

**ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
РАДИАЦИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ТРО,
ИЗВЛЕКАЕМЫХ ИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ШАХТ
И БАССЕЙНОВ ВЫДЕРЖКИ 1, 2 БЛОКОВ
БЕЛОЯРСКОЙ АЭС**

Аваев В.Н., Васюхно В.П., Яшников А.И
**ОАО «Научно-исследовательский и
конструкторский институт энерготехники имени
Н.А. Доллежала», г. Москва**

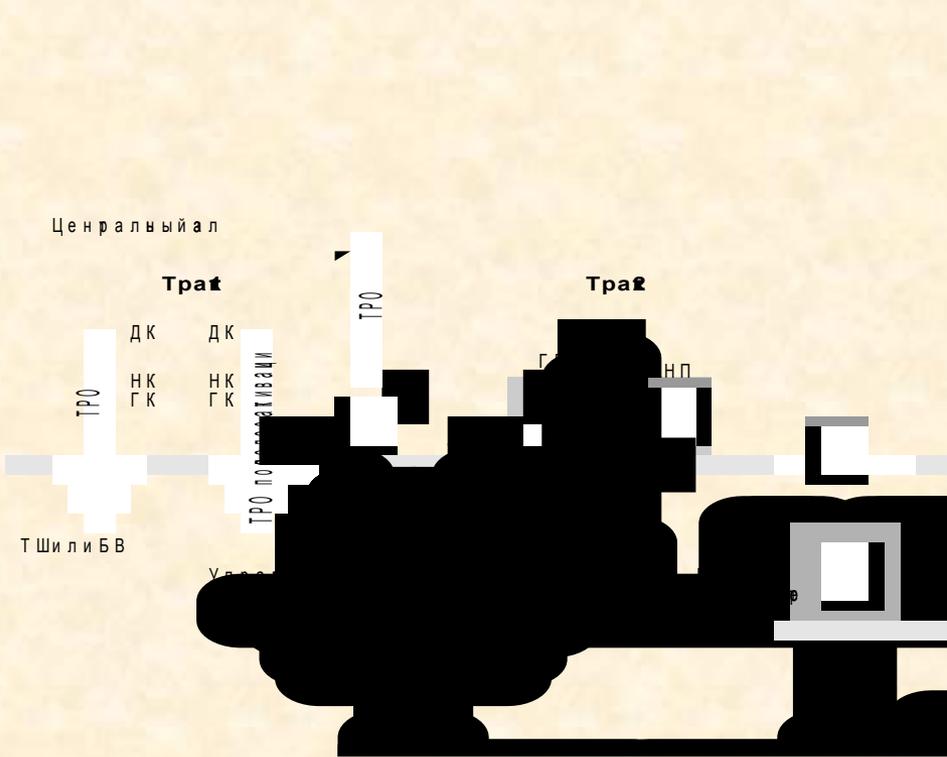
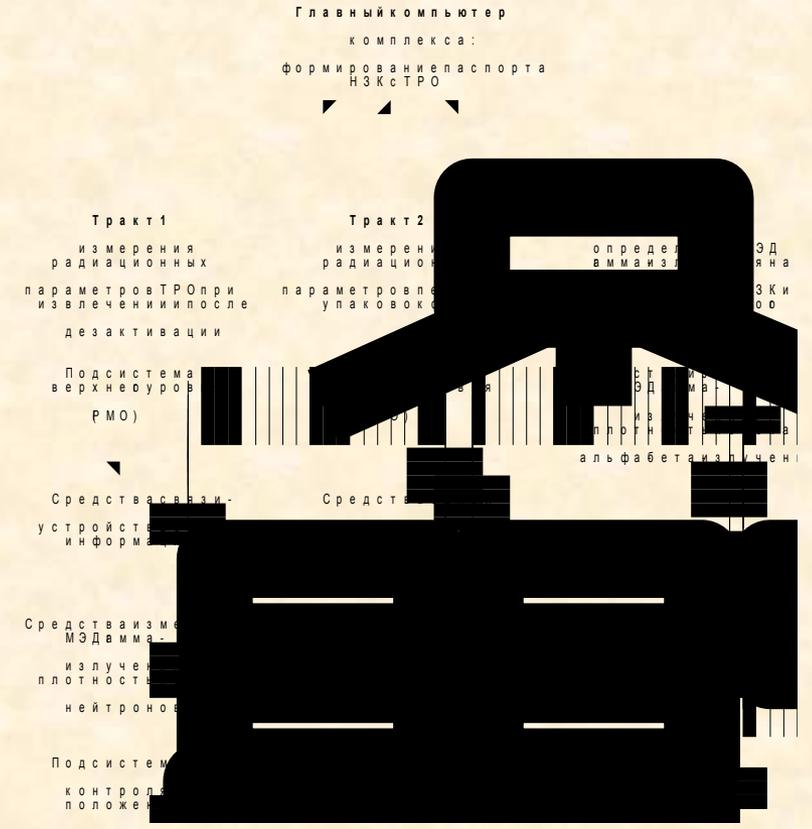
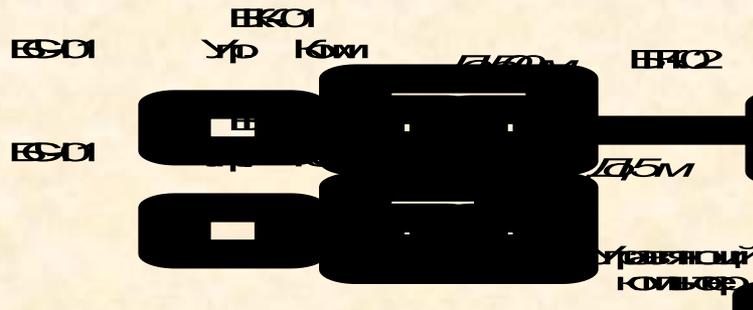


Схема расположения комплекса



Обобщенная структурная схема комплекса

Схема гамма-канала Тракта 1 (НПЦ «Аспект»)



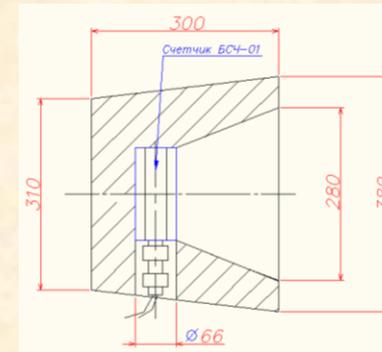
Измерительный ТРАКТ 1 обеспечивает:

измерение МЭД гамма-излучения по высоте извлекаемого объекта ТРО, проведение предварительной классификации ТРО по МЭД гамма-излучения в диапазоне $0,1-10^7$ мкЗв/ч;

измерение плотности потока нейтронов по высоте объекта ТРО от 10^{-3} н/(см²с) при МЭД гамма-излучения 1,0 Зв/ч;

определение положения датчиков относительно извлекаемого объекта с помощью лазерного дальномера типа DIMETIX DLS-B 300

Стальной коллиматор для гамма-канала

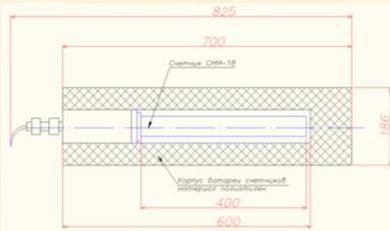
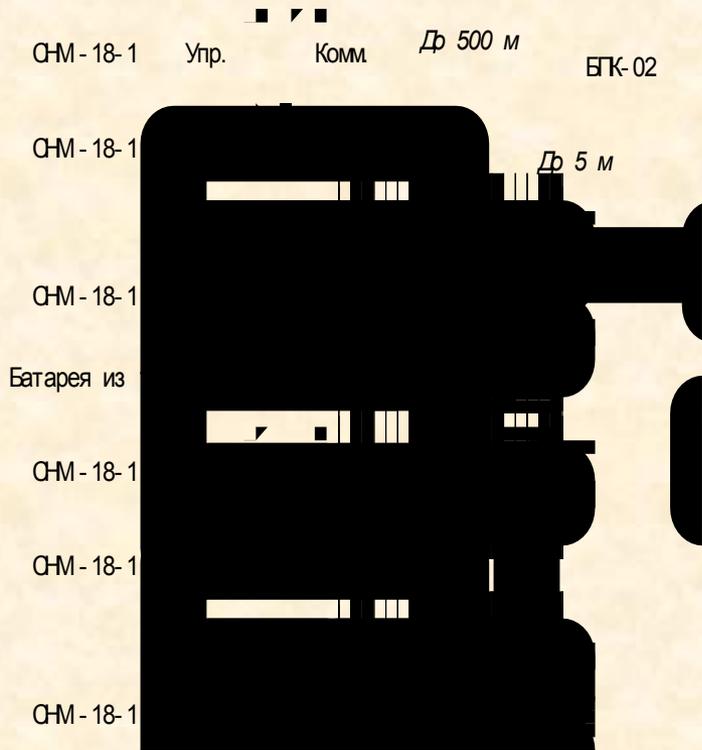


Вклад в МЭД от части объекта, находящегося в «прямой видимости» датчиком в коллиматоре (около 30 см) составляет ~ 60%, а от части равной 100 см, составляет в среднем ~90 %.

Согласно СПОРО-2002 производится предварительная сортировка ТРО по категориям (низкоактивные, среднеактивные, высокоактивные)

Схема нейтронного канала Тракта 1 (НПЦ «Аспект»)

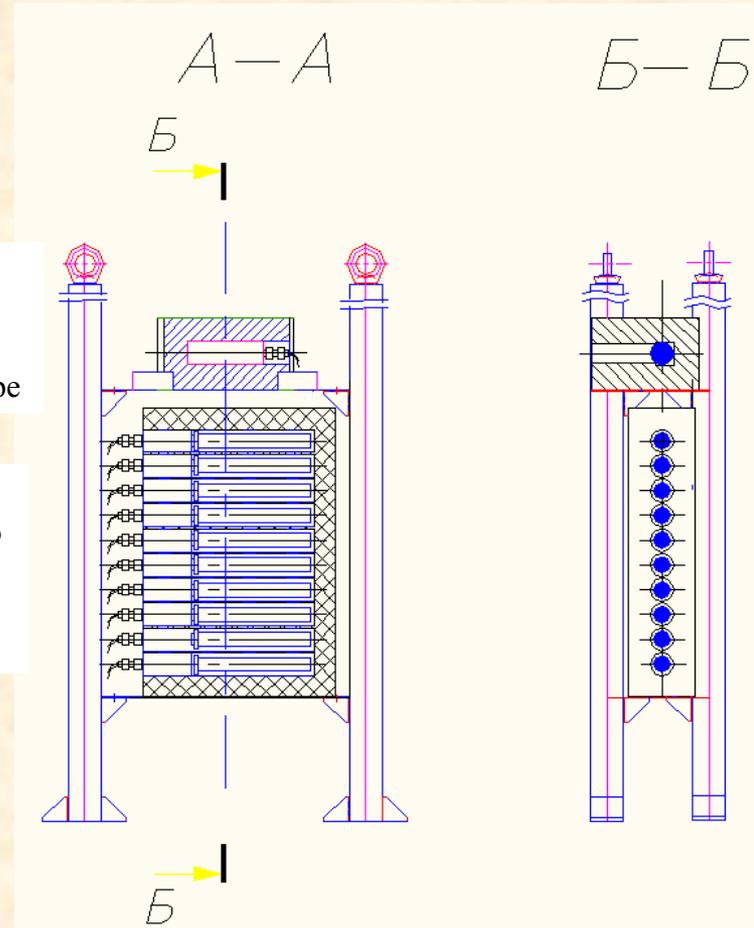
Батарея из 10 счетчиков



Нейтронные счетчики в замедлителе

Детектор
гамма-
излучения
в коллиматоре

Детекторы
нейтронного
излучения
в
замедлителе



Стойка измерительного тракта 1

Чувствительность измерительной системы будет составлять 1400 импульс/(н/см²).

Нейтронный канал ТРАКТА 1

Масса урана (в граммах) оценивается по формуле:

$$M = \frac{N - \sum_i \delta_i}{\sum_i (\xi_i \times \Phi_i)}$$

где: N – измеренная интенсивность импульсов от n счетчиков, имп/с;
- δ_i – чувствительность i -ого счетчика, определенная при калибровке, имп/(н/см²);
- δ_i – интенсивность фоновых регистраций i -ым счетчиком, 0,1 имп/с;
 Φ_i – расчетное значение плотности потока нейтронов в месте расположения i -ого счетчика (по программе MCNP) от одного грамма урана в исследуемом объекте, н/(см²×с×г).

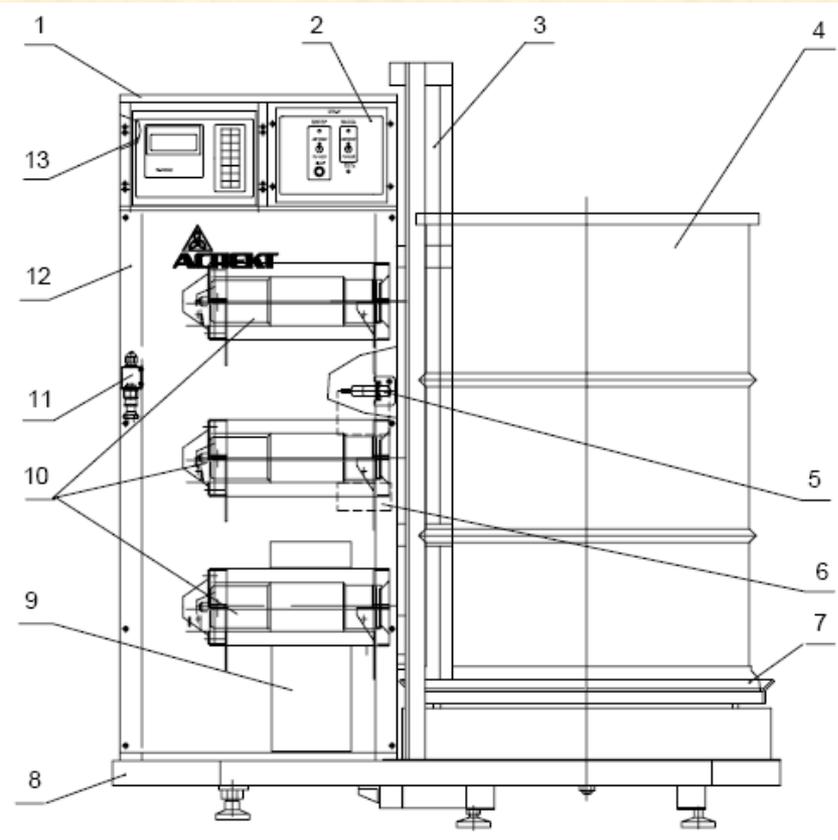
Энерговыработка, МВт×сут/кгU	2	4	10	26
Спонтанное деление н/сUг	0,03,	0,09	0,46	2,0
Реакция (α ,n) н/сUг	0,1	0,2	0,6	3,4

Нижний предел определения наличия урана определялся для графитовых блоков 24x24x100 см.

Стационарное положение. Время измерения 1000 с. Масса 5-250 г.

Скорость перемещения 2,6 м/мин. Время измерения 70 с. Масса 30-2600 г.

Паспортизатор СКГ-02 (НПЦ «Аспект»)



- 1 – системный крейт 2 – блок коммутации и управления 3 – ограждение
4 – бочка с РАО 5 – датчик присутствия 6 – гамма-дозиметр БДГ-02
7 – поворотная платформа с тензовесами 8 – основание
9 – мотор-редуктор 10 – блок спектрометра УДС-Г-40х40-485
11 – коммутационная коробка 12 – стойка 13 – весовой терминал

Характеристики ГАММА ПАСПОРТИЗАТОРА

Размеры первичных упаковок 100x100x60 см

Заполнение графит (0.5-1,6 г/см³), сталь(0,2-2.0 г/см³)

Толщина стальной стенки первичной упаковки бралась 5 мм.

Основные источники Co-60 и Cs-137.

Для выбора типа спектрометра по программе MCNP были проведены расчеты групповых потоков гамма-квантов в месте расположения детектора спектрометра.

Проведенные расчеты показали:

- изменение плотности материалов, находящихся в первичных упаковках не приводит к изменению спектрального состава излучения;
- увеличение плотности материала приводит к уменьшению потока гамма-квантов при одинаковой активности первичных упаковок: максимальное различие для упаковок со сталью составило 3 раза, а для графита- 2.3 раза;
- рассеянное излучение во многом определяет загрузку спектрометра, так как вклад рассеянного излучения в полный поток гамма-квантов для контейнеров со сталью составляет (45-65)%, а для контейнеров с графитом (60-70)%;

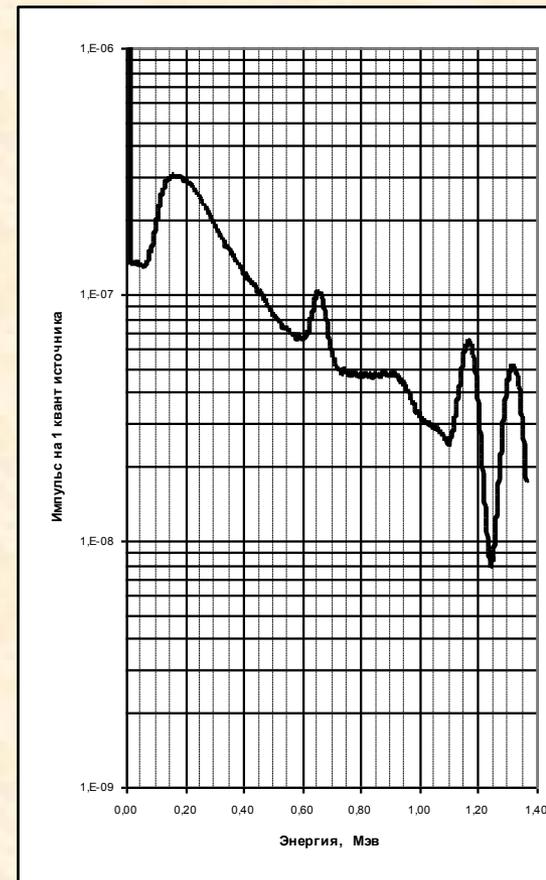
В спектральном распределении наблюдается резкое снижение потоков гамма-квантов с энергией меньшей 100 кэВ.

Возможность определения активности Am-241.

Соотношение активностей Cs-137 и Am-241 (программа ORIGEN2) в зависимости от энерговыработки изменяется от 20 до 5000.

Расчеты показали, что измерение активности Am-241 в первичных упаковках в присутствии Cs-137 практически невозможно даже с применением в качестве спектрометра ППД ОЧГ.

Определена возможности спектрометра с детектором NaJ(Tl) измерять активность Cs-137 в присутствии Co-60. Расчеты показали, что определение активности Cs-137, которая составляет 10% от общей удельной активности, возможно с погрешностью не более 30% при продолжительности измерения 200 с.



Амплитудное распределение, рассчитанное для случая, когда активность Cs-137 составляет 50% от общей активности
Диапазоны измерения с использованием свинцовых экранов составляет для Cs-137 от $25 \cdot 10^{12}$ Бк/кг. Для Co-60 $20 \cdot 10^9$ Бк/кг.

Нейтронный паспортизатор

Пассивно-активные паспортизаторы определяют массу ЯМ в следующих четырех режимах работы:

- по измеренной интенсивности импульсов от нейтронов спонтанного деления и реакции (α, n);
- по измеренной интенсивности совпадений от спонтанно делящихся нуклидов;
- по измеренной интенсивности совпадений от делений под воздействием внешнего источника нейтронов;
- по измеренному количеству запаздывающих нейтронов от деления под воздействием внешних источников нейтронов.

Характеристики генератора ИНГ-031(ВНИИА им.Н.Л.Духова)

Поток нейтронов, $3 \cdot 10^{10}$ нейтр/с

Длительность нейтронного импульса, 0,8 мкс

Частота, 1-100 Гц

Ресурс, 100 ч

Потребляемая мощность не более 700 Вт

Габаритные размеры излучателя нейтронов:

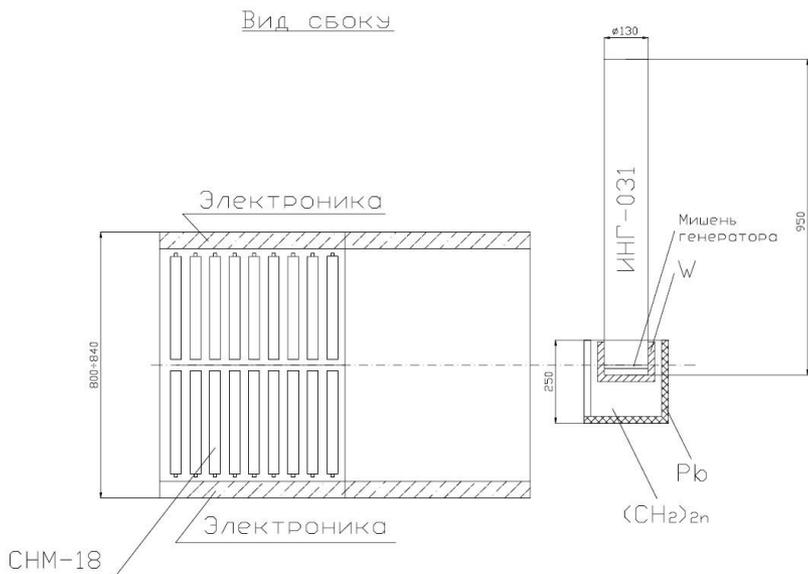
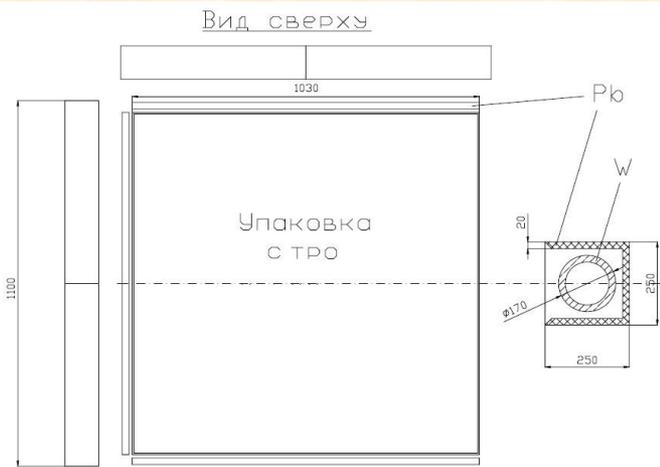
- диаметр 130 мм
- длина 950 мм

Паспортизатор состоит из 3-х подвижных детекторных секций (по одной на три боковые стороны первичной упаковки с ТРО размерами 1000 x 1000 x 600 мм).

Каждая детекторная секция состоит, в свою очередь, из 4-х взаимозаменяемых модулей.

Внешние габариты ~1600x1600x1300 мм

Количество счетчиков 204-312 штук.



Эскиз нейтронного паспортизатора

«Пассивный» режим работы установки

В первом режиме измеряется интенсивность счета нейтронов спонтанного деления Pu-240 и нейтронов, образовавшихся в (α, n) реакции

Зависимость время измерения от соотношения $\Phi_{240}/\Phi_{фон}$

(Статистическая погрешность 25 %)

- при $\Phi_{240}/\Phi_{фон} = 0,5$ время измерения будет составлять ~10 с;
- при $\Phi_{240}/\Phi_{фон} = 0,2$ время измерений будет составлять ~1 мин;
- при $\Phi_{240}/\Phi_{фон} = 0,1$ время измерений будет составлять ~4 мин.

Зависимость определяемой массы ЯМ с погрешностью 50% от продолжительности измерения для выгоранием 2 МВт×сут/кг U, г

Зависимость определяемой массы ЯМ с погрешностью 50% от продолжительности измерения для выгоранием 2 МВт×сут/кг U, г

Масса ЯМ, г	10	20	50	100	200
Время измерения	3,4 ч	50 мин	8 мин	2 мин	36 с

Первый режим работы установки позволит определить наличие (20-30) г ЯМ в первичной упаковке размером 100x100x60 см при продолжительности измерений (30÷50) мин.

Во втором режиме масса делящихся ЯМ определяется по количеству совпадений от спонтанного деления

$$C_{сп} = C_p - C_{сл}$$

где: $C_{сп}$ – интенсивность двойных совпадения от спонтанного деления, имп/с;

C_p - полная интенсивность двойных совпадений, имп/с;

$C_{сл}$ - интенсивность случайных двойных совпадений, имп/с.

Интенсивность случайных совпадений (имп/с) определяется как:

$$C_{сл} = N \times (1 - \exp(-N \times t))$$

где t - временное окно ~60 мкс.

$$N = \xi \times n \times (\Phi_{ед} \times \vartheta \times M + \Phi_{фон})$$

ξ -чувствительность одного нейтронного счетчика;

n - количество счетчиков;

$\Phi_{ед}$ - плотность потока нейтронов в местах расположения датчиков, нормированная на 1 нейтрон источника в секунду;

ϑ - интенсивность нейтронов в 1 г урана

M –масса урана в упаковке с ТРО

$\Phi_{фон}$ - фоновый поток

Статистическая погрешность в определении массы ЯМ:

$$\eta = \frac{\sqrt{(N_{дел} \times g) + C_{сл}} + \sqrt{C_{сл}}}{\sqrt{T} \times N_{дел} \times g}$$

где T -время измерения, с;

g -эффективность регистрации двойных совпадений от нейтронов деления

$$N_{дел} = \Phi_{ед} \times \xi \cdot n \times \vartheta_d \times M$$

ϑ_d - интенсивность нейтронов в 1 г урана от спонтанного деления

Зависимость времени измерения от статистической погрешности измерения количества двойных совпадений от выгорания и массы ЯМ, %

Масса, г	Выгорание, $\frac{\text{МВт}\cdot\text{сут}}{\text{кг U}}$	Погрешность, %			
		5	10	20	50
10	2	199 ч	51 ч	12,8 ч	2,0 ч
	4	21 ч	5,2 ч	1,3 ч	12,7 мин
	10	2 ч	30 мин	8 мин	75 с
	26	13 мин	32 мин	49 с	8 с
20	2	54 ч	13 ч	3,4 ч	0,53 ч
	4	8,7 ч	2,1 ч	32 мин	5,2 мин
	10	57,6 мин	14 мин	3,5 мин	34 с
	26	6 мин	90 с	22 с	2 с
50	2	10,6 ч	2,7 ч	40 мин	6,4 мин
	4	2 ч	29,4 мин	7,4 мин	71 с
	10	13 мин	3.2 мин	49 с	8 с
100	2	3,4 ч	50 мин	13 мин	2 мин
	4	45 мин	11 мин	3 мин	27 с
	10	5,4 мин	80 с	20 с	3 с
200	2	1,2 ч	18 мин	4,5 мин	43 с
	4	22 мин	5,4 мин	80 с	13 с
	10	150 с	38 с	10 с	2 с

Второй режим работы установки позволяет за время измерения ~30 мин:

- определить 10 г ЯМ с выгоранием более 4 МВт×сут/кгU;

- для ЯМ с выгоранием 2 МВт×сут/кгU минимально определяемая величина массы

ЯМ составляет 50 г.

«Активный» режим работы установки

Источники: AmLi (α,n)-300 кэВ, Cf-252-спектр нейтронов деления, нейтронный генератор- энергия 14 МэВ.

Режим счета кратности совпадений

Упаковка 100x100x60 см (графит или сталь 1 г/см³).

Уран массой 100 г обогащение 3%.

Распределение равномерное

Расчеты выполнялись по программе MCNP

Отношение потоков нейтронов от источника к потокам от нейтронов деления в месте расположения датчиков

Материал заполнения	Энергия нейтронов источника		
	300 кэВ	2 МэВ	14 МэВ
Графит	$8,0 \times 10^2$	$1,0 \times 10^3$	$2,0 \times 10^3$
сталь	$8,6 \times 10^5$	$5,9 \times 10^4$	$1,2 \times 10^4$

Необходимым условием определения этим методом массы ДМ является наличие источника, интенсивность которого создает в месте расположения датчиков поток нейтронов деления, сопоставимый с потоком от спонтанного деления Pu-240.

При этом условии источник с энергией 300 кэВ (AmLi(α,n)) должен иметь интенсивность $2,6 \times 10^6$ н/с.

Зависимость времени измерения от массы ЯМ, определяемой с статистической погрешностью 50%

Масса, г	10	20	30	60	100
Время измерения	140 ч	34 ч	15 ч	3,9 ч	1,4 ч

Режим счета полного количества запаздывающих нейтронов

Интенсивность источника должна быть такой, чтобы поток запаздывающих нейтронов в месте расположения датчиков превышал поток нейтронов от спонтанного деления Pu-240 и реакции (α, n).

Возможность измерения потоков запаздывающих нейтронов определяется следующими параметрами:

- суммарной плотностью потока нейтронов в месте расположения датчиков от спонтанного деления, реакции (α, n) и фонового излучения;
- мощностью ИНГ и режимом его работы;
- энергией нейтронов ИНГ;
- временем жизни мгновенных нейтронов в измерительной системе (которое определяет начало измерения запаздывающих нейтронов).

Генератор типа ИНГ-031, Энергия 14 МэВ.

Интенсивность $3 \cdot 10^{10}$ н/с.

Размер 100x100x60 см, Плотность 1 г/см³

Материал графит, сталь

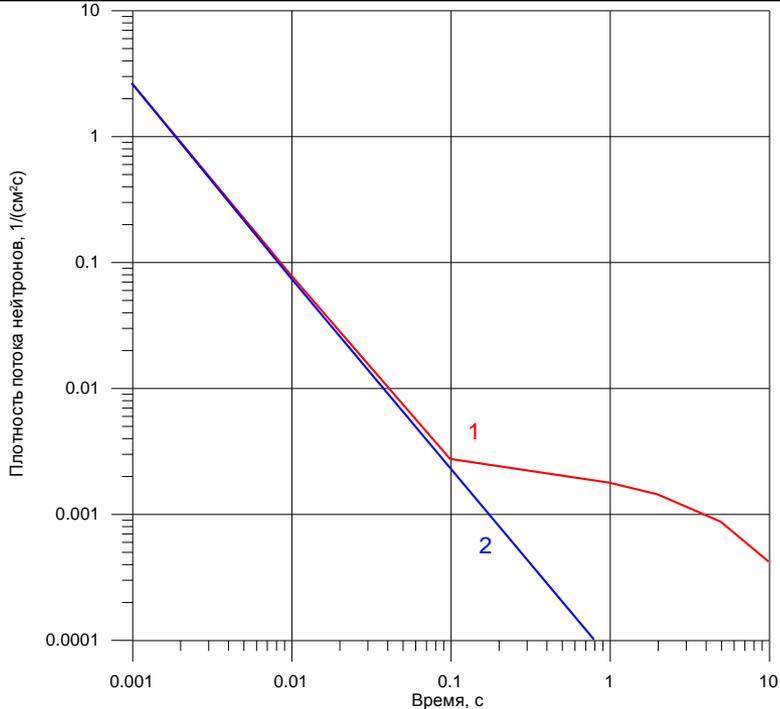
Масса урана 1, 10 и 1500 г.

Два варианта размещения ИНГ:

- ИНГ размещается в центре нижней поверхности упаковки, а счетчики - на четырех боковых поверхностях упаковки;
- ИНГ размещается в центре боковой поверхности упаковки, а счетчики на трех боковых поверхностях упаковки.

Результаты расчетов показали, что:

- в диапазоне массы урана от 1 до 1500 г существует прямо пропорциональная зависимость между массой урана и количеством делений;
- для упаковок со сталью 93% делений происходит на ядрах U-238, а для упаковок с графитом – 46%.



1 – с запаздывающими нейтронами
2 – без запаздывающих нейтронов

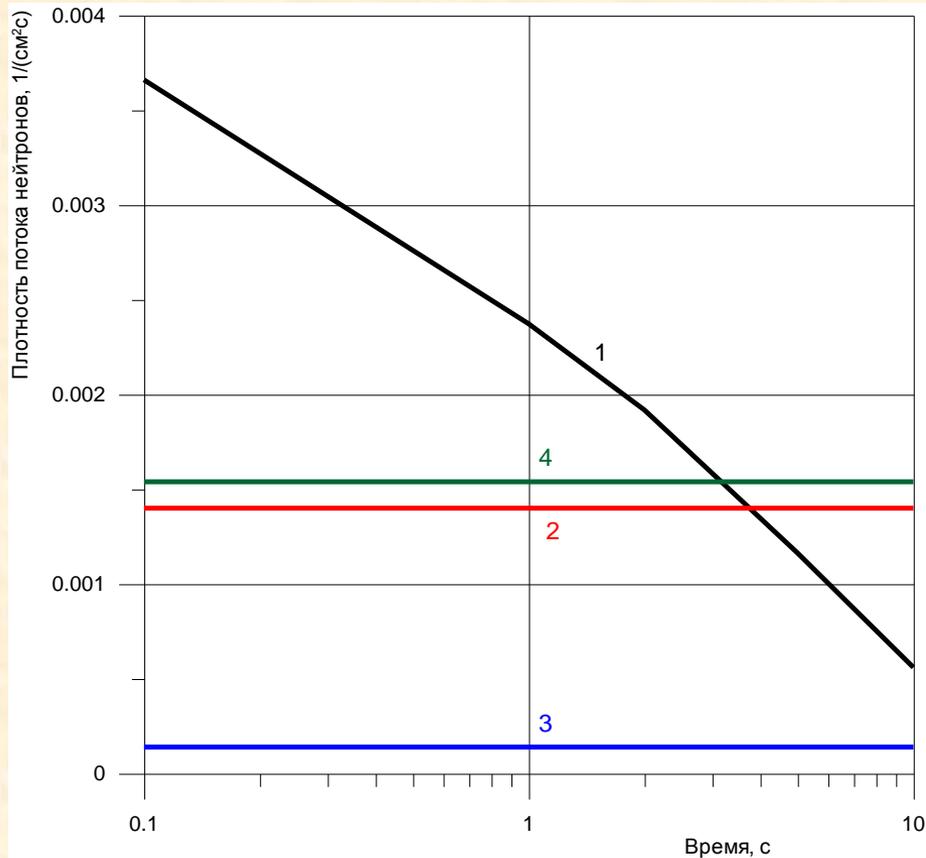
Зависимость количества нейтронов от времени
после окончания работы ИНГ для графитового заполнения.
Масса урана 1 г.

Момент начала измерений определяется соотношением между потоками запаздывающих нейтронов и мгновенных.

Для упаковок с графитом потоки нейтронов практически полностью определяются запаздывающими нейтронами для времен больших 0,1 с. Для упаковок со сталью указанное время составляет 0,01 с.

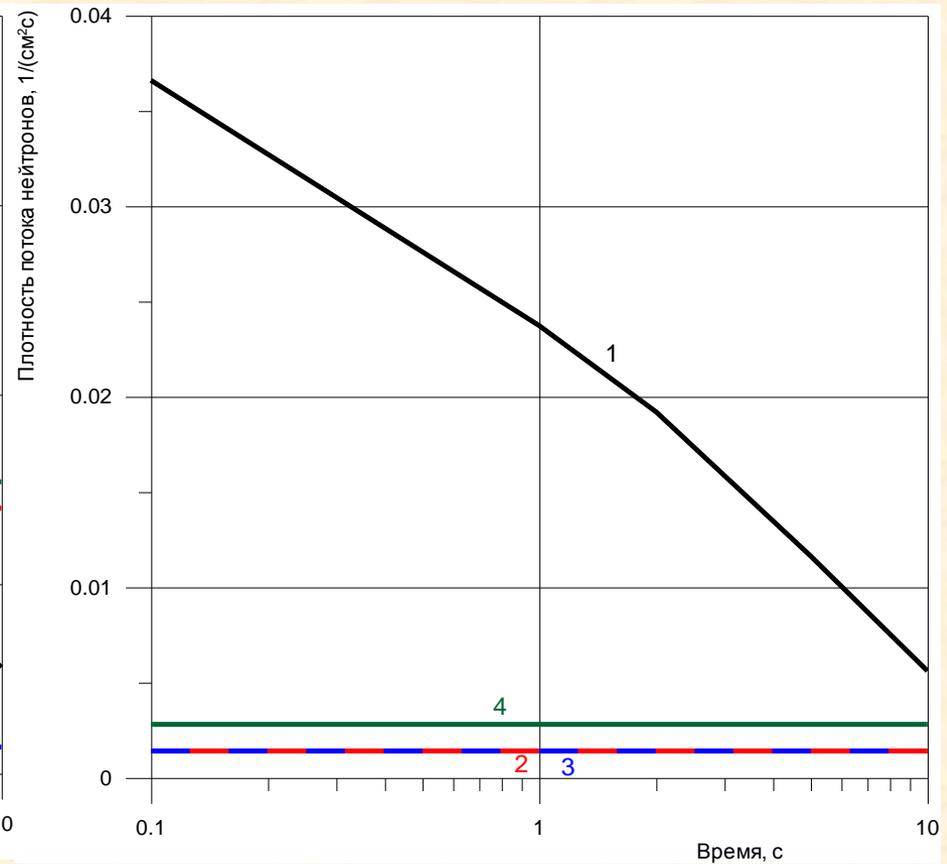
Результаты расчетов показали, что:

в диапазоне массы урана от 1 до 1500 г существует прямо пропорциональная зависимость между массой урана и количеством делений;
для упаковок со сталью 93% делений происходит на ядрах U-238, а для упаковок с графитом – 46%.



1 – запаздывающие нейтроны; 2 – фон;
 3 – Pu-240 + реакция (α, n) ; 4 – сумма фон +
 Pu-240 + реакция (α, n)

Зависимость плотности потока нейтронов
 от времени после окончания облучения для
 массы урана равной 1 г. Заполнение графит



1 – запаздывающие нейтроны; 2 – фон;
 3 – Pu-240 + реакция (α, n) ; 4 – сумма фон +
 Pu-240 + реакция (α, n)

Зависимость плотности потока нейтронов
 от времени после окончания облучения для
 массы урана равной 10 г
 Заполнение графит

Оценка статистической погрешности в определении плотностей потоков запаздывающих нейтронов в зависимости от времени измерения проводилась для:

- максимального количества нейтронов от спонтанного деления и реакции (α, n) равного 6,0 (н/с·гU);
- средней плотности потоков нейтронов на поверхности упаковок;
- случая, когда ИНГ находится под упаковкой, количество счетчиков 300;
- случая, когда ИНГ находился на боковой поверхности, количество счетчиков 225;
- масса урана в упаковке 1 г.

Статистическая погрешность измерений в зависимости от времени измерения, %

Место расположение генератора	Материал заполнения	Время измерения, с					
		1	2	5	10	20	50
Под упаковкой	Сталь, графит	13	7	6,5	6,3	6,5	8,2
На боковой поверхности	Сталь	57	30	29	30	33	46
На боковой поверхности	Графит	41	22	20	21	22	30

Спасибо за внимание

**Василий Николаевич Аваев,
ОАО «НИКИЭТ»**