



ВНИИНМ  
РОСАТОМ

# Численное моделирование нейтронных процессов в пассивном счетчике множественности надтепловых нейтронов RENMC

Владимиров Даниил Анатольевич, АО «ВНИИНМ»  
Рогожкин Владимир Юрьевич, АО «ВНИИНМ»  
Алеева Татьяна Борисовна, НИЯУ МИФИ

# Метод множественности нейтронов



Метод множественности нейтронов был предложен в развитие метода нейтронных совпадений для определения массы плутония в условиях вынужденного деления. В нем параметры анализируемого образца рассчитывают по измеренной скорости счета  $N_n$  истинных совпадений кратности  $n$ , которые связывают с факториальными моментами распределения множественности нейтронов соотношениями

$$N_n = S \varepsilon^n \chi_n \langle i(i-1) \dots (i-n+1) \rangle / n!$$
$$\chi_n = \chi^{n-1}$$

где  $S$  – скорость первичных событий (спонтанных делений и  $(\alpha, n)$  – реакций);

Калибровочные коэффициенты:  $\varepsilon$  – эффективность регистрации нейтронов;

$\chi$  – коэффициент отбора двойных совпадений во временных воротах длительностью  $G$ ;

$\langle i(i-1) \dots (i-n+1) \rangle = \sum_{i=n}^{\infty} i(i-1) \dots (i-n+1) P(i)$  – факториальный момент порядка  $n$ ;

$P(i)$  – распределение множественности нейтронов, рождающихся в одном первичном событии, включая нейтроны реакций вынужденного деления, которые вызваны поглощением в образце;

Модель метода представляет собой систему из трех уравнений, которые связывают

три измеряемые скорости счета

$N_1$  – одиночные нейтроны,

$N_2$  – двойные совпадения,

$N_3$  – тройные совпадения

с тремя параметрами объекта измерений:

$S$  - скоростью спонтанных делений  
(эффективной массой  $^{240}\text{Pu}$ ),

$M$  - коэффициентом умножения нейтронов,

$\alpha$ - отношением числа  $(\alpha, n)$ – нейтронов к числу  
нейтронов спонтанного деления,

Эффективная масса  $^{240}\text{Pu}$ :

$$m_{eff} = m_{Pu} \cdot (2,52 \cdot ^{238}\text{Pu} + ^{240}\text{Pu} + 1,68 \cdot ^{242}\text{Pu})$$

$$m_{eff} = C \cdot S_{sp} \quad C = \frac{1}{473,5} \quad [\text{с} \times \Gamma]$$

где  $m_{eff}$  - эффективная масса  $^{240}\text{Pu}$ ,

$m_{Pu}$  - масса плутония,

$^{238}\text{Pu}$  - м.д. изотопа  $^{238}\text{Pu}$ ,

$^{240}\text{Pu}$  - м.д. изотопа  $^{240}\text{Pu}$ ,

$^{242}\text{Pu}$  - м.д. изотопа  $^{242}\text{Pu}$ ,

# Постановка задачи



Целью настоящей работы является разработка модели счетчика множественности нейтронов RENMC, основанной на методе Монте-Карло, пригодной для использования в методиках измерений эффективной массы плутония-240. Актуальность работы заключается в необходимости контроля массы плутония при его вовлечении в замкнутый топливный цикл.

Для выполнения поставленной цели решались следующие задачи:

- 1) Оценка калибровочных коэффициентов – эффективности регистрации и коэффициента отбора совпадений по отношению к нейтронам, рожденным в образце
- 2) Оценка времени жизни нейтрона в установке по нескольким подходам
- 3) Использование полученных калибровочных коэффициентов в уравнениях множественности нейтронов с экспериментальными скоростями счета
- 4) Сравнение полученных значений эффективных масс плутония-240 для различных видов источников с паспортными значениями и выбор наиболее точного метода расчета калибровочных коэффициентов

в точечной модели суперделений

$$a + bM + cM^2 + M^3 = 0$$

$$a = \frac{-6N_3 v_{s1} (v_{f1} - 1)}{\varepsilon^2 \chi^2 N_1 (v_{s2} v_{f3} - v_{s3} v_{f2})}$$

$$b = \frac{2N_2 [v_{s3} (v_{f1} - 1) - 3v_{s2} v_{f3}]}{\varepsilon \chi N_1 (v_{s2} v_{f3} - v_{s3} v_{f2})}$$

$$c = \frac{6N_2 v_{s2} v_{f2}}{\varepsilon \chi N_1 (v_{s2} v_{f3} - v_{s3} v_{f2})} - 1$$

$$S_{sp} = \frac{\left[ \frac{2N_2}{\varepsilon \chi} - \frac{M(M-1)v_{f2}N_1}{v_{f1}-1} \right]}{\varepsilon M^2 v_{s2}}$$

$$m_{eff} = C \cdot S_{sp}$$

$$\alpha = \frac{N_1}{S_{sp} \varepsilon v_{s1} M} - 1$$

$N_1$  - экспериментальная скорость счета одиночных нейтронов

$N_2$  - экспериментальная скорость счета нейтронов двойных совпадений

$N_3$  - экспериментальная скорость счета нейтронов тройных совпадений

$\varepsilon$  - расчетная эффективность регистрации нейтронов

$\chi$  - расчетный коэффициент отбора совпадений

$v_{si}$  - факториальные моменты распределения множественности нейтронов спонтанного деления

$v_{fi}$  - факториальные моменты распределения множественности нейтронов вынужденного деления

## Счетчик множественности надтепловых нейтронов RENMC



В счетчике имеются 115 газоразрядных детекторов с  $\text{He-3}$  под давлением 10 атмосфер, диаметром 2,45 см и активной длиной 76 см, вставленных в полиэтиленовую матрицу. Число трубок в 1-м (от полости), 2-м, 3-м, 4-м кольцах составляет 24, 30, 29, 32 соответственно. Между полиэтиленовой матрицей с трубками с  $\text{He-3}$  и измерительной полостью расположен слой кадмия, сверху и снизу измерительной полости расположены графитовые торцевые заглушки толщиной в 15,2 см. Между слоем кадмия и стенкой корпуса счетчика находится не менее 5 см полиэтилена

## Построение модели счетчика в программном комплексе SERPENT

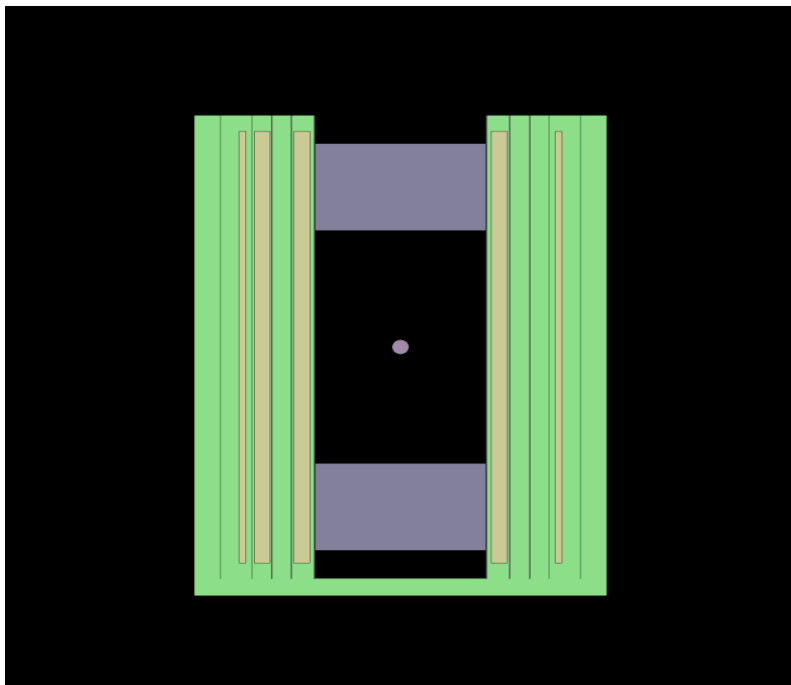


Рис.1.- построенная при помощи программного комплекса SERPENT геометрия счетчика RENMC в разрезе

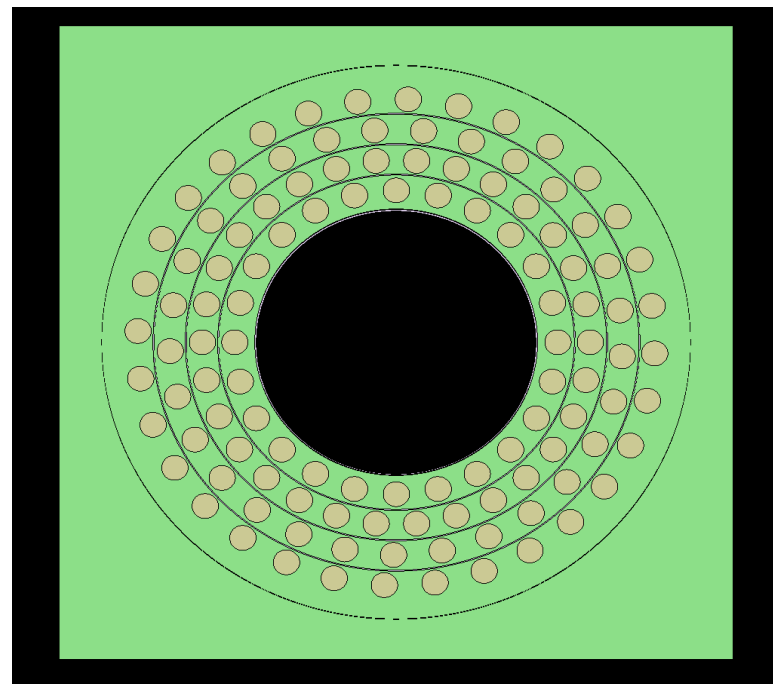


Рис.2. - построенная при помощи программного комплекса SERPENT геометрия счетчика RENMC в виде сверху

## Обоснование работоспособности математической модели

№ образца	S, н/с	$N_{1\text{ exp}}$ , имп./с	$N_{1\text{ расчет}}$ , имп./с	$\epsilon_{\text{exp}}$ , отн.ед.	$\epsilon_{\text{расчет}}$ рождение, ОТН. ед.	$\epsilon_{\text{расчет}}$ вылет, отн. ед.
АО 95 505/531-44/106	115,85	69,5±0,1	71,9	0,586±0,007	0,582	0,594
АО 95 505/531-44/206	284,97	172,6±0,1	179,6	0,575±0,006	0,577	0,593
АО 95 505/531-44/306	944,97	592,3±0,2	615,3	0,576±0,006	0,569	0,594
АО 95 505/531-44/406	3015,21	1991,0±0,3	2066,1	0,565±0,006	0,558	0,594
АО 95 505/531-44/506	8323,11	5889,0±1,1	6123,4	0,556±0,004	0,543	0,594
СП-1	88000,00	48680,0±3,9	49966,2	0,578±0,015	0,541	0,566
АО 95 505/531-44/406 в свинце	3015,21	2002,0±0,3	2087,3	0,565±0,007	0,559	0,596
АО 95 505/531-44/506 в свинце	8323,11	5936,0±0,5	6198,8	0,556±0,006	0,543	0,596
ГСО-03.1.02 в центре полости	314,84	181,2±0,2	182,0	0,602±0,016	0,503	0,524
ГСО-03.4.02 в центре полости	849,51	496,1±0,1	487,8	0,557±0,014	0,499	0,520
ГСО-03.4.02 на дне полости	849,51	474,6±0,1	460,1	0,542±0,011	0,473	0,492

Доверительная вероятность P=0,95



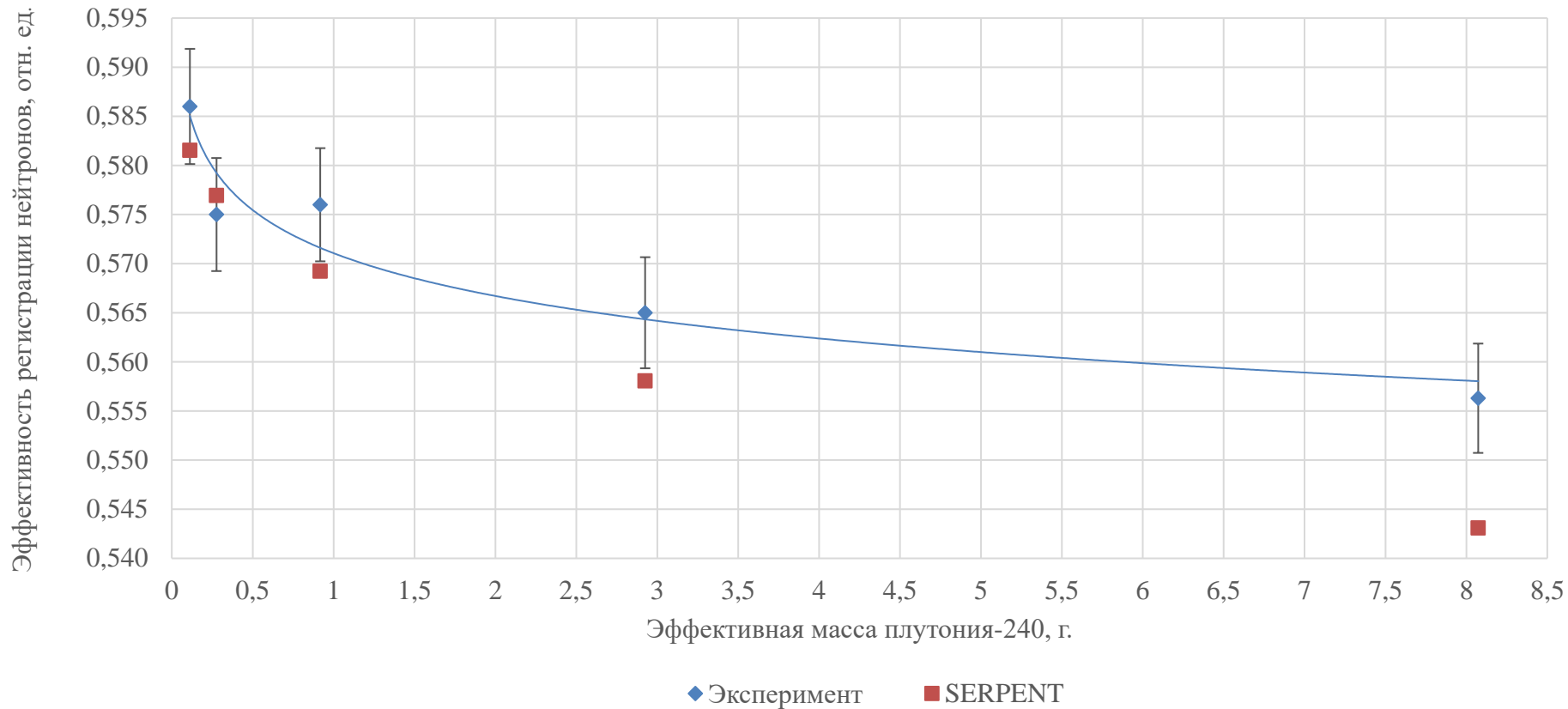


Рис.3.- Зависимость эффективности регистрации нейтронов от эффективной массы металлического плутония

Эффективность регистрации нейтронов, отн. ед.

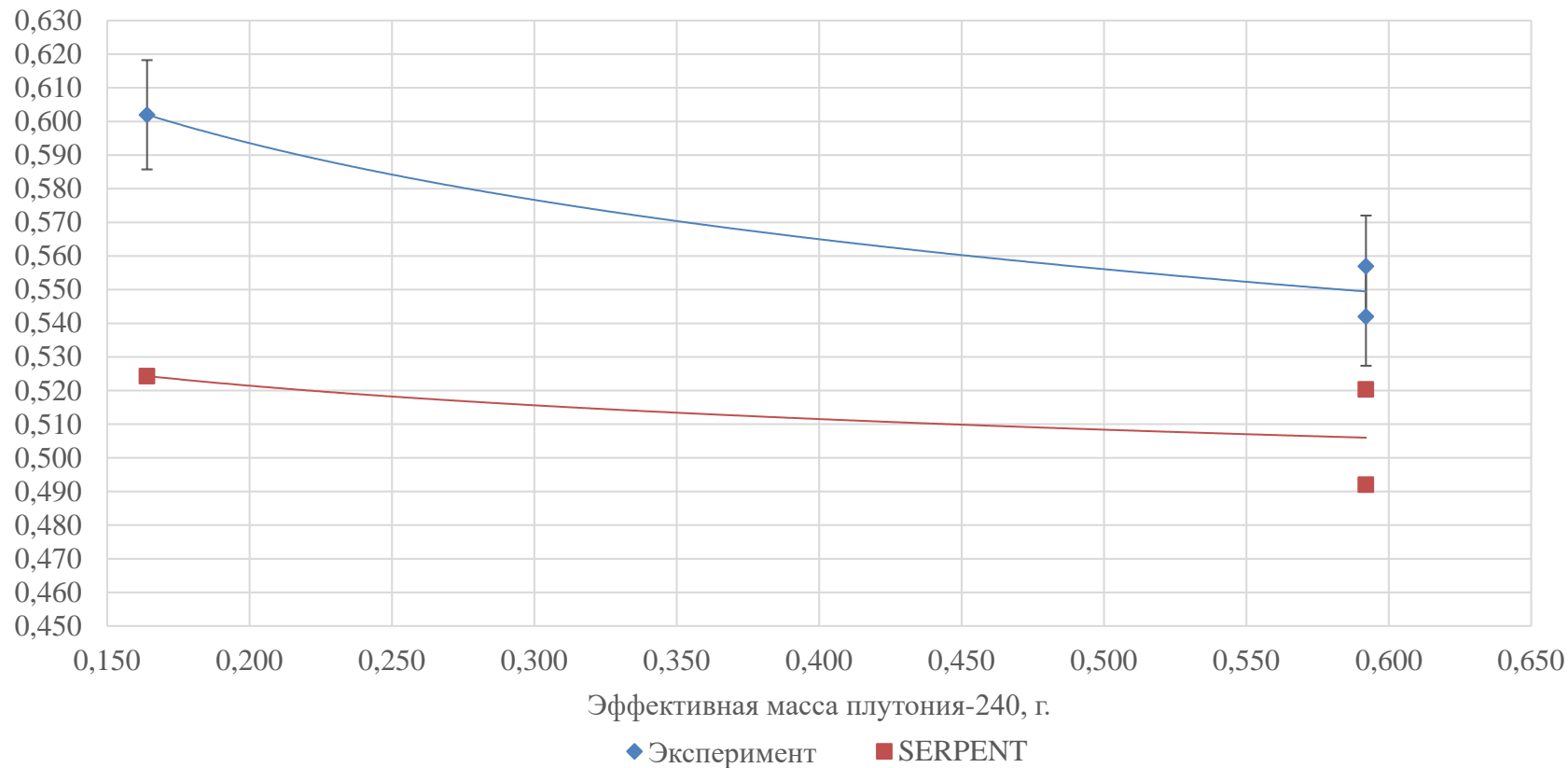


Рис.4.- Зависимость эффективности регистрации нейтронов от эффективной массы диоксида плутония

# Оценка коэффициента отбора совпадений

$$\chi = e^{-\frac{P}{\tau}}(1 - e^{-\frac{T}{\tau}})$$

Оценка времени жизни нейтрона

Прямое моделирование

$\tau$  = среднее время от испускания делящегося или мгновенного нейтрона до его поглощения или вылета из установки

Уравнение баланса нейтронов

$$\frac{dn}{dt} = \frac{kn}{\tau} - \frac{n}{\tau} + \frac{S}{V}$$
$$\tau = \sum_{i=1}^{273} \tau_i = \sum_{i=1}^{273} \frac{\Phi_i(E_i)}{\nu_i(E_i)} \frac{(1-k)V}{S}$$

«Неявный подход»

$$\tau = \frac{K_{eff}}{\bar{\nu} \times \nu \times \Sigma_f}$$

# Сравнение экспериментальных и расчетных значений времени жизни нейтронов и коэффициентов отбора совпадений по трем подходам



№ образца	$\tau_{exp}$ , сек.	$\tau_{расч}$ прямое, сек.	$\tau_{расч}$ неявное, сек.	$\tau_{расч}$ по уравнению баланса, сек.	$\chi_{exp}$ , отн. ед.	$\chi_{расч}$ прямое, отн. ед.	$\chi_{расч}$ неявное, отн. ед.	$\chi_{расч}$ по уравнению баланса, отн. ед.
АО 95 505/531-44/106	$(3,25 \pm 0,05) \times 10^{-5}$	$3,28 \times 10^{-5}$	$2,54 \times 10^{-5}$	$2,62 \times 10^{-5}$	$0,589 \pm 0,023$	0,586	0,661	0,653
АО 95 505/531-44/206	$(3,03 \pm 0,05) \times 10^{-5}$	$3,28 \times 10^{-5}$	$2,52 \times 10^{-5}$	$2,60 \times 10^{-5}$	$0,611 \pm 0,024$	0,586	0,664	0,656
АО 95 505/531-44/306	$(3,14 \pm 0,05) \times 10^{-5}$	$3,27 \times 10^{-5}$	$2,48 \times 10^{-5}$	$2,56 \times 10^{-5}$	$0,600 \pm 0,022$	0,587	0,669	0,660
АО 95 505/531-44/406	$(2,90 \pm 0,05) \times 10^{-5}$	$3,27 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^{-5}$	$2,51 \times 10^{-5}$	$0,625 \pm 0,026$	0,587	0,674	0,665
АО 95 505/531-44/506	$(2,90 \pm 0,05) \times 10^{-5}$	$3,26 \times 10^{-5}$	$2,36 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^{-5}$	$0,624 \pm 0,025$	0,588	0,682	0,674
СП-1	$(3,17 \pm 0,08) \times 10^{-5}$	$3,26 \times 10^{-5}$	$2,44 \times 10^{-5}$	$2,17 \times 10^{-5}$	$0,597 \pm 0,074$	0,588	0,673	0,703
АО 95 505/531-44/406 в свинце	$(2,90 \pm 0,06) \times 10^{-5}$	$3,27 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^{-5}$	$0,645 \pm 0,033$	0,588	0,676	0,667
АО 95 505/531-44/506 в свинце	$(2,96 \pm 0,06) \times 10^{-5}$	$3,27 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^{-5}$	$2,43 \times 10^{-5}$	$0,618 \pm 0,032$	0,588	0,684	0,674
ГСО-03.1.02 в центре полости	$(3,82 \pm 0,08) \times 10^{-5}$	$3,65 \times 10^{-5}$	$2,80 \times 10^{-5}$	$2,77 \times 10^{-5}$	$0,538 \pm 0,084$	0,553	0,634	0,637
ГСО-03.4.02 в центре полости	$(2,21 \pm 0,07) \times 10^{-5}$	$3,69 \times 10^{-5}$	$2,81 \times 10^{-5}$	$2,77 \times 10^{-5}$	$0,699 \pm 0,069$	0,549	0,633	0,637
ГСО-03.4.02 на дне полости	$(2,52 \pm 0,07) \times 10^{-5}$	$3,86 \times 10^{-5}$	$2,87 \times 10^{-5}$	$2,86 \times 10^{-5}$	$0,664 \pm 0,050$	0,535	0,627	0,628

Доверительная вероятность  $P=0,95$

# Сравнение паспортных и расчетных значений эффективной массы плутония-240 по трем подходам



№ образца	$m_{eff}$ паспорт, г.	$m_{eff}$ по методу прямого моделирования, г.	$m_{eff}$ по неявному методу, г.	$m_{eff}$ по уравнению баланса, г.
АО 95 505/531-44/106	0,112	0,114	0,107	0,107
АО 95 505/531-44/206	0,276	0,281	0,264	0,266
АО 95 505/531-44/306	0,917	0,944	0,891	0,896
АО 95 505/531-44/406	2,925	3,047	2,893	2,908
АО 95 505/531-44/506	8,073	8,494	8,127	8,156
СП-1	73,55	81,118	76,701	75,300
АО 95 505/531-44/406 в свинце	2,925	3,058	2,902	2,917
АО 95 505/531-44/506 в свинце	8,073	8,526	8,156	8,192
ГСО-03.1.02 в центре полости	0,164	0,197	0,186	0,185
ГСО-03.4.02 в центре полости	0,592	0,737	0,687	0,685
ГСО-03.4.02 на дне полости	0,592	0,758	0,702	0,701

# Выводы



ВНИИНМ  
РОСАТОМ

- 1) Разработана математическая модель счетчика множественности надтепловых нейтронов RENMC в программном комплексе SERPENT. В ходе разработки выполнялись исследования по расчету коэффициента отбора совпадений несколькими методами, и в результате исследования наиболее оптимальной является оценка времени жизни нейтрона в установке по «неявному» подходу, поскольку учитывает размножающие свойства образца, необходимые для метода множественности нейтронов.
- 2) Созданная модель апробирована на аттестованных по эффективной массе плутония-240 объектах металлического плутония АО 95 505/531-44-2021, стандартом образце потока нейтронов СП-1, аттестованных по изотопному составу плутония стандартных образцах диоксида плутония ГСО-8454-2003. Расхождения по скоростям счета для стандартных образцов всех типов по сравнению с экспериментом не превышает 5%, а по эффективности регистрации нейтронов: для образцов металлического плутония – 5%, для образцов диоксида плутония – 15%. Эффективность регистрации рассчитывалась по отношению к нейтронам, рожденным в источнике.
- 3) Используя 3 подхода к определению времени жизни нейтрона в установке, рассчитан коэффициент отбора совпадений, необходимый для расчета эффективной массы плутония-240. Оценка коэффициента отбора, проведенная по «неявному» подходу, совпадает с оценкой, полученной из уравнения баланса нейтронов.
- 4) Апробация разработанной модели подтвердила возможность ее использования для разработки методик измерений: расхождение расчетов эффективной массы не превышают 5% для металлического плутония и 18% для диоксида плутония.

# Спасибо за внимание

**Владимиров Даниил Анатольевич**  
Научный сотрудник П-393

Тел.: +7 (499) 190 89 99, доб. 8074

Моб. тел.: +7 (916) 389 16 87

E-mail: [DaAVladimirov@bochvar.ru](mailto:DaAVladimirov@bochvar.ru)

[www.bochvar.ru](http://www.bochvar.ru)