



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

**XVI международная конференция
«ЗАБАБАХИНСКИЕ НАУЧНЫЕ ЧТЕНИЯ»**

Критические и нейтронно-активационные benchmark-эксперименты с размножающими системами из металлического плутония без отражателя для валидации ядерно-физических данных и компьютерных кодов, моделирующих перенос нейтронов

**Юдов А.А., Адарченко В.А., Хмельницкий Д.В.,
Андреев С.А., Вайвод А.А.,
Бесов С.С., Костенко И.И., Сергина Д.И.**



Введение

Существуют проблемы в описании совокупности интегральных экспериментов с металлическим плутонием. При этом наибольший интерес представляют эксперименты с «голыми» (без отражателя) плутониевыми размножающими системами (РС).

В настоящее время возможности повышения точности нейтронных констант путем их непосредственного измерения в дифференциальных экспериментах исчерпаны, и интегральные эксперименты на критических сборках являются единственным способом совершенствования константного обеспечения.

В ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ им. академ. Е.И. Забабахина» на стенде для критическихборок (СКС) ФКБН-2 были проведены прецизионные интегральные критические, корреляционные и нейтронно-активационные эксперименты с различными размножающими системами (РС) из металлического плутония без отражателя с целью получения новых и уточнения имеющихся экспериментальных данных.

Нейтронно-активационные эксперименты с металлическим плутонием были проведены РФЯЦ-ВНИИТФ впервые. Эксперименты заключались в облучении различных типов нейтронно-активационных детекторов (ДНА), компактной РС, выведенной на небольшой уровень мощности (~15 Вт). Ценность указанных экспериментов заключается в том, что их результаты позволяют определить недостатки в константном описании нейтронного спектра в различных областях энергии.

Детали из плутония



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



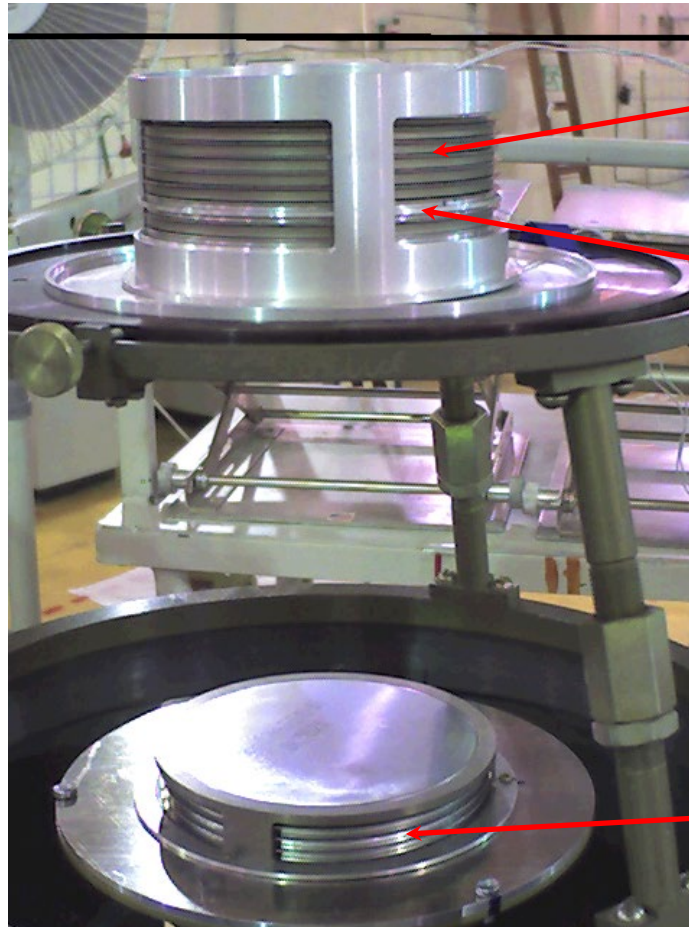
Диск из плутония в альфа-фазе герметично упакован в штампованный чехол из нержавеющей стали толщиной 0,2 мм и имеет толщину 4,5 мм, диаметр 120 мм

Сферические детали из плутония в дельта-фазе на которые гальваническим путем нанесено покрытие из никеля толщиной 0,1 мм



Сферические детали из плутония в альфа-фазе упакованы в штампованные чехлы из нержавеющей стали толщиной 0,2 герметично соединённые сварным швом по окружности основания каждой детали

Цилиндрические РС



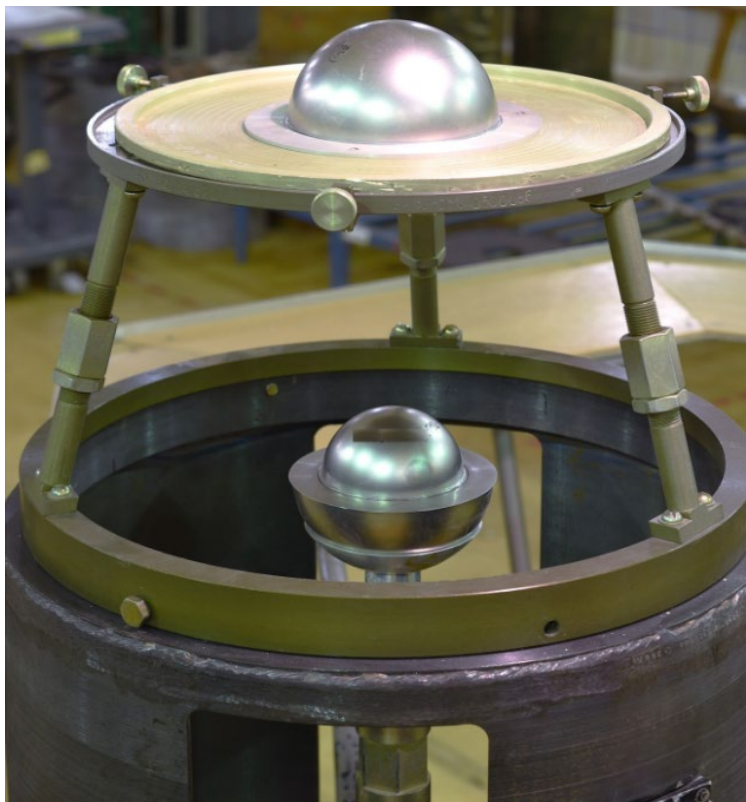
верхняя часть из 12
дисков из плутония

диски из алюминия
толщиной 2 мм с
отверстиями под
установку ДНА и
термопары

нижняя часть из 5
дисков из плутония

Внешний вид цилиндрической РС369-1
из плутония

Сферические РС



Внешний вид РС394



Внешний вид РС395-1

Комбинированные РС из плутония в альфа- и дельта фазе



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

Данная работа обусловлена необходимостью уточнения данных и является дополнением ранее выполненных на СКС ФКБН-2 исследований с близкой по составу РС305 *.

Полученные по программе ПРИЗМА-Д результаты расчетов $K_{эф}$ для критического состояния РС305 показали занижение расчетных значений по сравнению с экспериментом на 0,6...0,7% для констант БАС и на 0,35...0,5 % для констант ENDF BVI, что соответствует

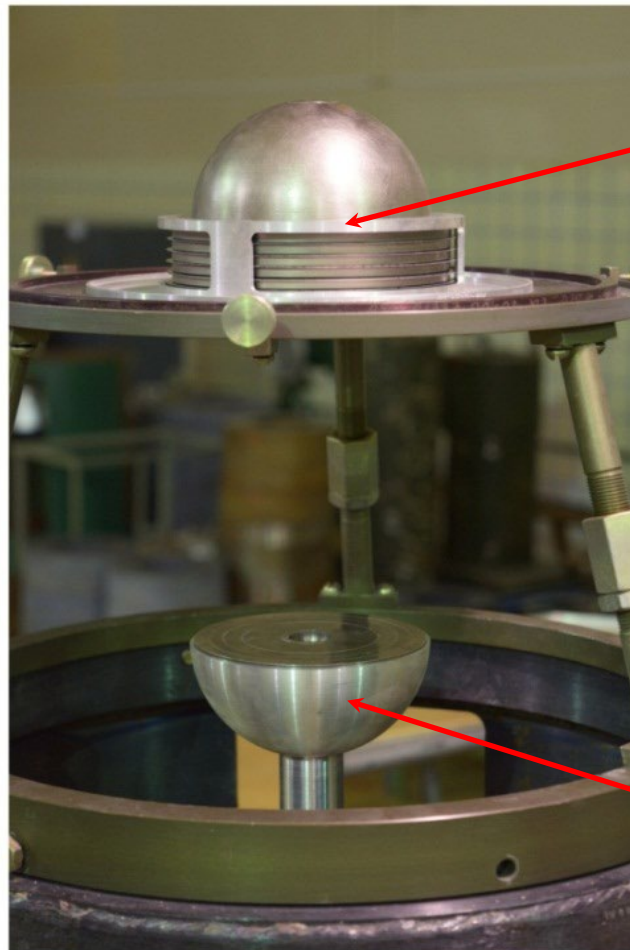
$$\Delta K = K_{эф}^P - K_{эф}^Э = (6,5 \pm 1,2) \cdot 10^{-3} (2\sigma) \text{ для констант БАС}$$

и

$$\Delta K = (4,2 \pm 1,2) \cdot 10^{-3} (2\sigma) \text{ для констант ENDF BVI.}$$

* Оценка погрешности расчетов времени жизни мгновенных нейтронов в системе из металлического плутония / Ершова Л.С., Хмельницкий Д.В., БесовС. С. и др. // Атомная энергия. - 2013. - Т. 114, вып. 3. - С. 165-168.

Комбинированные РС из плутония в альфа- и дельта фазе



верхняя часть из семи дисков, сложенных друг на друга, полусфер из плутония в δ -фазе.

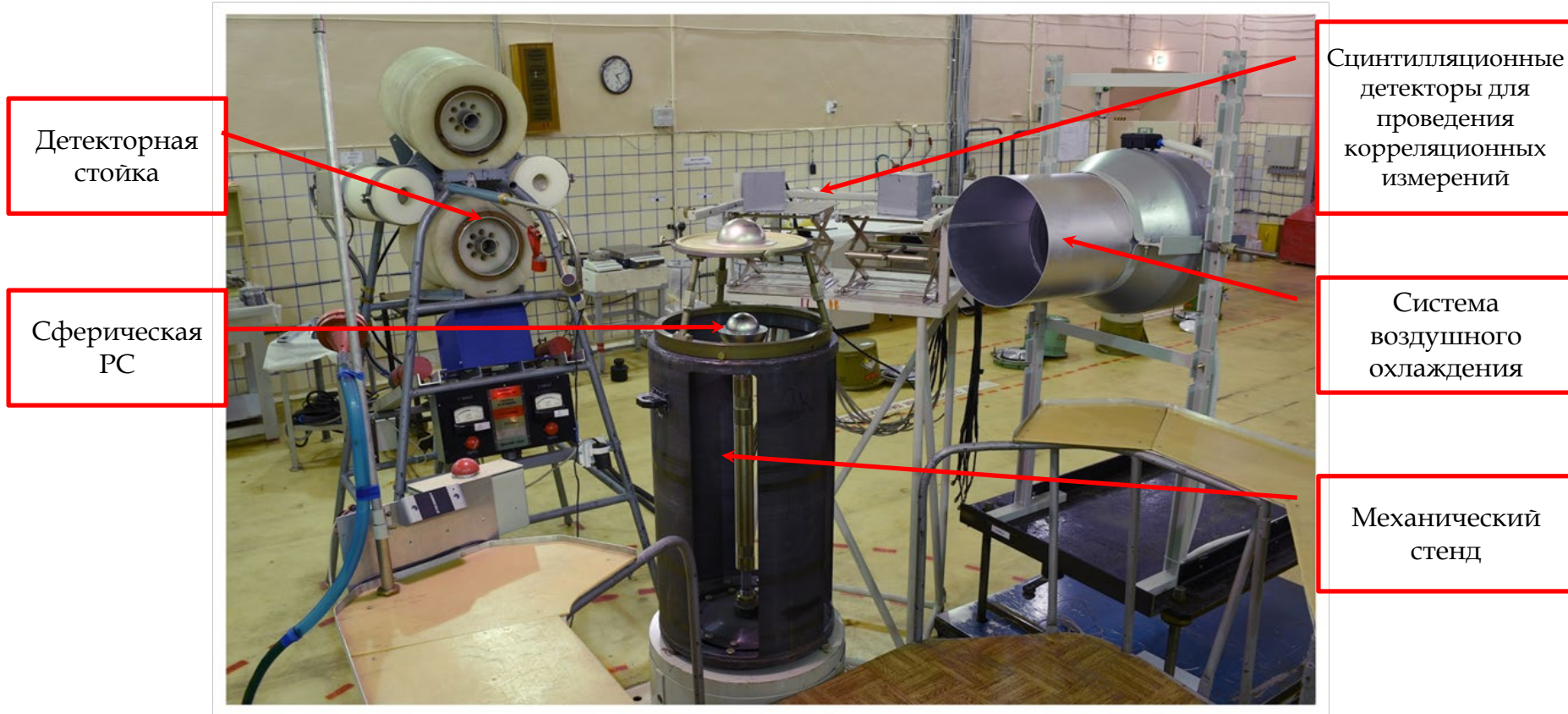
нижняя часть из пяти полусфер из плутония в δ -фазе

Внешний вид комбинированной РС418

Технология проведения экспериментов



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ



Внешний вид собранной сферической РС395 и аппаратуры в реакторном зале СКС
ФКБН-2



Измерение критического зазора

На первом этапе проводятся «нулевые» измерения, в которых все детали РС из делящегося материала заменяются деталями из инертных материалов той же формы с макроскопическими сечениями рассеяния и поглощения, близкими к соответствующим величинам для ДМ (например, сталь, медь, обедненный уран). В «нулевых» измерениях определяется скорость счета нейтронов D_0 , покидающих инертный макет РС установленным в нем нейтронным источником (например, плутоний-бериллиевым) за вычетом фона.

На втором этапе проводится ручная сборка двух частей РС с делящимися материалами. В процессе дистанционного пошагового сближения частей системы для серии значений зазора H определяется скорость счета D нейтронов, выходящих из РС, за вычетом фона, и вычисляется коэффициент умножения нейтронов Q по отношению к используемому источнику $Q = D/D_0$.

Состояние запаздывающей критичности (величина критзазора $H_{кр}$) определяется путем экстраполяции в ноль зависимости обратного коэффициента умножения $Q^{-1} = D_0/D$ от зазора H



Корреляционные измерения

В корреляционных измерениях определяется зависимость постоянной спада мгновенных нейтронов от величины зазора между частями РС $a(H)$ и проводится определение тангенса угла наклона da/dH экспериментальной зависимости для РС, находящейся вблизи критического на запаздывающих нейтронах состояния. Величина da/dH с точностью до постоянного коэффициента определяет среднее время жизни мгновенных нейтронов в РС.

Корреляционные измерения проводятся на СКС ФКБН-2 с помощью аппаратно-программного комплекса, который работает в счётном режиме и состоит из детектирующей части, включающей в себя набор пластиковых сцинтилляционных детекторов, а также систему формирования сигналов и вычислительной части – ЭВМ с измерительной высокоскоростной процессорной-платой и программным обеспечением, специальной разработки.



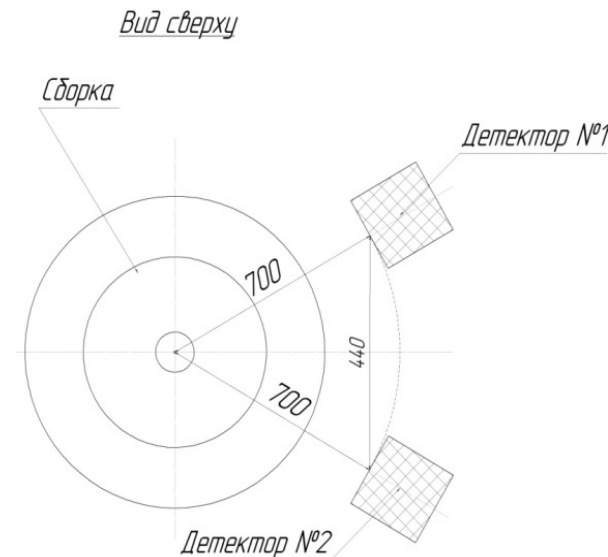
Корреляционные измерения

По зарегистрированным сигналам рассчитывались автокорреляционные функции детектора №1 (01-01) и детектора №2 (02-02), взаимно корреляционная функция двух детекторов №1 и №2 (01-02). Расчет производится по следующей формуле:

$$\tilde{N}_{xy}(\tau_m) = \sum_{K=1}^K \sum_{n=0}^{M-m-1} x(t_n + \tau_m) y(t_n)$$

Здесь M – число каналов одном блоке, K – полное число обработанных блоков за время измерения, $m = 0 \dots M-1$, $\tau_m = m\Delta t$, $\Delta t = 1$ нс - ширина отдельного канала, $t_n = n\Delta t$.

Общая схема корреляционных измерений с плутониевой РС





Метод нейтронно-активационных измерений

Метод заключается в облучении нейтронно-активационного детектора в нейтронном поле исследовательской ядерной установки, измерении активности образовавшегося радионуклида, расчёте параметров нейтронного поля с использованием аттестованных характеристик детектора и справочных данных о ядерно-физических константах радионуклидов и нейтронных реакциях. Первичной экспериментально определяемой величиной в данном методе является число взаимодействий (реакций), нормированное на одно ядро изотопа-мишени, - активационный интеграл Q (АИ):

$$Q = \int_0^{\infty} \Phi(E) \cdot \sigma(E) dE,$$

где $\Phi(E)$ - энергетическое распределение флюенса нейтронов,
 $\sigma(E)$ - микроскопическое сечение реакции.

Проводилось облучение до десяти типов ДНА: Al, Au, Cu, Mg, In, Ti, Nb, Ni, F, Sc, размещенных в центральной области и на поверхности РС, выведенной на небольшой уровень мощности.

Детекторы представляли собой металлические диски, изготовленные из особо чистого материала. Диаметр дисков составляет ~20 мм, толщина от 0,02 до 2 мм. Измерение активности облученных ДНА проводилось с использованием полупроводникового детектора из особо чистого германия с высоким энергетическим разрешением.

Ядерно-физические и технические характеристики ДНА



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

п/п	Реакция активации	Содерж. изотопа, %	Область чувств.	$T_{1/2}$	$E_{\gamma\gamma}$ МэВ (выход на 100 распадов)	Размеры, мм
1	$^{113}\text{In}(n,\gamma)^{114\text{m}}\text{In}$	4,28	0,025 эВ	49,51 дня	0,190(17)	$\varnothing 20 \times 1$ $\varnothing 20 \times 2$
2	$^{197}\text{Au}_{79}(n,\gamma)^{198}\text{Au}_{79}$	100	4,9 эВ	2,696 дня	0,412(95)	$\varnothing 10 \times 0,02$
3	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$ $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	69,17 30,83	579 эВ	12,70 час	0,511(38)	$\varnothing 20 \times 0,2$
4	$^{45}\text{Sc}_{21}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}_{21}$	100	7,17 кэВ	83,83 дня	0,889(100), 1,120(100)	$\varnothing 20 \times 0,3$
5	$^{115}\text{In}(n,n')^{115\text{m}}\text{In}$	95,72	>1,2 МэВ	4,486 час	0,336(47)	$\varnothing 20 \times 1$ $\varnothing 20 \times 2$
6	$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$ $^{48}\text{Ti}(n,np)^{47}\text{Sc}$	7,3	>2,2 МэВ	3,35 дня	0,159(73)	$\varnothing 20 \times 2$
7	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	68,27	>2,6 МэВ	70,78 дня	0,81(99)	$\varnothing 20 \times 2$
8	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}_{11}$	78,99	>7,2 МэВ	15,02 час	1,369(100)	$\varnothing 20 \times 2$
9	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	100	>7,4 МэВ	15,02 час	1,369(100)	$\varnothing 20 \times 2$
10	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92\text{m}}\text{Nb}$	100	>10,5 МэВ	10,15 дня	0,934(99)	$\varnothing 20 \times 2$
11	$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$	100	>12,8 МэВ	109,8 мин	0,511(194)	$\varnothing 20 \times 1$ $\varnothing 20 \times 2$



Метод нейтронно-активационных измерений

Расчет отношения числа реакций к количеству ядер для различных ДНА – Q проводился по следующим формулам:

$$Q = \frac{N}{M \cdot T_l} \cdot K_1 \cdot K_2 \cdot K_3 \cdot A_{pin} \cdot K_a \cdot K_h \cdot K_d \cdot K_s$$

где N – чистая площадь пика, имп.;

T_l – живое время набора в секундах;

M – масса активируемого элемента, г;

K_1 – коэффициент поправки на распад нуклида во время измерения T_l ;

K_2 – коэффициент поправки на распад нуклида со времени конца облучения до начала измерения $t_{охл.}$;

K_3 – коэффициент, учитывающий распад во время облучения образца $t_{обл.}$;

$A_{pin.}$ – расчетная константа;

K_a – поправка на самопоглощение гамма-квантов в материале ДНА;

K_h – поправка на отклонение от штатной геометрии градуировки эффективности регистрации фотонов ППД;

K_d – поправка на размеры ДНА, отличающегося по диаметру от точечного источника;

K_s – поправка на каскадное суммирование, рассчитывалась с использованием программы “Nuclide Master” методом Монте-Карло с использованием оцененных ядерных данных ENSDF.

Погрешность абсолютных измерений активационных интегралов определялась по аттестованной методике и составила от ~4 до ~8 % (2σ).

Работа установки на мощности по облучению активационных детекторов



После вывода установки на мощность управление установкой осуществлялось путем поэтапного сближения частей с шагом не более $\sim 0,003$ мм, что соответствует вводу реактивности $\sim 0,01 \beta_{эф}$.

После каждого ввода реактивности система выходила на большой период разгона, что приводило к незначительному увеличению мощности и плавному разогреву АЗ, что приводило к последующему гашению мощности вследствие теплового расширения делящегося материала.

Разогрев АЗ на температуру $\Delta T \sim 1,0-1,5$ °С соответствовал отрицательному вводу реактивности $\sim 0,01 \beta_{эф}$, что позволяло компенсировать введенную ранее положительную величину реактивности без разведения частей РС. Указанный цикл составлял приблизительно 10-15 мин.

За час работы на мощности температура в центре АЗ увеличивалась на 8-10 °С с учётом принудительного воздушного охлаждения РС.

Работа установки на мощности по облучению активационных детекторов



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

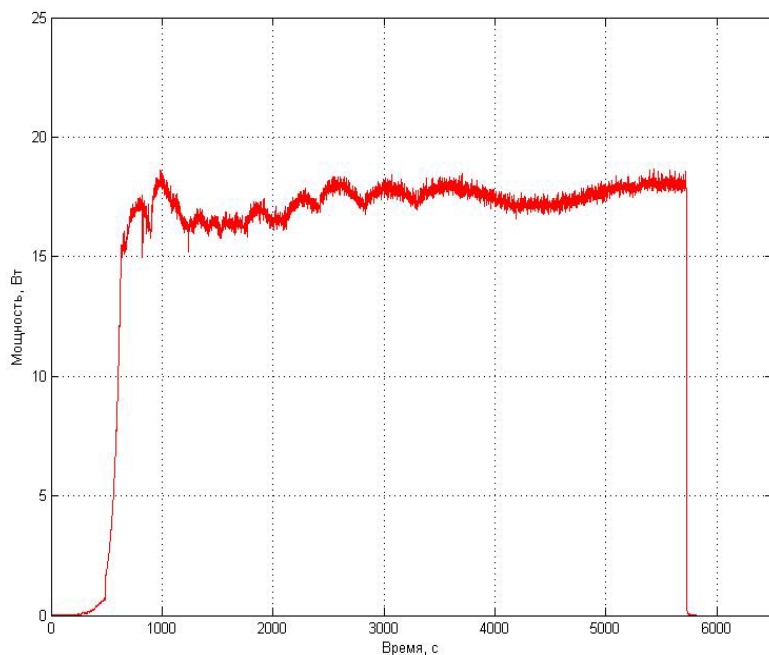


График изменения мощности РС395-1 при облучении ДНА

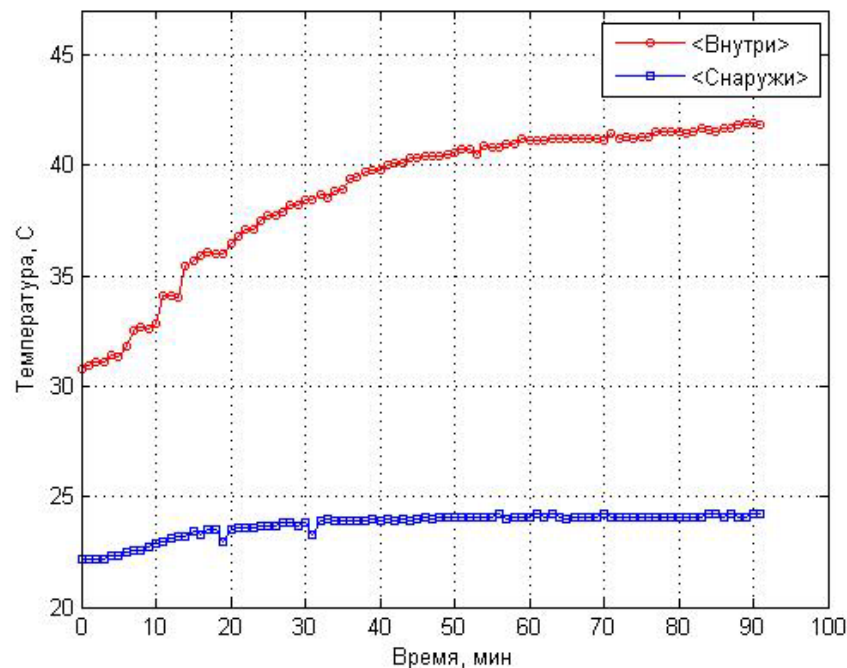


График изменения температуры внутри и снаружи РС395-1 при облучении ДНА

Результаты критических экспериментов



1 Цилиндрические РС

Наименование РС (краткое описание)	$H_{кр}$, мм (2 σ)	$\frac{\partial \alpha}{\partial H}$, мкс ⁻¹ /мм, (2 σ)	$\partial \rho / \partial H$, β /мм (2 σ)
РС364(8Pu+8Pu)	4,04±0,14	-	-
РС365 (4Pu+12Pu)	5,86±0,10	-1,30±0,02	-
РС368 (5Pu+11Pu)	5,60±0,14	-	-
РС369-1 (5Pu+12Pu)	3,84±0,08	-1,805±0,039	2,74±0,16

2 Сферические РС

Наименование РС (краткое описание)	$H_{кр}$, мм (2 σ)	$\frac{\partial \alpha}{\partial H}$, мкс ⁻¹ /мм (2 σ)	$\partial \rho / \partial H$, β /мм (2 σ)
РС395	0,41± 0,06	-1,970±0,047	2,46±0,96
РС394	3,91± 0,12	-1,720±0,028	2,09±1,2
РС395-1	1,86±0,06	- 1,719±0,007	1,91±0,06

3 Комбинированные РС

Наименование РС (краткое описание)	$H_{кр}$, мм (2 σ)	$\frac{\partial \alpha}{\partial H}$, мкс ⁻¹ /мм (2 σ)	$\partial \rho / \partial H$, β /мм (2 σ)
РС417	5,16±0,08мм	-1,335±0,023	1,85±0,08
РС418	3,32±0,06мм	-1,640±0,016	2,16±0,08



Температурный коэффициент реактивности

Эксперименты проводились в режиме стабилизации температурного режима плутония. Контроль температуры осуществлялся путем установки термопар в центральную область и на внешнюю поверхность РС. По результатам экспериментов был проведен расчет температурного коэффициента реактивности.

Результаты оценки $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ и $\frac{\partial H_{кр}}{\partial T}$ (1σ) для плутониевых РС

Комбинированная РС417	$\frac{\partial \rho}{\partial T'} \frac{\beta_{эф}}{^{\circ}\text{C}}$	$-0,0151 \pm 0,0036$
	$\frac{\partial H_{кр}}{\partial T'} \frac{\text{мм}}{^{\circ}\text{C}}$	$-0,0081 \pm 0,0019$
Сферическая РС395	$\frac{\partial \rho}{\partial T'} \frac{\beta_{эф}}{^{\circ}\text{C}}$	$-0,0184 \pm 0,0006$
	$\frac{\partial H_{кр}}{\partial T'} \frac{\text{мм}}{^{\circ}\text{C}}$	$-0,0074 \pm 0,0002$
Цилиндрическая РС369-1	$\frac{\partial \rho}{\partial T'} \frac{\beta_{эф}}{^{\circ}\text{C}}$	$-0,0223 \pm 0,0042$
	$\frac{\partial H_{кр}}{\partial T'} \frac{\text{мм}}{^{\circ}\text{C}}$	$-0,0082 \pm 0,0015$

Результаты экспериментов по облучению ДНА для цилиндрической РС369-1

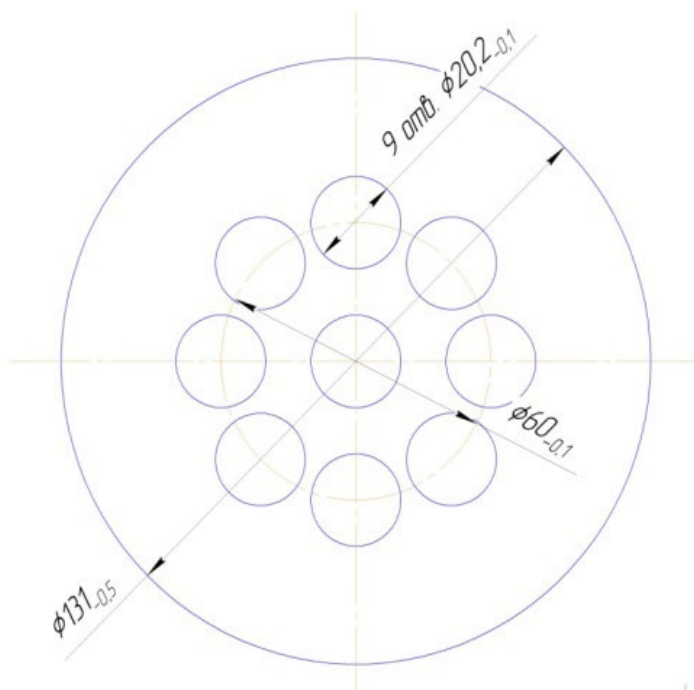


Схема размещения ДНА

ДНА размещались следующим образом: в центральное отверстие каждого алюминиевого диска были установлены ДНА из никеля, далее в 8 периферийных отверстий каждого диска были установлены следующие ДНА: Ni, Ti, In, Al, Mg, Nb, F и пакетом в одно отверстие набор тонких ДНА из Au, Cu и Sc. Облучение проводилось на средней мощности $\sim 14,5$ Вт

Результаты экспериментов по облучению ДНА для цилиндрической РС369-1



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

ДНА	Реакция активации	$Q_{\text{центр}} \text{ p/я}$ (%, 2 σ)	$Q_{\text{поверхность}} \text{ p/я}$ (%, 2 σ)	K	$\delta K, \%$ (1 σ)
Au	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	$2,649 \cdot 10^{-12}$ (3,4)	$1,022 \cdot 10^{-12}$ (7,9)	2,592	1,79
Cu	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu} +$ $^{65}\text{Cu}(n,2n)^{64}\text{Cu}$	$3,406 \cdot 10^{-13}$ (6,6)	$1,185 \cdot 10^{-13}$ (6,5)	2,874	0,52
Sc	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$	$1,716 \cdot 10^{-13}$ (8,5)	$6,764 \cdot 10^{-14}$ (8,6)	2,537	1,94
In	$^{113}\text{In}(n,\gamma)^{114m}\text{In}$	$6,014 \cdot 10^{-12}$ (3,7)	$2,302 \cdot 10^{-12}$ (6,0)	2,613	1,53
	$^{115}\text{In}(n,n')^{115m}\text{In}$	$4,469 \cdot 10^{-12}$ (8,2)	$1,813 \cdot 10^{-12}$ (5,4)	2,465	0,92
Ti	$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc} +$ $^{48}\text{Ti}(nn',p)^{47}\text{Sc}$	$4,338 \cdot 10^{-13}$ (4,5)	$1,734 \cdot 10^{-13}$ (5,5)	2,502	1,45
Ni	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	$2,396 \cdot 10^{-12}$ (3,4)	$1,013 \cdot 10^{-12}$ (3,4)	2,365	0,50
Ni центр		$2,995 \cdot 10^{-12}$ (3,9)	$1,235 \cdot 10^{-12}$ (3,4)	2,425	0,61
Mg	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	$3,914 \cdot 10^{-14}$ (5,8)	$1,642 \cdot 10^{-14}$ (5,8)	2,384	1,27
Al	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	$1,875 \cdot 10^{-14}$ (6,7)	$8,088 \cdot 10^{-15}$ (5,2)	2,318	1,74
Nb	$^{93}\text{Nb}(n,2n)^{92m}\text{Nb}$	$1,244 \cdot 10^{-14}$ (3,6)	$5,326 \cdot 10^{-15}$ (3,6)	2,336	0,33
F	$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$	$2,388 \cdot 10^{-16}$ (4,9)	$9,913 \cdot 10^{-17}$ (5,1)	2,409	1,23

Активационные интегралы измерены с относительной погрешностью от 3,4 до 8,6 % (2 σ) 20

Результаты экспериментов по облучению ДНА для сферической РС395-1



РФЯЦ-ВНИИТФ
РОСАТОМ

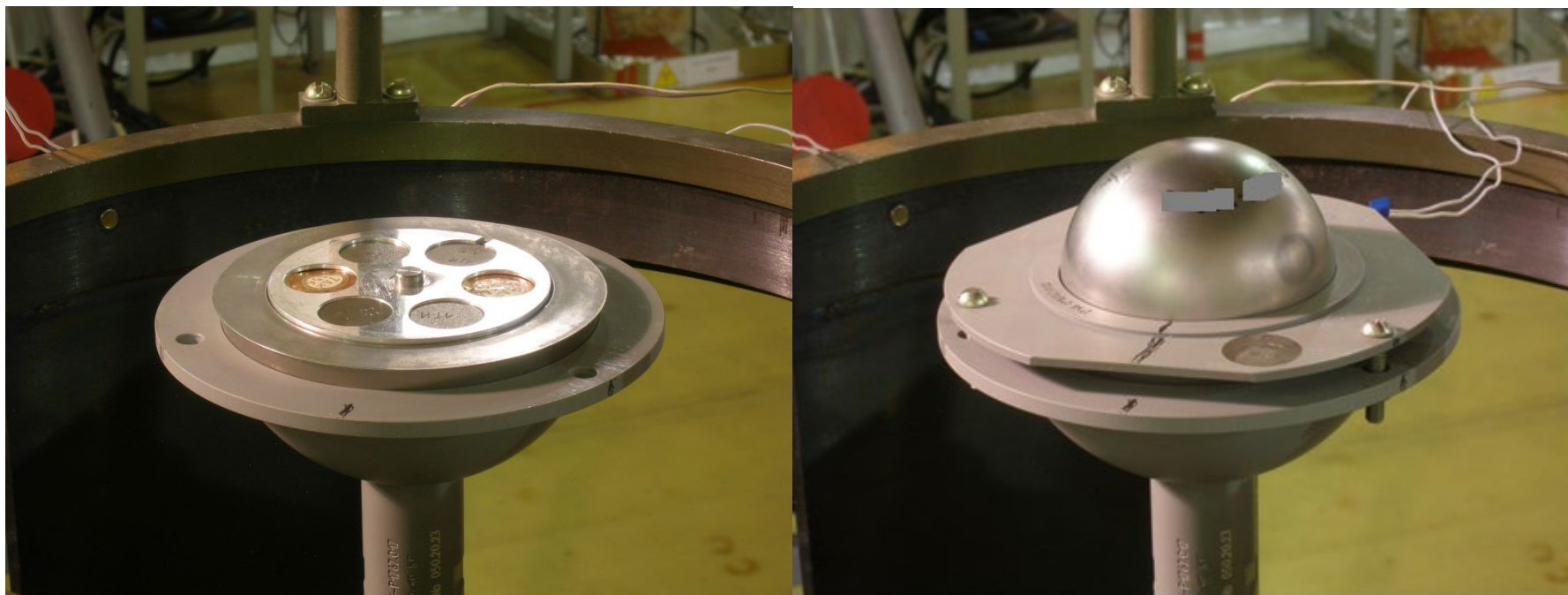


Схема размещения ДНА

В первом эксперименте было облучено три типа ДНА (Al, Mg, F), во втором – пять типов ДНА (Au, Cu, Ti, Ni, Sc)

Результаты экспериментов по облучению ДНА для сферической РС395-1



ДНА	Реакция активации	Q, р/я	$\delta Q, \%$ (2σ)	K
Au№154	$^{197}\text{Au}(n,\gamma)^{198}\text{Au}$	$3,93 \cdot 10^{-13}$	5,69	1,02
Au№156		$3,84 \cdot 10^{-13}$	5,69	
Cu№01	$^{63}\text{Cu}(n,\gamma)^{64}\text{Cu}$	$6,83 \cdot 10^{-13}$	5,31	1,01
Cu№04		$6,79 \cdot 10^{-13}$	5,31	
Sc№б/н	$^{45}\text{Sc}(n,\gamma)^{46}\text{Sc}$	$3,78 \cdot 10^{-13}$	5,57	
Ti№1	$^{47}\text{Ti}(n,p)^{47}\text{Sc}$	$9,33 \cdot 10^{-13}$	5,04	1,00
Ti№2		$9,30 \cdot 10^{-13}$	5,04	
Mg№82	$^{24}\text{Mg}(n,p)^{24}\text{Na}$	$7,94 \cdot 10^{-14}$	4,59	0,99
Mg№88		$8,01 \cdot 10^{-14}$	4,59	
Al№АЛ	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)^{24}\text{Na}$	$3,84 \cdot 10^{-14}$	4,66	0,99
Al№2-12		$3,86 \cdot 10^{-14}$	4,66	
FN№03	$^{19}\text{F}(n,2n)^{18}\text{F}$	$5,24 \cdot 10^{-16}$	5,22	1,05
FN№02		$5,01 \cdot 10^{-16}$	5,22	
Ni№55	$^{58}\text{Ni}(n,p)^{58}\text{Co}$	$5,15 \cdot 10^{-12}$	4,21	0,99
Ni№56		$5,19 \cdot 10^{-12}$	4,21	

Активационные интегралы измерены с относительной погрешностью от 4,2 до 5,7 % (2σ)

Заключение

Представлены результаты экспериментальных работ по комплексному исследованию нейтронно-физических характеристик цилиндрических, сферических и комбинированных размножающих систем из плутония без отражателя.

В ходе работ были определены следующие параметры РС:

- значение критического зазора между частями РС $H_{кр.зан}$ с погрешностью определения не более 0,03 мм (1σ);
- характеристики переходных нейтронных процессов – постоянные спада мгновенных нейтронов α и $\frac{\partial \alpha}{\partial H}$ с погрешностью не более 0,5 % (1σ);
- постоянная Росси α_R , критический зазор на мгновенных нейтронах $H_{кр.мгн}$, «вес» регулирующего элемента $\frac{\partial \rho}{\partial H}$;
- числа реакций и активационные интегралы ДНА, размещенных в центральной части и на поверхности РС;
- температурный коэффициент реактивности $\frac{\partial \rho}{\partial T}$ для «голых» сферических и цилиндрических плутониевых систем.

По результатам проведенных экспериментов были созданы расчетные бенчмарк-модели цилиндрической и сферической плутониевых РС.



Спасибо за внимание