



# РАЗРАБОТКА СИСТЕМЫ БЕЗДЕМОНТАЖНОЙ ПОВЕРКИ КАНАЛОВ КОНТРОЛЯ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ

Научный руководитель, к.ф.-м.н., доц.

Кумпан А.В.

Научный консультант,  
Начальник группы экспериментальных исследований  
отд. 212 АО «НИКИЭТ»:

Шашков Е.С.

Студент группы Б22-104:

Овчинников Н.Е.

Москва 2026

# Список сокращений

АД	- активационный детектор
ВЭК	- вертикальный экспериментальный канал
СБП	- система бездемонтажной поверки
КК	- канал контроля
ППН	- плотность потока нейтронов
ППБН	- плотность потока быстрых нейтронов
ППТН	- плотность потока тепловых нейтронов
ПКС	- подкритический стенд
ФС	- физический стенд
ЦК	- центральный канал

# Цель и задачи работы

## Цель:

- разработка системы бездемонтажной поверки каналов контроля плотности потока нейтронов - СБП КК ППН

## Актуальность:

- Обеспечение безопасной эксплуатации реакторов требует достоверного контроля плотности потока нейтронов. Существующие методы поверки каналов контроля предполагают их демонтаж, что дорого, трудоемко и снижает эксплуатационную готовность установки.

## Задачи:

1. моделирование ППН в активных зонах ФС-2 и ФС-3;
2. выбор детекторов, подходящих под условия измерений;
3. расчет скоростей реакций в активных зонах ФС-2 и ФС-3;
4. разработка и апробация методики измерений ППН на физическом стенде ФС-3;
5. сравнение экспериментальных значений скоростей реакций и ППН с расчетными значениями;
6. разработка схем доставки детекторов в активную зону критических сборок ФС-2.

# Введение - Скорость реакции, ППН

Формулы скорости реакции - Q и плотности потока нейтронов -  $\Phi$

$$Q = \frac{A \cdot e^{\lambda t_e}}{n \cdot (1 - e^{-\lambda t_{об}})} \quad \Phi = \frac{A \cdot e^{\lambda t_e}}{n \cdot \sigma \cdot (1 - e^{-\lambda t_{об}})}$$

где A – активность активационных детекторов - АД, Бк;

$\lambda$  – постоянная распада дочернего радионуклида, 1/с;

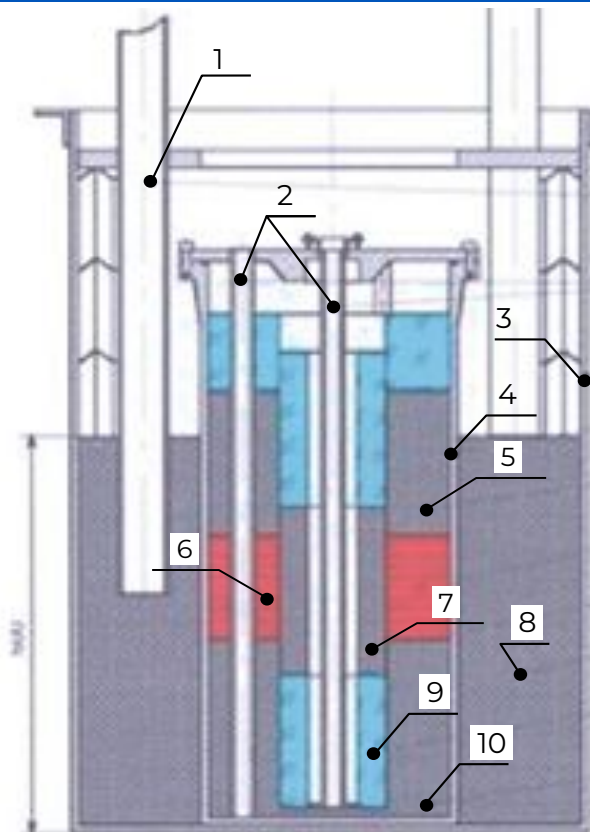
$t_e$  – время от момента окончания облучения АД до начала измерений (время выдержки), с;

n – количество ядер изотопа-мишени;

$t_{об}$  – длительность эксперимента (время облучения), с;

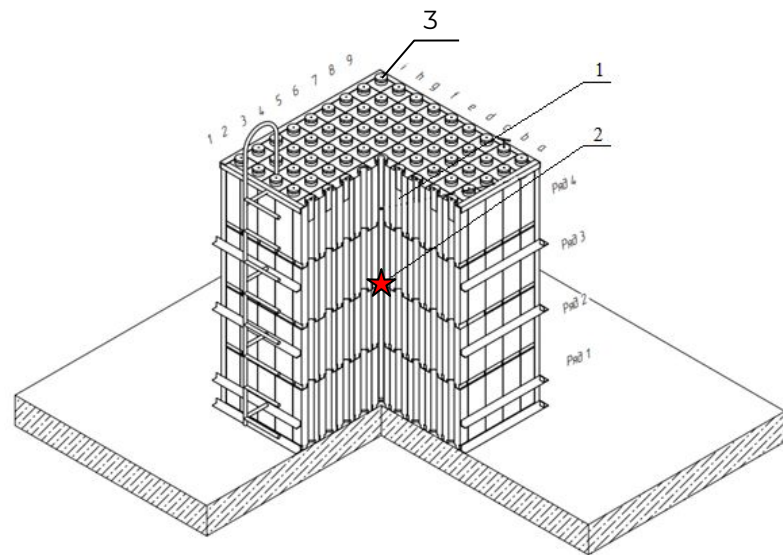
$\sigma$  – эффективное сечение захвата, барн.

# 1. ПКС ФС-2 и ФС-3



Разрез ФС-2

- 1 - ВЭК в отражателе
- 2 - ВЭК в активной зоне
- 3 - промежуточный бак
- 4 - бак активной зоны
- 5 - верхний торцевой графитовый отражатель
- 6 - активная зона
- 7 - графитовая втулка
- 8 - графитовый отражатель
- 9 - полиэтилен
- 10 - нижний торцевой графитовый отражатель



- 1 - экспериментальный канал
- 2 - источник нейтронов
- 3 - графитовый блок

Эскиз ФС-3

# 1. Результаты расчетов ППН на ФС-2, ФС-3

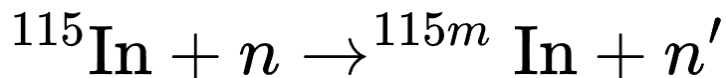
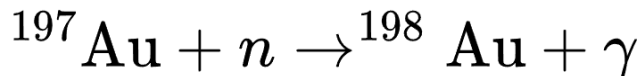
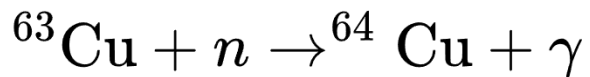
Проведены нейтронно-физические расчёты для определения распределения плотности потока нейтронов в подкритическом стенде ФС-2 и стенде ФС-3.

Регистрация потоков проводилась в 28 энергетических группах по программному средству MCU-NR.

Максимальная плотность потока нейтронов в слое интегрированная по всему диапазону энергии составляет:

- **$1,1 \cdot 10^5$**  1/(см<sup>2</sup>·с) в ПКС ФС-2.
- **$4,9 \cdot 10^4$**  1/(см<sup>2</sup>·с) в ФС-3 .

## 2. Рассматриваемые детекторы



АД из меди с кадмиевыми чехлами



АД из индия с кадмиевыми чехлами

Детектор	Поток нейтронов	Диаметр, мм	Число, ядер	Вес, мг	Минимальный поток $1/(\text{см}^2 \cdot \text{с})$
U-235	Тепловой	10	$2,0 \cdot 10^{17}$	0.12	$2,5 \cdot 10^5$
Pu-239	Тепловой	10	$1,0 \cdot 10^{15}$	0.0007	$4,0 \cdot 10^7$
Np-237	$E > 0,8$ МэВ	10	$9,2 \cdot 10^{15}$	0.007	$2,2 \cdot 10^9$
U-238	$E > 1,5$ МэВ	10	$3,0 \cdot 10^{17}$	0.23	$5,0 \cdot 10^7$

Характеристики делящихся детекторов



Активационные детекторы  ${}^7\text{Au}$  из наборов АКН-Т

### 3. Обоснование выбора АД

Из приведенных данных в таблицах следует, что минимальная активность, при потоке нейтронов  $10^4$ - $10^5$ , при которой погрешность  $\eta$  не превышает 10 % составляет для:

- АД из Cu 50 Бк при  $t$  облучения = 5 ч;
- АД из Au 10 Бк при  $t$  облучения  $\geq 20$  ч;
- АД из In 10Бк при  $t$  облучения  $\leq 5$  ч;
- АД из Ni не обеспечивает требуемую точность измерений;
- ДД из U, Np, Pu недостаточная чувствительность в заданном диапазоне ППН.

Так как ПКС ФС-2 является подкритической сборкой с размножающей средой с ППН не меньше, чем ППН в диффузионной среде ФС-3, то для измерений в ФС-2 можно воспользоваться АД, которые были определены для ФС-3.

## 4. Основные средства измерений

Активность детекторов измеряется с помощью гамма-спектрометра с полупроводниковым детектором - ППД на основе чистого германия - ОЧГ серии DSpec, анализатора DSpec50 и управляющего компьютера. Детектор располагается в свинцовой защите для исключения влияния внешнего фона

Полупроводниковый спектрометр гамма-излучения серии DSpec

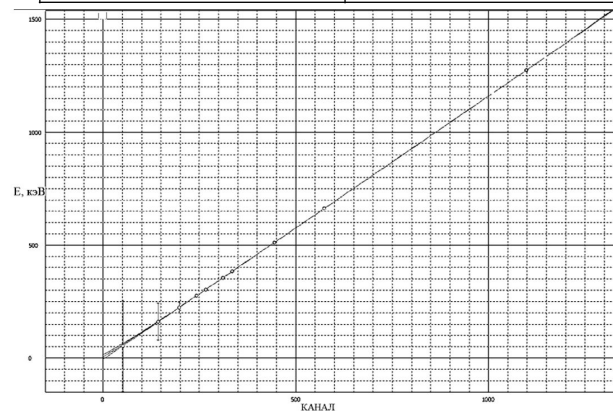


Детектор в свинцовой защите

Управляющий компьютер и анализатор DSPEC50

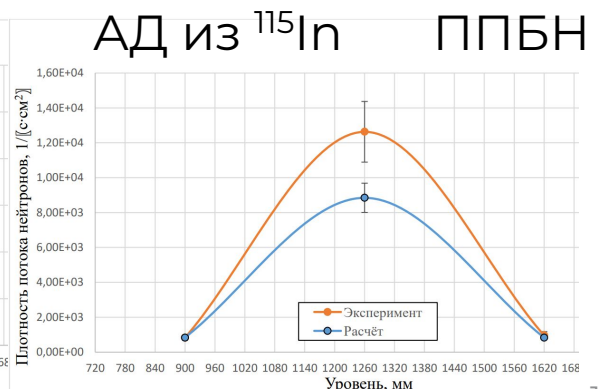
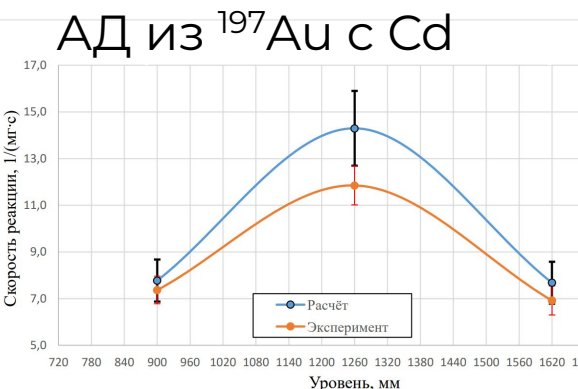
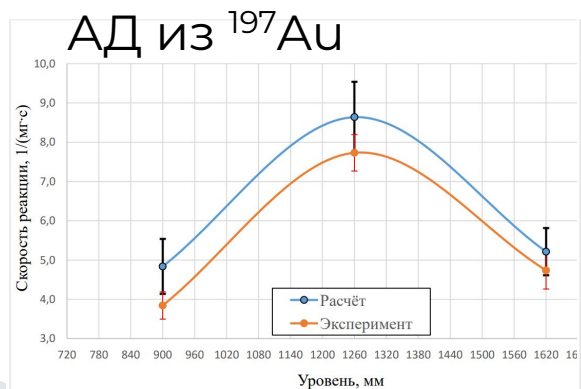
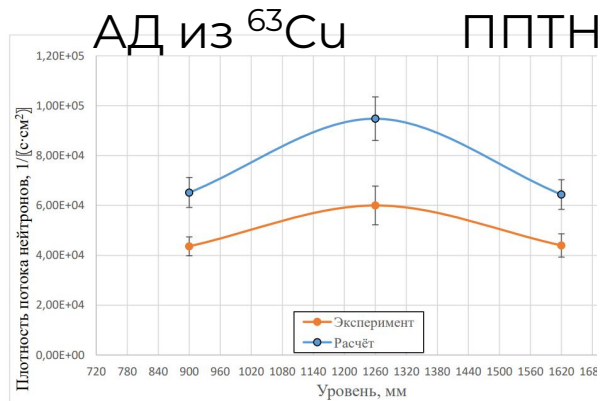
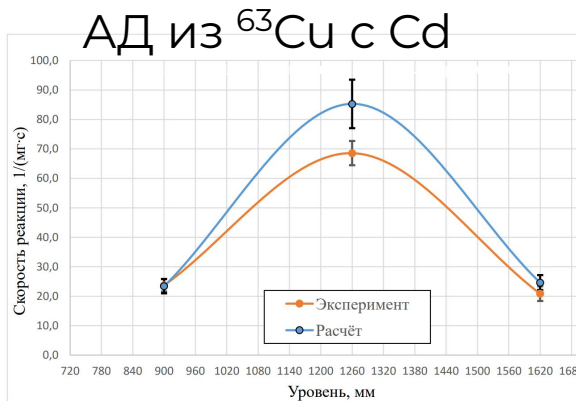
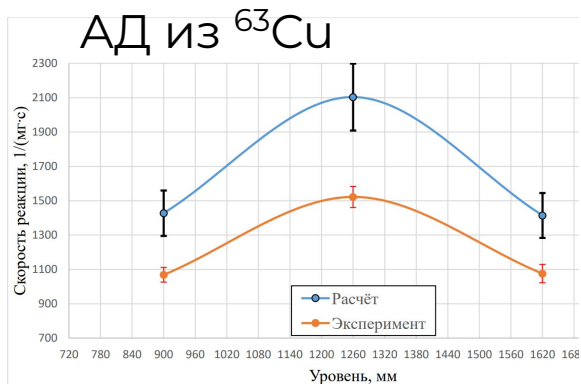
Характеристики ОСГИ-Р

Источник	Активность, кБк
Bi-207	108
Cs-137	98
Ba-133	108
Na-22	95
Co-60	110
Am-241	102

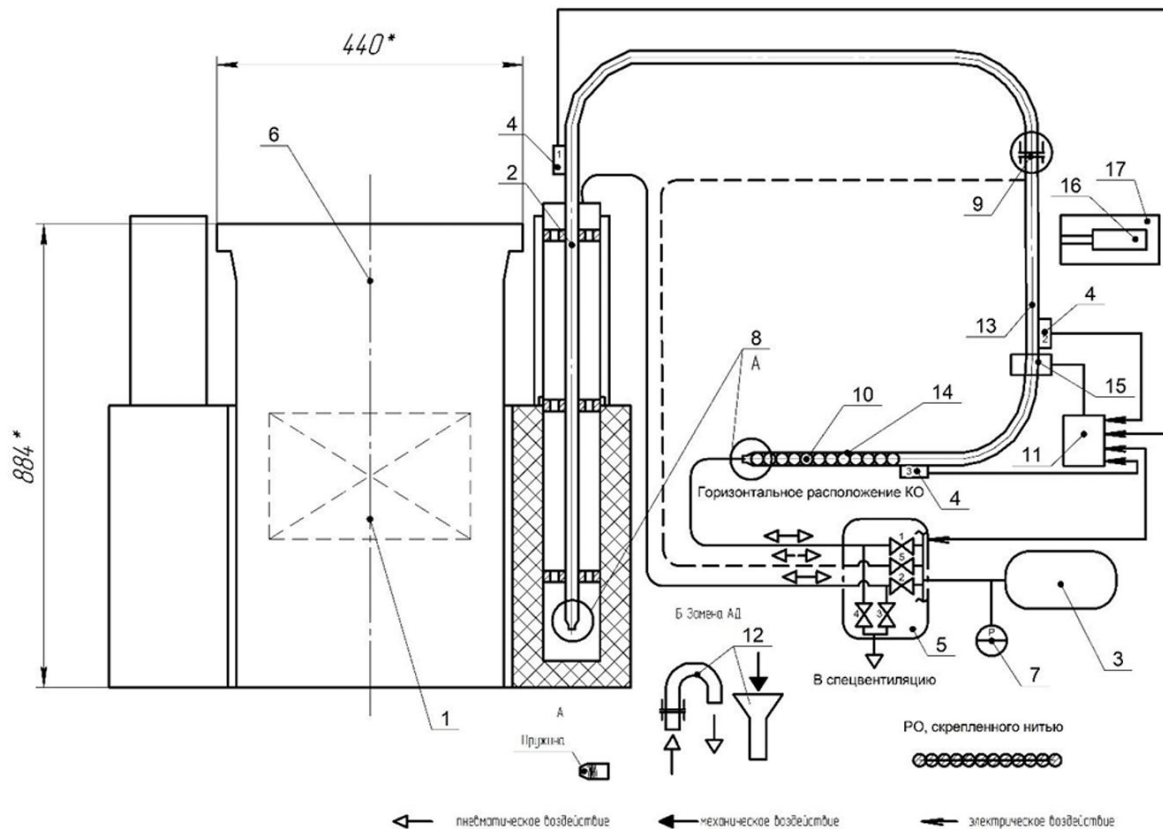


Калибровочная кривая

# 5. Результаты измерений активностей и ППН в ФС-3

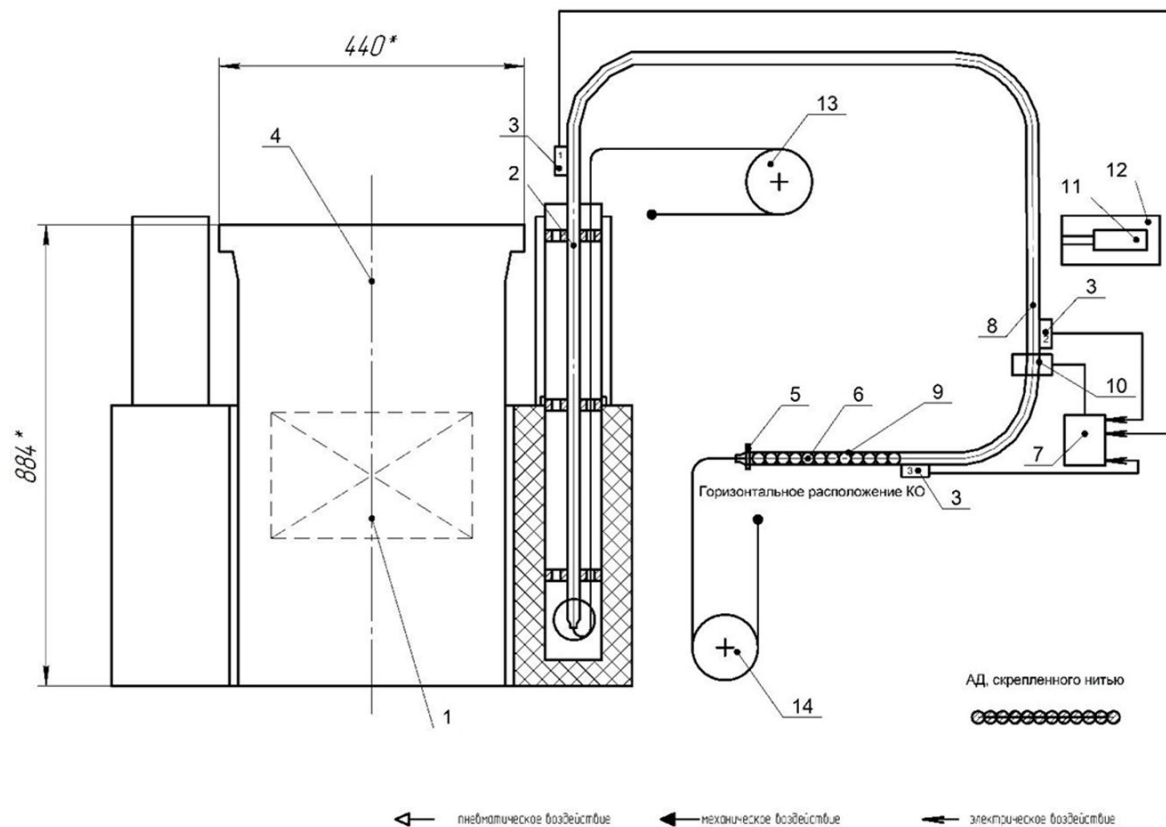


# 6. Система бездемонтажной поверки для ФС-2 - ПШС



- 1 – активная зона;
- 2 – экспериментальный канал
- 3 – бак с газом высокого давления;
- 4 – сигнализатор доставки;
- 5 – блок управляющих клапанов;
- 6 – корпус ПКС ФС-2;
- 7 – манометр;
- 8 – ограничитель;
- 9 – разъем для замены АД;
- 10 – АД;
- 11 – управляющий процессор;
- 12 – устройство для замены АД;
- 13 – измерительный канал;
- 14 – канал отстойник;
- 15 – стопорное устройство;
- 16 – спектрометр;
- 17 – свинцовая защита

## 6. Система бездемонтажной поверки для ФС-2 - ЛС



- 1 – активная зона;
- 2 – экспериментальный канал;
- 3 – сигнализатор доставки;
- 4 – корпус ПКС ФС-2;
- 5 – разъем для замены АД;
- 6 – АД;
- 7 – управляющий процессор;
- 8 – измерительный канал;
- 9 – канал отстойник;
- 10 – стопорное устройство;
- 11 – спектрометр;
- 12 – свинцовая защита;
- 13 – лебедка №1;
- 14 – лебедка №2

# Результаты работы

1. Смоделированы ППН в ФС-2 и ФС-3
2. Рассчитаны активности АД
3. Экспериментально обоснован выбор АД Cu, Au, In для условий ППН  $10^3$ – $10^5$
4. Разработана методика восстановления ППН
5. Экспериментально подтверждено согласие с расчетами для ФС-3
6. Разработаны системы доставки АД для СБП КК ППН ФС-2

**Спасибо за внимание!**



# Результаты расчетов ППН на ФС-2

Расстояние от центра АЗ, мм	Плотность потока тепловых нейтронов, $1/(\text{см}^2\cdot\text{с})$	Плотность потока быстрых нейтронов, $1/(\text{см}^2\cdot\text{с})$
+110	$5,28 \cdot 10^5$	$8,61 \cdot 10^4$
+55	$6,47 \cdot 10^5$	$1,23 \cdot 10^5$
0	$6,99 \cdot 10^5$	$5,28 \cdot 10^5$
-55	$6,52 \cdot 10^5$	$5,28 \cdot 10^5$
-110	$5,83 \cdot 10^5$	$5,28 \cdot 10^5$

Результаты расчетов ППН в ЦК на ПКС ФС-2

Расстояние от центра АЗ, мм	Плотность потока тепловых нейтронов, $1/(\text{см}^2\cdot\text{с})$	Плотность потока быстрых нейтронов, $1/(\text{см}^2\cdot\text{с})$
+110	$1,18 \cdot 10^5$	$0,14 \cdot 10^5$
+55	$1,58 \cdot 10^5$	$0,12 \cdot 10^5$
0	$1,85 \cdot 10^5$	$0,11 \cdot 10^5$
-55	$1,84 \cdot 10^5$	$0,13 \cdot 10^5$
-110	$1,63 \cdot 10^5$	$0,10 \cdot 10^5$

Результаты расчетов ППН в ВЭК на ПКС ФС-2

# Результаты расчетов ППН на ФС-3

Нижняя граница, эВ	Отметка, + мм	ППН, 1/(см <sup>2</sup> ·с)	Нижняя граница, эВ	Отметка, + мм	ППН, 1/(см <sup>2</sup> ·с)	Нижняя граница, эВ	Отметка, + мм	ППН, 1/(см <sup>2</sup> ·с)	Нижняя граница, эВ	Отметка, + мм	ППН, 1/(см <sup>2</sup> ·с)
6.50E+06	780	9.5	1.00E+02	780	700.4	2.60E+04	780	823.5	6.00E-01	780	599.8
	1260	287.9		1260	4426.1		1260	12138.9		1260	2387.2
	1740	6.0		1740	542.8		1740	642.8		1740	500.8
4.00E+06	780	93.0	7.35E+01	780	294.7	1.00E+04	780	651.2	4.50E-01	780	337.2
	1260	1398.0		1260	1692.9		1260	7977.5		1260	1403.5
	1740	78.7		1740	213.2		1740	518.9		1740	310.9
2.50E+06	780	56.8	2.05E+01	780	1181.9	4.65E+03	780	610.3	3.00E-01	780	571.2
	1260	2629.1		1260	6697.5		1260	5952.1		1260	2174.6
	1740	83.9		1740	962.1		1740	435.9		1740	470.3
1.40E+06	780	256.3	1.00E+01	780	678.1	2.15E+03	780	626.0	2.15E-01	780	664.1
	1260	7105.1		1260	3506.3		1260	5682.9		1260	2323.9
	1740	204.2		1740	586.4		1740	471.7		1740	580.0
4.00E+05	780	754.4	4.65E+00	780	743.7	1.00E+03	780	638.9	1.00E-01	780	7608.1
	1260	16472.4		1260	3573.7		1260	5325.8		1260	16269.6
	1740	606.4		1740	600.8		1740	489.6		1740	6830.0
2.00E+05	780	436.7	2.15E+00	780	796.3	5.80E+02	780	469.7	2.53E-02	780	36418.6
	1260	7465.3		1260	3560.5		1260	3628.3		1260	64313.4
	1740	364.4		1740	640.6		1740	341.2		1740	32714.3
1.00E+05	780	432.1	1.00E+00	780	810.5	2.15E+02	780	840.7	0.00E+00	780	13541.4
	1260	6827.3		1260	3546.7		1260	6070.1		1260	22592.3
	1740	332.6		1740	707.6		1740	685.4		1740	12257.9

Результаты расчетов групповых ППН в трех  
отметках канала f5 ФС-3

Нижняя граница, эВ	Отметка, + мм	ППН, 1/(см <sup>2</sup> ·с)	Нижняя граница, эВ	Отметка, + мм	ППН, 1/(см <sup>2</sup> ·с)	Нижняя граница, эВ	Отметка, + мм	ППН, 1/(см <sup>2</sup> ·с)	Нижняя граница, эВ	Отметка, + мм	ППН, 1/(см <sup>2</sup> ·с)
6.50E+06	780	6.4	1.00E+02	780	471.8	2.60E+04	780	502.4	6.00E-01	780	461.2
	1260	107.8		1260	2795.4		1260	5740.2		1260	1795.9
	1740	9.0		1740	387.0		1740	383.5		1740	392.1
4.00E+06	780	33.4	7.35E+01	780	193.5	1.00E+04	780	410.4	4.50E-01	780	265.6
	1260	541.9		1260	1133.3		1260	4058.3		1260	1072.5
	1740	28.4		1740	168.9		1740	312.7		1740	232.9
2.50E+06	780	44.8	2.05E+01	780	875.4	4.65E+03	780	348.2	3.00E-01	780	462.2
	1260	801.4		1260	4512.2		1260	3221.1		1260	1692.2
	1740	19.2		1740	695.7		1740	294.0		1740	381.3
1.40E+06	780	117.6	1.00E+01	780	508.1	2.15E+03	780	382.0	2.15E-01	780	562.5
	1260	2323.2		1260	2449.2		1260	3149.7		1260	1794.9
	1740	133.7		1740	418.1		1740	293.1		1740	460.4
4.00E+05	780	409.4	4.65E+00	780	556.4	1.00E+03	780	409.3	1.00E-01	780	6583.6
	1260	6263.9		1260	2497.6		1260	3121.2		1260	13709.1
	1740	317.0		1740	456.6		1740	313.1		1740	5973.9
2.00E+05	780	237.5	2.15E+00	780	597.7	5.80E+02	780	302.4	2.53E-02	780	32308.9
	1260	3048.2		1260	2645.8		1260	2185.5		1260	56625.2
	1740	182.2		1740	482.5		1740	250.6		1740	29467.5
1.00E+05	780	249.1	1.00E+00	780	598.9	2.15E+02	780	603.6	0.00E+00	780	12038.2
	1260	2938.0		1260	2610.0		1260	3926.5		1260	19945.5
	1740	201.4		1740	511.7		1740	461.7		1740	11117.7

Результаты расчетов групповых ППН в трех  
отметках канала f6 ФС-3

# Результаты расчетов активностей АД на ФС-3

АД	Отметка, + мм	Активность насыщения, $\times 10^{-19}$ Бк		Зависимость активности от времени облучения, $\times 10^{-19}$ Бк					
				5 часов		10 часов		20 часов	
		Канал f5	Канал f6	Канал f5	Канал f6	Канал f5	Канал f6	Канал f5	Канал f6
$^{197}\text{Au}$ (n, $\gamma$ )	780	64,48	55,66	3,38	2,92	6,56	5,63	12,46	10,74
	1260	146,32	119,28	7,62	6,23	14,84	12,79	28,23	22,99
	1740	57,12	50,23	2,98	2,65	5,83	5,10	11,00	9,67
$^{63}\text{Cu}$ (n, $\gamma$ )	780	2,39	2,11	0,57	0,51	1,01	0,89	1,60	1,40
	1260	4,56	3,88	1,09	0,92	1,92	1,63	3,03	2,58
	1740	2,15	1,93	0,52	0,46	0,90	0,81	1,43	1,28

Зависимость активности детекторов от времени облучения, Бк/ядро

Нуклид	$^{64}\text{Cu}$	$^{198}\text{Au}$	$^{64}\text{Cu}$	$^{198}\text{Au}$
Энергия пика полного поглощения	511,0 кэВ	411,8 кэВ	511,0 кэВ	411,8 кэВ
Аисх, Бк	200,0	100,0	50,0	20
Ар, Бк	202,0	101,0	49,0	20,2
%	5,0	4,0	7,0	6,0
$\eta$	1,0	1,0	2,0	1,0
Аисх, Бк	100,0	50,0	20,0	10,0
Ар, Бк	101,0	51,0	19,7	10,3
%	6,0	5,0	11,0	8,0
$\eta$	1,0	2,0	1,5	3,0

Зависимость погрешности в определении активности от величины активности

# Результаты расчетов активностей АД на ФС-3

АД	Отметка, + мм	Активность насыщения,* $10^{-22}$ Бк		Зависимость активности от времени облучения, * $10^{-22}$ Бк					
				5 часов		10 часов		20 часов	
		Канал f5	Канал f6	Канал f5	Канал f6	Канал f5	Канал f6	Канал f5	Канал f6
$^{115}\text{In}$ (n,n')	1020	12,38	5,37	6,68	2,89	9,75	4,23	11,82	5,13
	1260	38,94	13,25	20,99	7,13	30,64	10,43	37,17	12,65
	1500	9,26	4,31	4,99	2,32	7,29	3,39	8,84	4,12

Зависимость активности детекторов от времени облучения, Бк/ядро

Нуклид	$^{115m}\text{In}$			
	336 кэВ			
Энергия пика полного поглощения				
Аисх, Бк	100,0	50,0	20,0	10,0
Ар, Бк	101,0	50,1	20,2	10,9
%	5,5	5,5	6,0	5,0
$\eta$	1,0	2,0	1,0	9,0

Зависимость погрешности в определении активности от величины активности