве отражателя. В качестве тестовых параметров исследовались спектральные характеристики в центральной полости критических систем и множающие параметры.

The presented in the given paper complex nuclear-physics experiments on critical assemblies containing metal  $^{237}\text{Np}$  were carried out on FKBN-2M facility, RFNC-VNIIEF. The mass of components of metal neptunium in the assemblies under research constituted ~5kg. To bring the system to the critical state there were used in the assemblies the components of  $^{239}\text{Pu}$  (98%) in  $\delta$ -phase and  $^{235}\text{U}$  (36%) in the core as well as the components of duralumin and  $^{238}\text{U}$  as reflector. As test parameters there were investigated spectral characteristics in the central cavity of critical systems and multiplying parameters.

При работе энергетического ядерного реактора в результате ядерных реакций в значительных количествах нарабатываются различные трансурановые элементы, в том числе и нептуний. Нептуний-237 является пороговым делящимся материалом, порог реакции деления нейтронами составляет примерно 500 кэВ. Выше порога значенные сечения реакции деления сравнимо со значением сечения деления для  $^{235}\text{U}$ . При делении нуклида  $^{237}\text{Np}$  образуется около трех вторичных нейтронов.

В мире активно рассматриваются вопросы по использованию данных актинидов в различных энергетических установках [1]–[3]. Для расчетного моделирования работы таких устройств необходима верификация нейтронно-физических данных для материалов, входящих в их состав.  $^{237}\text{Np}$  является в этом отношении малоизученным. Так, для «голового» шара из  $^{237}\text{Np}$  до сих пор не установлено экспериментальное значение критической массы. В настоящее время нет промышленного производ-

ства нептуния в твердом виде (он хранится в составе отработанного ядерного топлива). Поэтому в мире пока отсутствует металлический  $^{237}\text{Np}$  в количестве, необходимом для прямого решения вопроса (путем последовательного монтажа нептуниевых деталей на специальном стенде и доведения сборки до критического состояния, как это осуществлялось для других делящихся материалов). Вследствие этого для верификации библиотек нейтронно-физических данных этого нуклида проводятся тестовые эксперименты с критическими сборками, в которых детали из металлического  $^{237}\text{Np}$  составляют только небольшую часть их активной зоны [4]. Уточнение значений критических параметровборок, содержащих  $^{237}\text{Np}$ , способствует также повышению ядерной безопасности при обращении с этим материалом.

Представляемые в данной работе комплексные ядерно-физические эксперименты на критических сборках, содержащих металлический  $^{237}\text{Np}$ , проведены в РФЯЦ-ВНИИЭФ на установке

ФКБН [5]. Детали из  $^{237}\text{Np}$  размещались во внутренней части сферической сборки. Масса нептуния в исследуемой системе составляла  $\sim 5$  кг [6]. Каждая из используемых в экспериментах полусфер из нептуния зачехлована в оболочку из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм. Нептуниевые детали окружались деталями из комплектов хорошо изученных ранее сборок из  $^{235}\text{U}$  (36%) [7] или  $^{239}\text{Pu}$  (98%) в  $\delta$ -фазе [8]. Плутониевые и урановые детали покрыты антикоррозионным медно-никелевым слоем толщиной  $\sim 50\mu$ . Для доведения данных размножающих систем (РС) до критического состояния использовались детали из дюралюминия (для АЗ из нептуния и урана) либо из обедненного урана (для АЗ из нептуния и плутония). В собранном виде исследуемые сборки имели форму, близкую к сферической. На рис. 1–2 изображены схематические разрезы исследованных на установке ФКБН сборок с нептуниевым вкладышем.

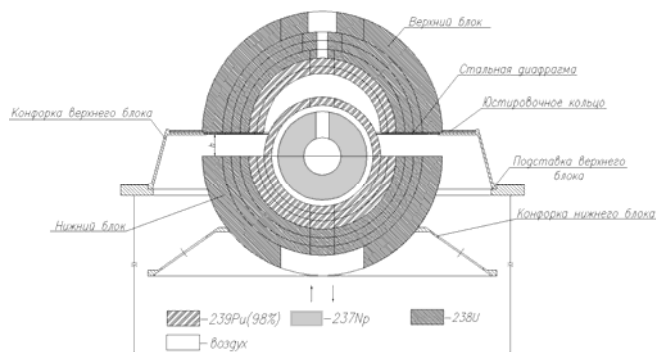


Рис. 1. Исследуемая РС с АЗ из  $^{237}\text{Np}$  и  $^{239}\text{Pu}$  (98%) в  $\delta$ -фазе на установке ФКБН

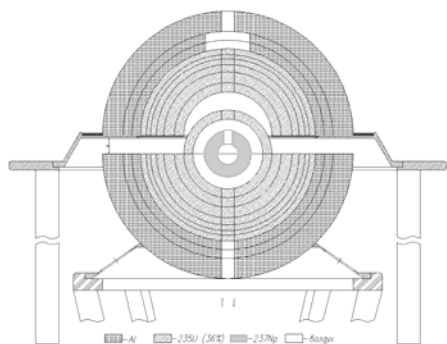


Рис. 2. Исследуемая РС с АЗ из  $^{237}\text{Np}$  и  $^{235}\text{U}$  (36%) на установке ФКБН

Как видно из рис. 1–2, между полусферами из  $^{237}\text{Np}$  и деталями из делящихся материалов существовал воздушный зазор. Для формирования различного спектра нейтронов в центральной области, заполненной нептунием, воздушный за-

зор между полусферами из  $^{237}\text{Np}$  и  $^{235}\text{U}$  (36%) заполнялся либо стальными, либо полиэтиленовыми деталями (рис. 3–4). При отсутствии таких деталей нижняя нептуниевая полусферическая деталь располагалась на тонкой дюралюминиевой проставке.

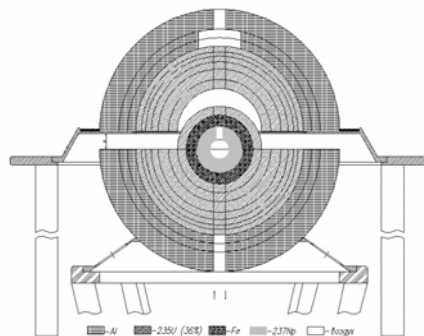


Рис. 3. Исследуемая РС с АЗ из  $^{237}\text{Np}$  и  $^{235}\text{U}$  (36%) с заполненным воздушным зазором стальными деталями на установке ФКБН

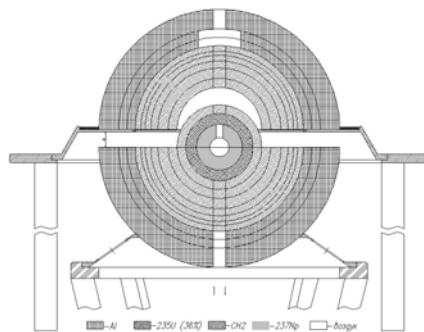


Рис. 4. Исследуемая РС с АЗ из  $^{237}\text{Np}$  и  $^{235}\text{U}$  (36%) с заполненным воздушным зазором полиэтиленовыми деталями на установке ФКБН

В экспериментах также определены критические параметры сборок, в которых вкладыш из  $^{237}\text{Np}$  был удален, и система доводилась до критического состояния путем увеличения толщины внешнего отражателя для РС с АЗ из  $^{235}\text{U}$  (36%) или количества делящегося материала для РС с АЗ из  $^{239}\text{Pu}$  (98%). Такие эксперименты позволяли определить влияние нептуниевых деталей на критичность размножающих систем.

Процедура критмассовых измерений на установке ФКБН заключается в следующем. Сперва последовательно производится ручная сборка нижнего (НБ) и верхнего (ВБ) блоков РС. Затем дистанционно части РС сближаются друг с другом. В процессе сближения частей определяется степень подкритичности РС в относительных единицах  $\Delta = 1000/Q$  с помощью метода обратного умножения [9]. Здесь  $Q$  – коэффициент умножения:

$$Q = (N - N_{\Phi})/N_{\text{ист}}, \quad (1)$$

где  $N$  и  $N_{\Phi}$  – скорости счета детектора от сборки с  $^{252}\text{Cf}$  источником нейтронов в центре и без него,  $N_{\text{ист}}$  – скорость счета детектора от  $^{252}\text{Cf}$  источника в макете сборки из стальных полусфер.

Путём изменения состава деталей в системе на стенде установки подбирается конфигурация, близкая к критической. Тщательно измеряется реактивность  $\rho_0$  подобранной системы. Затем для дальнейшего формирования расчетной модели исследуемой критической системы измеряются возмущения реактивности РС технологическими опорами, деталями АЗ, отражателя. Реактивность определяется методом обращенного решения уравнения кинетики (ОРУК) [10].

Реактивность модели экспериментальной сборки определялась по соотношению

$$\rho_{\text{м}} = \rho_0 - \Delta\rho_{\text{оп}} + \Delta\rho_{\text{н}} \cdot 2, \quad (2)$$

где  $\rho_0$  – значение реактивности РС при сомкнутом на диафрагме её нижнего и верхнего блоков;

$\Delta\rho_{\text{оп}}$  – возмущение реактивности базовой РС, обусловленное удалением опор для нижнего и верхнего блоков. Данная величина определяется путем добавления аналогичных дополнительных опор к РС;

$\Delta\rho_{\text{н}}$  – возмущение реактивности базовой РС, обусловленное сближением частей РС на 1 мм. Так как горизонтальная опора для ВБ, на которой происходит смыкание частей сборки, имеет толщину 2 мм, то блоки сферизованной сборки, свободной от опор, необходимо сдвинуть также на 2 мм. Поэтому в формуле (2) поправка на сближение ВБ и НБ  $\Delta\rho_{\text{н}}$  входит с коэффициентом 2.

$\rho_{\text{м}}$  обычно не равна нулю. Путём изменения одной из характеристик модели (как правило, массы, добавляемой или удаляемой из сборки) расчетная модель сферизуется и условно доводится до критического состояния:  $\rho = 0$ ;  $K_{\text{эфф}} = 1$ . Методики введения таких поправок подробно изложена в [7], [8]. Погрешность  $K_{\text{эфф}}$  сферизованных расчетных моделей для исследованных в данной работе систем составляет  $\Delta K_{\text{эфф}} \approx 0,003$ .

Размеры и масса сферических слоёв в критических сферических моделях исследованных сборок при стационарной температуре её наружной поверхности  $25^{\circ}\text{C}$  приведены в таблицах 1–8. Нуклидный состав используемых в настоящих экспериментах сферических слоев из  $^{239}\text{Pu}$  (98%) в  $\delta$ -фазе и  $^{238}\text{U}$  (обедн.) содержатся в [8]: (PU-MET-FAST-41). Нуклидный состав используемых в данной работе сферических слоев из  $^{235}\text{U}$  (36%) содержатся в [7]: (IEU-MET-FAST-003). Металлический  $^{237}\text{Np}$  содержит примеси других нуклидов

примерно 0,3%. При формировании моделей допущены некоторые упрощения, связанные с гомогенным представлением сферических слоев по плотности и нуклидному составу. Существующие полюсные отверстия условно заполнялись соответствующим материалом. Поэтому плотность таких гомогенных слоев, если её вычислять по параметрам, представленным в таблицах 1–8, будет несколько ниже, чем для реальных материалов. Накопленный опыт по применению подобных упрощений показывает, что это внесет несущественную разницу при расчетных исследованиях. Нептуниевые полусферы также представлены в виде гомогенного шарика. Возмущение реактивности, обусловленное сферизацией нептуниевого вкладыша, не превышает статистической погрешности расчетов и признано несущественным.

Таблица 1

Характеристики сферической модели сборки  $^{237}\text{Np} + ^{239}\text{Pu}$  (98%) +  $^{238}\text{U}$ , критической с учетом запаздывающих нейтронов ( $K_{\text{эфф}} = 1,000 \pm 0,002$ )

Основной материал слоя	Радиусы слоёв, см		Масса слоя, г
	$R_{\text{внутренний}}$	$R_{\text{внешний}}$	
$^{237}\text{Np}$ ( $\approx 100\%$ )	1,7	4,09	4590
Воздух	4,09	4,66	–
$^{239}\text{Pu}$ (98%)	4,66	6,75	13137
$^{238}\text{U}$	6,75	11,0	76985

Таблица 2

Характеристики сферической модели сборки  $^{239}\text{Pu}$  (98%) +  $^{238}\text{U}$ , критической с учетом запаздывающих нейтронов ( $K_{\text{эфф}} = 1,000 \pm 0,002$ )

Основной материал слоя	Радиусы слоёв, см		Масса слоя, г
	$R_{\text{внутренний}}$	$R_{\text{внешний}}$	
$^{239}\text{Pu}$ (98%)	4,11	6,75	15200
$^{238}\text{U}$	6,75	11,00	76985

Таблица 3

Характеристики сферической модели сборки  $^{237}\text{Np} + ^{235}\text{U}$  (36%) + Al, критической с учетом запаздывающих нейтронов ( $K_{\text{эфф}} = 1,000 \pm 0,003$ )

Материал слоя	Радиусы слоёв, см		Масса слоя, г
	$R_{\text{внутренний}}$	$R_{\text{внешний}}$	
$^{237}\text{Np}$ ( $\approx 100\%$ )	1,7	4,09	4590
Воздух	4,09	6,00	–
$^{235}\text{U}$ (36%)	6,00	15,00	242172
Al	15,00	20,09	49540

Таблица 4

Характеристики сферической модели сборки  $^{235}\text{U}$  (36%)+Al, критической с учетом запаздывающих нейтронов ( $K_{\text{эфф}} = 1,000 \pm 0,003$ )

Материал слоя	Радиусы слоёв, см		Масса слоя, г
	$R_{\text{внутренний}}$	$R_{\text{внешний}}$	
$^{235}\text{U}$ (36%)	6,00	15,00	242172
Al	15,00	23,10	93776

Таблица 5

Характеристики сферической модели сборки  $^{237}\text{Np}+\text{Fe}+^{235}\text{U}$  (36%)+Al, критической с учетом запаздывающих нейтронов ( $K_{\text{эфф}} = 1,000 \pm 0,003$ )

Материал слоя	Радиусы слоёв, см		Масса слоя, г
	$R_{\text{внутренний}}$	$R_{\text{внешний}}$	
$^{237}\text{Np}$ ( $\approx 100\%$ )	1,7	4,09	4590
Fe	4,09	6,00	4138
$^{235}\text{U}$ (36%)	6,00	15,00	242172
Al	15,00	20,39	53480

Таблица 6

Характеристики сферической модели сборки  $\text{Fe}+^{235}\text{U}$  (36%)+Al, критической с учетом запаздывающих нейтронов ( $K_{\text{эфф}} = 1,000 \pm 0,003$ )

Материал слоя	Радиусы слоёв, см		Масса слоя, г
	$R_{\text{внутренний}}$	$R_{\text{внешний}}$	
Fe	4,09	6,00	4138
$^{235}\text{U}$ (36%)	6,00	15,00	242172
Al	15,00	23,73	104650

Таблица 7

Характеристики сферической модели сборки  $^{237}\text{Np}+\text{CH}_2+^{235}\text{U}$  (36%)+Al, критической с учетом запаздывающих нейтронов ( $K_{\text{эфф}} = 1 \pm 0,003$ )

Материал слоя	Радиусы слоёв, см		Масса слоя, г
	$R_{\text{внутренний}}$	$R_{\text{внешний}}$	
$^{237}\text{Np}$ ( $\approx 100\%$ )	1,7	4,09	4590
$\text{CH}_2$	4,09	6,00	480
$^{235}\text{U}$ (36%)	6,00	15,00	242172
Al	15,00	19,58	43260

Таблица 8

Характеристики сферической модели сборки  $\text{CH}_2+^{235}\text{U}$  (36%)+Al, критической с учетом запаздывающих нейтронов ( $K_{\text{эфф}} = 1 \pm 0,003$ )

Материал слоя	Радиусы слоёв, см		Масса слоя, г
	$R_{\text{внутренний}}$	$R_{\text{внешний}}$	
$\text{CH}_2$	4,09	6,00	480
$^{235}\text{U}$ (36%)	6,00	15,00	242172
Al	15,00	17,02	16252

Сравнительная характеристика геометрических параметров расчетных моделей исследованных критических систем приведена на рис. 5. Из представленных данных можно сделать следующие выводы:

– при сопоставлении систем с незаполненным воздушным зазором  $4,09 \text{ см} < r < 6,00 \text{ см}$  заметно, что нептуний играет значимую роль в размножении нейтронов. Такая же картина наблюдается и при заполнении воздушного зазора стальными деталями, поскольку железо не сильно меняет характер спектра нейтронов в этой области КС;

– стальные полусферы являются разбавителями в КС (путем поглощения части нейтронов в АЗ), поэтому в отличие от аналогичныхборок без заполнения воздушного зазора требуется несколько больше дюралюминиевого отражателя для доведения их до критичности;

– при заполнении воздушного зазора  $4,09 \text{ см} < r < 6,00 \text{ см}$  полиэтиленом нептуний представляется как поглотитель нейтронов, поскольку значительная часть замедленных в полиэтилене нейтронов попадает под порог реакции деления нептуния. Особенно это заметно при сравнении КС с нептунием и полиэтиленом с аналогичной КС без нептуния. Извлечение нептуния приводит к значительному уменьшению толщины дюралюминиевого отражателя. В отсутствие нептуния замедленные в полиэтилене нейтроны вызывают повышенное количество делений  $^{235}\text{U}$ . Если же сравнивать КС с незаполненным воздушным зазором между нептунием и ураном и с заполнением этого зазора полиэтиленом можно убедиться, что толщины отражателя примерно одинаковы. Это говорит о том, что эффекты от реакций поглощения замедленных в полиэтилене нейтронов нептунием и от реакций деления замедленных в полиэтилене нейтронов урана-235 уравновешивают друг друга.

Наблюдаемые эффекты достаточно значимы и разнообразны, поэтому исследованные в данной

работе РС будут показательными при верификации библиотек нейтронно-физических данных.

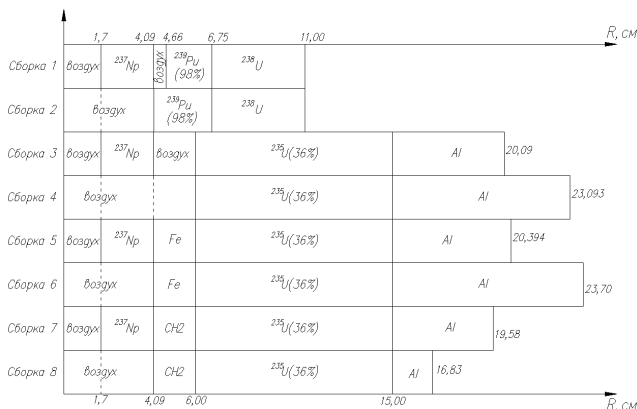


Рис. 5. Размеры и состав сформированных сферических моделей критических систем ( $K_{\text{эфф}} = 1$ )

Для сформированных критических моделей методом Монте-Карло по программе С-007 [11] с использованием различных библиотек нейтронно-физических данных вычислены значения  $K_{\text{эфф}}$ . Результаты расчета представлены в табл. 9.

В целом, наблюдается следующая тенденция в расчетных значениях  $K_{\text{эфф}}$ . Использование библиотек нейтронно-физических данных Jendl-4 приводит к совпадению значений  $K_{\text{эфф}}$  для сформированных расчетных моделей КС без нептуниевого вкладыша в пределах погрешностей. Расчетные данные  $K_{\text{эфф}}$  с использованием библиотек ENDF/B для этих КС также близки к единице. При появлении нептуниевого вкладыша для КС наблюдается значительное отклонение  $K_{\text{эфф}}$  от единицы. Это свидетельствует о несовершенстве нейтронно-физических данных нептуния.

С целью определения энергетического спектра нейтронов в центре изучаемой сборки были изме-

рены делительные интегралы нуклидов  $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{237}\text{Np}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{240}\text{Pu}$  и активационные интегралы реакций  $^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$ ,  $^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ ,  $^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$ ,  $^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$ ,  $^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$ ,  $^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92}\text{Nb}$ , нормированные на число нейтронов утечки из сборки. Определение активационных интегралов проводилось по измеренным значениям радиоактивности облученных образцов на эталонных радиометрических установках [12], входящих в состав метрологической базы нейтронных измерений ВНИИЭФ. Таким же путем проводилось определение и некоторых делительных интегралов. Делительные интегралы определялись также с помощью малогабаритных ионизационных камер деления (ИКД). Чувствительные слои ИКД и активационные датчики облучались в геометрическом центре полости сборки. Эти характеристики критических сборок получены также расчетным путем. Результаты экспериментов и расчетов спектральных характеристик представлены в табл. 10.

Сравнительный анализ расчетных и экспериментальных данных по делительным и активационным интегралам позволяет сделать следующие выводы:

- значения активационных интегралов, в целом, описываются достаточно приемлемо библиотечными нейтронно-физических данных;
- расчетные значения активационных и делительных интегралов для КС  $\text{Np}+\text{U}+\text{Al}$  и  $\text{Np}+\text{Fe}+\text{U}+\text{Al}$ , как и ожидалось, близки друг к другу;
- расчетные значения слабо зависят от выбранной библиотеки нейтронно-физических данных, поэтому сравнение расчетных спектральных характеристик с экспериментом не позволят отдать предпочтение какой-либо библиотеке констант.

Таблица 9

Расчетные значения  $K_{\text{эфф}}$  для сферически симметричных моделей экспериментальных критических систем

Состав сборки	Библиотека нейтронно-физических данных				
	ENDF/B7	ENDF/B7.1	JENDL-3.3	JENDL-4	JEF-3
$^{237}\text{Np}+^{239}\text{Pu}$ (98%)+ $^{238}\text{U}$	1,004	1,006	0,997	1,004	0,999
$^{239}\text{Pu}$ (98%)+ $^{238}\text{U}$	1,003	1,003	0,995	1,001	0,997
$^{237}\text{Np}+^{235}\text{U}$ (36%)+Al	1,011	1,012	1,010	1,009	0,996
$^{235}\text{U}$ (36%)+Al	1,004	1,003	1,002	0,998	0,984
$^{237}\text{Np}+\text{Fe}+^{235}\text{U}$ (36%)+Al	1,011	1,012	1,010	1,008	0,995
$\text{Fe}+^{235}\text{U}$ (36%)+Al	1,006	1,006	1,004	1,000	0,986
$^{237}\text{Np}+\text{CH}_2+^{235}\text{U}$ (36%)+Al	1,010	1,010	1,010	1,007	0,999
$\text{CH}_2+^{235}\text{U}$ (36%)+Al	1,005	1,007	1,003	1,002	0,999

### Заключение

На комплексе ФКБН проведены критмассовые эксперименты, направленные на верификацию

нейтронно-физических данных для  $^{237}\text{Np}$ . Из полученных данных можно сделать следующие выводы.

Таблица 10

Экспериментальные и расчетные значения числа ядерных реакций на ядро облучаемого детектора в центре нептуниевого вкладыша для критических систем

Состав сборки	Число реакций на ядро детектора, нормированное на нейтрон утечки из сборки, $\times 10^{-29}$	Библиотека нейтронно-физических данных					Эксперимент
		ENDF/B7	ENDF/B7.1	JENDL-3.3	JENDL-4	JEF-3	
$^{237}\text{Np}+$ $^{239}\text{Pu}+$ $^{238}\text{U}$	$^{235}\text{U}(n,f)$	1010	995	1030	991	1000	1040 $\pm$ 30
	$^{238}\text{U}(n,f)$	152	150	150	149	151	161 $\pm$ 5
	$^{237}\text{Np}(n,f)$	770	770	770	760	760	860 $\pm$ 30
	$^{239}\text{Pu}(n,f)$	1370	1340	1370	1350	1360	1520 $\pm$ 50
	$^{240}\text{Pu}(n,f)$	810	810	770	760	780	890 $\pm$ 30
	$^{115}\text{In}(n,n')$	90	89	88	89	90	102 $\pm$ 4
	$^{58}\text{Ni}(n,p)$	51	51	51	52	52	57 $\pm$ 2
	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	0,379	0,375	0,427	0,421	0,382	0,440 $\pm$ 0,013
	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$	12,6	12,1	11,7	12,0	12,3	12,0 $\pm$ 0,4
	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{93}\text{Nb}^m$	0,37	0,36	0,46	0,48	0,37	0,32 $\pm$ 0,01
$^{237}\text{Np}+$ $^{235}\text{U}+$ Al	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)$	106	102	109	101	103	104 $\pm$ 3
	$^{235}\text{U}(n,f)$	501	504	507	504	494	-
	$^{238}\text{U}(n,f)$	54,6	55,1	53,6	55,7	54,2	-
	$^{237}\text{Np}(n,f)$	307	317	309	319	305	-
	$^{239}\text{Pu}(n,f)$	653	658	651	666	647	-
	$^{115}\text{In}(n,n')$	33,1	33,5	32,4	33,8	33,2	-
	$^{58}\text{Ni}(n,p)$	18,0	18,3	17,8	18,6	18,2	-
	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	0,120	0,121	0,133	0,138	0,123	-
	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$	6,95	6,99	7,04	6,94	6,86	-
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{93}\text{Nb}^m$	0,109	0,106	0,133	0,148	0,112	-	
$^{237}\text{Np}+\text{Fe}$ + $^{235}\text{U}+$ Al	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)$	61,0	61,2	62,0	60,8	60,2	-
	$^{235}\text{U}(n,f)$	510	516	518	515	502	516 $\pm$ 15
	$^{238}\text{U}(n,f)$	52,2	53,1	51,1	53,3	52,2	-
	$^{237}\text{Np}(n,f)$	303	314	304	315	302	321 $\pm$ 10
	$^{239}\text{Pu}(n,f)$	661	669	661	675	653	744 $\pm$ 22
	$^{115}\text{In}(n,n')$	31,8	32,5	31,2	32,6	31,9	34,8 $\pm$ 1,1
	$^{58}\text{Ni}(n,p)$	16,7	17,1	16,5	17,3	16,9	16,9 $\pm$ 0,5
	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	0,108	0,109	0,122	0,126	0,110	0,112 $\pm$ 0,003
$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$	7,29	7,33	7,43	7,29	7,24	6,88 $\pm$ 0,21	
$^{237}\text{Np}+\text{C}$ $\text{H}_2+$ $^{235}\text{U}+$ Al	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{93}\text{Nb}^m$	0,086	0,086	0,096	0,135	0,124	0,087 $\pm$ 0,003
	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)$	63,9	64,1	65,4	63,9	63,4	63,5 $\pm$ 1,9
	$^{235}\text{U}(n,f)$	716	717	725	728	709	785 $\pm$ 24
	$^{238}\text{U}(n,f)$	51,0	51,2	50,2	50,1	50,5	-
	$^{237}\text{Np}(n,f)$	271	275	273	274	269	268 $\pm$ 8
	$^{239}\text{Pu}(n,f)$	896	897	890	895	885	912 $\pm$ 27
	$^{115}\text{In}(n,n')$	30,5	30,6	30,1	30,3	30,6	33,3 $\pm$ 1,0
	$^{58}\text{Ni}(n,p)$	16,9	16,8	16,8	16,6	17,1	17,2 $\pm$ 0,5
	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	0,116	0,114	0,128	0,125	0,118	0,121 $\pm$ 0,004
	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)$	14,2	13,9	13,9	13,8	14,2	16,5 $\pm$ 0,5
$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{93}\text{Nb}^m$	0,107	0,107	0,129	0,130	0,109	0,084 $\pm$ 0,003	
$^{197}\text{Au}(n,\gamma)$	915	916	910	907	878	837 $\pm$ 25	

1. Расчетные значения  $K_{эфф}$  (табл. 9) согласуются лучше с экспериментом для критических систем без нептуниевого вкладыша, чем для систем с нептуниевыми деталями. Это свидетельствует о несовершенстве нейтронно-физических данных для  $^{237}\text{Np}$ .
2. В целом наилучшее согласие расчетных и экспериментальных данных обеспечивает библиотека нейтронно-физических данных JENDL-4.

### Список литературы

1. Kolesov V. F. Aperiodic pulse reactors: Monograph in two volumes. Sarov: RFNC-VNIIEF, 2006.
2. Charles D. Bowman. Accelerator-Driven Systems for Nuclear Waste Transmutation. *Ann. Rev. Nucl. Part. Sci.*, 48, 505–556 (1998).
3. R. J. MacKinnon, S. D. Sevougian. Evaluation of nuclear fuel cycle options using systems engineering. XI International workshop “Fundamental plutonium properties”. Abstracts. 2011. p. 227.
4. R. Sanches, D. Loaiza, R. Kimpland, D. Hayes, Ch. Cappiello, W. Myers, P. Jaegers, S. Clement, K. Butterfield. Criticality of a  $^{237}\text{Np}$  sphere. ICNC’03, 2003, Tokai, Ibaraki, Japan, October 20–24, part I, pp. 201–203.
5. M. I. Kuvshinov, A. M. Voinov and V. G. Zagrafov. “The History of Works on Nuclear Criticality Safety in RENC-VNIIEF”, in Proc. SICNC-95 (Albuquerque). P. 12–22.
6. I. Yu. Drozdov, N. V. Zavialov, A. A. Kajgorodov, M. I. Kuvshinov, A. V. Panin. Experimental researches of nuclear-physics characteristics of assemblies containing [ $^{237}\text{Np} + ^{239}\text{Pu}$  (98%)] in the core and reflector of natural uranium. XIII International work

shop “Fundamental plutonium properties”. Abstracts. 2013. p. 112.

7. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments. Nuclear Energy Agency, Organization for Economic Cooperation and Development, NEA/NSC/DOC (95). Volume III. IEU-MET-FAST-003. Evaluators (VNIIEF) M. V. Gorbatenko, V. P. Gorelov, V. P. Yegorov, V. G. Zagrafov, A.N. Zakharov, V. I. Piyin, M. I. Kuvshinov, V. I. Yuferev, A. A. Malinkin.

8. International Handbook of Evaluated Criticality Safety Benchmark Experiments Nuclear Energy Agency, Nuclear Science Committee, NEA/NSC/DOC (95)/I, Organization for Economic Co-Operation and Development. – Paris (1996). PUMET-FAST-041.

9. Кипин Дж. Физические основы кинетики ядерных реакторов. – Москва: Атомиздат, 1967. – 186 с.

10. Казанский Ю. А., Матусевич Е. С. Экспериментальные методы физики реакторов. – Москва: Энергоатомиздат, 1984. – 272 с.

11. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. ВАНТ. Сер. Математическое моделирование физических процессов. – 2011. – Вып. 1. С.17–24.

12. Севастьянов В. Д., Кошелев А. С., Маслов Г. Н. Характеристики полей нейтронов. Источники мгновенных нейтронов деления, генераторы 14 МэВ нейтронов, исследовательские и энергетические реакторы, устройства, конвертирующие нейтронное излучение. Справочник. – Менделеево: «ВНИИФТРИ», 2007. с. 106, 134.