

Пространственное распределение характеристик неоднородного стационарного поля источника быстрых нейтронов

Представлены результаты исследования стационарного поля нейтронного излучения поверочной установки УКПН-1М в нормальных условиях эксплуатации. Показано влияние отражающих и поглощающих поверхностей, материалов конструкций, оборудования и оснастки на модерацию спектра энергий нейтронов. В отдельных точках помещения, где расположен УКПН-1М, доля тепловых нейтронов в энергетическом спектре возрастает до 7,5 раз, и вдвое – доля нейтронов промежуточных энергий. Для данных локальных участков пространства вклад в МАЭД тепловых нейтронов увеличивается с 0,3% до 3,7%, а нейтронов промежуточных энергий с 5,9% до 18,1% в сравнении с участками пространства без эффекта модерации спектра энергий нейтронов окружающими материалами. Эффект модерации потока нейтронов приводит к завышению результатов измерения МАЭД нейтронного излучения в сравнении с рассчитанным значением МАЭД по энергетическому спектру в 3,77, 1,54 и 1,25 раза, соответственно, для ДКС-96 с БДКН-96, ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06.

Ключевые слова:

нейтронное излучение, спектры, модерация, мощность дозы, средства измерения, метрология.

**М.Д.Пышкина¹, А.В.Васильев¹,
А.А.Екидин¹, Е.И.Назаров¹,
Л.А.Мищенко², О.И.Фуртикова³**

¹ Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург

² ФБУ Уралтест, г. Екатеринбург

³ ООО «АЭБ «Альфа-X91», г. Екатеринбург

Устойчивое развитие Российской Федерации, реализация национальных проектов во многом опирается на применение и развитие радиационных и ядерных технологий [1]. Расширение масштаба применения атомной энергии в мирных и оборонных целях приводит к росту реальных и потенциальных источников радиационного воздействия на человека и окружающую среду. Защита персонала, гарантии соблюдения приемлемого радиационного риска работников организаций основаны на поддержании, в соответствии с принципами нормирования, обоснования и оптимизации на возможно более низком уровне радиационного воздействия. Оценка индивидуальных доз облучения производится путем применения

средств и методов измерения амбиентного, направленного и индивидуального эквивалента дозы. Данные измеряемые параметры внешнего излучения являются мерой эффективной или эквивалентной дозы, свободной от недооценки и излишней переоценки для большинства встречающихся на практике радиационных полей [2,3]. Результаты измерений, используемые в целях защиты жизни и здоровья персонала, должны отвечать требованиям объективности, достоверности и воспроизводимости, а показатели точности измерений не выходить за установленные границы. Подтверждение метрологических характеристик средств измерений проводится в результате процедуры первичной и/или периодической поверки. Поверку средств измерений осуществляют организации, аккредитованные в соответствии с законодательством Российской Федерации об аккредитации в национальной системе аккредитации на проведение поверки средств измерений [4].

В условиях повышения национальных и международных требований к обеспечению ядерной и радиационной безопасности требуется модернизация и развитие технических и аналитических систем обеспечения контроля за ядерной и радиационной безопасностью в соответствии с научно обоснованными критериями. Совершенствование системы индивидуального дозиметрического контроля основывается на ускоренном развитии научно-методических основ дозиметрии, метрологическом обеспечении, стандартизации, сертификации и качества измерений [5].

Повышение качества измерений затрагивает вопросы идентификации, оценки значимости и исключения или снижения факторов неопределенности, возникающих при проведении поверки средств измерений. Ранее выполненные исследования показали, что нейтронные поля, создаваемые однотипными Pu-Be источ-

никами равной активности и потоком нейтронов, но размещенные в различных по площади, конфигурации и наполнения помещениях, имеют различное соотношение вклада в плотность потока нейтронов различных энергий [6,7]. Отражающие и поглощающие поверхности, материалы конструкций (стены, полы, потолки), оборудование и оснастка производят модерацию спектра энергий нейтронов, специфическую для каждого варианта размещения источника, формируя существенный вклад нейтронов тепловых энергий в поле, созданное источником преимущественно нейтронов быстрых энергий. Моделирование откликов индивидуальных дозиметров на модифицированные поля нейтронов с различным спектром распределения нейтронов по энергии предсказывает возможность неопределенности оценки эффективной дозы до 160% [8]. Для повышения объективности результатов индивидуального дозиметрического контроля облучения нейтронами вводят специфические для каждого рабочего места поправочные коэффициенты [9,10,11]. Инструментальное подтверждение вводимых поправочных коэффициентов, полученных расчетным способом на основе исследований характеристик энергетического и углового распределения плотности потока нейтронного излучения на рабочих местах возможно в организациях, аккредитованных на проведение поверки радиометров и дозиметров нейтронов. Для проведения таких работ необходимо изготовить поверочную установку для создания нейтронного поля, имитирующего энергетический спектр рабочего места. Требуется целый ряд различных типов моделируемых полей, которые покрывали бы все разнообразие форм рабочих полей нейтронов. Для описания таких полей необходимо определить энергетический спектр, а также угловую зависимость флюенса нейтронов в исходном положении [12]. Некоторые аспекты создания и применения подобных референсных полей

описаны в работе [13]. Для исключения или учета возможной/вероятной модификации поля нейтронов в помещении поверочной установки необходимы достоверные сведения о пространственном и энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения, создаваемого источником поверочной установки.

Целью настоящей работы являлось исследование стационарного поля нейтронного излучения поверочной установки УКПН-1М в нормальных условиях эксплуатации с учетом специфических условий ее размещения.

Была определена следующая последовательность исследований:

- выделить в помещении поверочной установки УКПН-1М точки измерений мощности амбиентного эквивалента дозы (далее МАЭД) нейтронного излучения;

- в выбранных точках выполнить измерения МАЭД нейтронного излучения переносными приборами с различными техническими характеристиками;
- провести измерения энергетического распределения нейтронного излучения в выбранных точках помещения, где расположена поверочная установка;
- рассчитать принятое значение МАЭД в каждой выбранной точке с учетом полученного энергетического распределения нейтронного излучения.

Приборы и методы

Изучение полей нейтронного излучения помещения поверочной установки УКПН-1М проводилось в несколько этапов. На первом этапе помещение поверочной установки УКПН-1М было разделено на квадраты

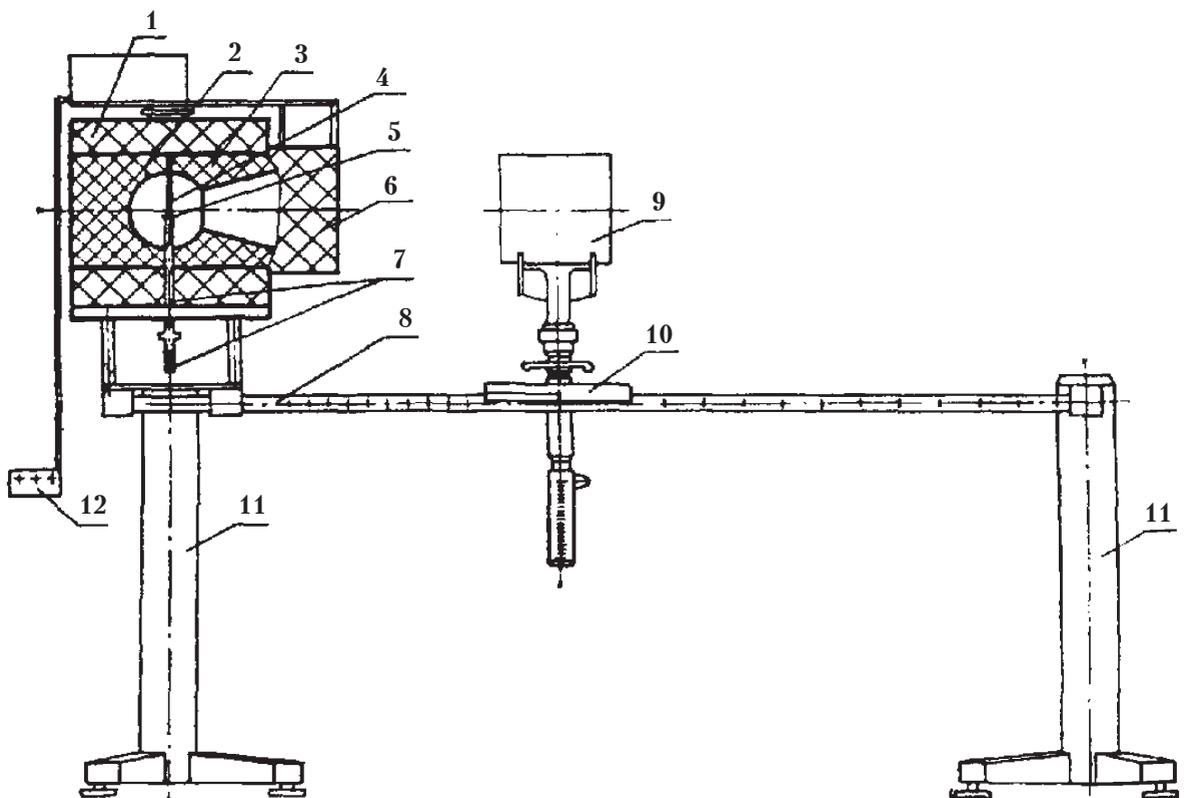


Рис.1. Установка УКПН-1М [14]: 1 – цилиндр; 2 – пробка к диафрагме; 3 – диафрагма; 4 – источник нейтронов; 5 – подставка для источника; 6 – заслон; 7 – стойка для источника и механизм перемещения источника; 8 – направляющая; 9 – блок детектирования поверяемого прибора; 10 – подставка-тележка для блока детектирования поверяемого прибора; 11 – стойка; 12 – блок переключателей.

со сторонами 1 м таким образом, что поверочная установка находилась в одном из узлов сетки. Упорядоченная плотная сетка точек измерения физических параметров поля нейтронов позволяет выделить степень однородности стационарного поля, возможные градиенты его исследуемых характеристик, идентифицировать эффект модерации в виде равномерно или хаотичного изменения энергетического спектра нейтронов, оценить влияние на результаты прямых измерений МАЭД, оценить масштаб поправочного коэффициента к результату прямых измерений МАЭД в условиях изменения энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения.

Установка поверочная УКПН-1М состоит из защитного контейнера, представленного цилиндром с диаметром 500 мм и высотой 500 мм, изготовленного из полиэтилена высокого давления с примесью бора и окруженного листовым кадмием толщиной 1 мм. В центре защитного контейнера имеется сквозное отверстие диаметром 300 мм, в которое вставляются диафрагма и пробка к диафрагме, изготовленные из такого же материала, что и защитный контейнер. Апертура угла диафрагмы 0,26 ср, диаметр выходного отверстия 200 мм, диаметр полости 200 мм [14]. При необходимости пучок нейтронов перекрывается заслоном. Устройство установки показано на рис.1.

Помещение поверочной установки нейтронного излучения УКПН-1М представляет собой помещение неправильной формы размерами 9,4 м на 5,5 м с дополнительным выступом в конце комнаты размером 0,84 м на 2,1 м. Высота помещения до плит перекрытия – 3,51 м. Размеры помещения соответствуют требованиям, предъявляемым к помещениям при проведении поверки приборов, предназначенных для измерения физических и дозиметрических величин нейтронного излучения [15].

В помещении располагаются поверочная установка УКПН-1М (на расстоянии 1,54 м от

левой стены и 4,36 м от задней стены), рентгеновская установка, хранилище источников, массивная перегородка у дверного проема, собранная из нейтронстопа, и стеллажи, стоящие вдоль правой стены и переднего выступа. В качестве источников нейтронного излучения использовался $^{238}\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$ -источник ИБН-8-7 с плотностью потока быстрых нейтронов $401 \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ и плотностью потока тепловых нейтронов $101 \text{ с}^{-1}\cdot\text{см}^{-2}$ на расстоянии 1 метр (25.12.2021). Поток тепловых нейтронов создан с применением формирователя поля нейтронов. Основная относительная погрешность значений плотности потока не превышает 4% для уровня доверительной вероятности 95%.

Значения мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронного излучения на расстоянии 1 и 2 м от источника, установленные при последней аттестации установки, составляют 479,2 и 119,8 мкЗв/ч соответственно. Основная относительная погрешность значений эквивалента доз не превышает 4% для уровня доверительной вероятности 95%. Источник нейтронного излучения в составе поверочной установки УКПН-1М прошел процедуру метрологической аттестации в качестве государственного эталона 1-го разряда единиц потока и плотности потока нейтронов в установленном порядке. Все результаты, представленные в настоящей работе, получены для поверочной установки без применения формирователей полей.

Второй этап состоял из измерения AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронного излучения переносными приборами в узлах упорядоченной сетки точек измерения. Каждым прибором проводилось от 3 до 5 замеров во всех точках с целью снижения статистической составляющей погрешности. Для измерения AMBIENTНОГО эквивалента дозы нейтронного излучения применялись три прибора: дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоками детектирования БДКН-96 и БДМН-96 [16], а также дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования

Табл.1. Выделяемые диапазоны энергий и их дозиметрические характеристики.

Наименование диапазона энергий нейтронов	Диапазон энергий нейтронов	Взвешивающий коэффициент излучения, W_R МКРЗ 60 [20]		Взвешивающий коэффициент излучения, W_R МКРЗ 103 [21]	
		Диапазон энергий нейтронов	Значение фактора	Диапазон энергий нейтронов	Значение фактора
Высокие энергии (релятивистские)	более 10 МэВ	более 20 МэВ	5	более 50 МэВ	$W_R = 2,5 + 3,25e^{-[\ln(0,04E_n)]^2/6}$ (1)
		от 2 до 20 МэВ	10	от 1 до 50 МэВ	$W_R = 5,0 + 17,0e^{-[\ln(2E_n)]^2/6}$ (2)
Быстрые	от 10 кэВ до 10 МэВ	от 100 кэВ до 2 МэВ	20		
		от 10 до 100 кэВ	10		
		Промежуточные	от 100 эВ до 10 кэВ	менее 10 кэВ	5
Медленные	менее 1 эВ		5		
Эпитепловые	от 0,025 до 1 эВ	5			
Тепловые	0,025 эВ	5			
Холодные	от $5 \cdot 10^{-5}$ до 0,25 эВ	5			

БДКН-06 [17]. Дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДКН-96 предназначен для измерения МАЭД, АЭД и плотности потока нейтронного излучения в диапазоне энергий от 0,025 эВ до 14 МэВ. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения МАЭД нейтронного источника ^{238}Pu - α -Be составляет $\pm 26\%$. Энергетическая зависимость $\pm 40\%$. Анизотропия $\pm 30\%$. Дозиметр-радиометр ДКС-96 с блоком детектирования БДМН-96 предназначен для измерения МАЭД и АЭД нейтронного излучения в диапазоне энергий от 0,025 эВ до 10 МэВ. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения МАЭД нейтронного источника составляет $\pm 26\%$. Энергетическая зависимость $\pm 40\%$. Анизотропия $\pm 30\%$. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 предназначен для измерения МАЭД, АЭД и скорости счета нейтронного излучения в

диапазоне энергий от 0,025 эВ до 16 МэВ. Предел допускаемой основной относительной погрешности измерения МАЭД нейтронного излучения $\pm 20\%$. Относительная чувствительность от угла падения до минус 25%. Принципиальное отличие применяемых дозиметров-радиометров заключалось в используемом детекторе и геометрии замедлителя. Блок детектирования БДКН-96 имеет в качестве детектора ^3He пропорциональный счетчик, окруженный полиэтиленовым замедлителем цилиндрической формы с внешним диаметром 100 мм. Блок детектирования БДМН-96 состоит из детектора на основе LiF с содержанием ^6Li 85% с добавлением ZnS(Ag), окруженного полиэтиленовым замедлителем сферической формы с внешним диаметром 245 мм. Используемые дозиметры-радиометры имели действующую поверку. Измерения дозиметрических величин проводилось в соответствии с процедурой, описанной

Табл.2. Результаты измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами в точках.

№ точки	МАЭД, мкЗв/ч				Отношение МАЭД прибора к МАЭД по спектру, отн. ед.		
	ДКС-96 с БДКН-96	ДКС-96 с БДМН-96	МКС-АТ 1117М с БДКН-06	Значение по спектру	ДКС-96 с БДКН-96	ДКС-96 с БДМН-96	МКС-АТ 1117М с БДКН-06
1	434	410	461	526	0,83	0,78	0,88
2	93	86	115	132	0,70	0,65	0,87
3	67	57	64	66	1,02	0,86	0,98
4	54	46	43	49	1,10	0,94	0,89
5	60	31	39	42	1,42	0,74	0,93
6	70	37	37	35	1,97	1,05	1,06
7	68	37	32	30	2,27	1,23	1,06
8	58	25	58	61	0,96	0,41	0,95
9	66	37	45	44	1,52	0,86	1,04
10	38	15	22	35	1,06	0,42	0,61
11	-	-	-	-	-	-	-
12	59	42	32	31	1,94	1,36	1,03
13	72	44	53	49	1,47	0,89	1,09
14	79	72	101	107	0,74	0,68	0,95
15	37	21	28	26	1,40	0,79	1,08
16	39	21	29	23	1,67	0,92	1,24
17	43	15	23	20	2,14	0,75	1,12
18	40	13	10	17	2,31	0,76	0,57
19	34	12	15	12	2,86	0,97	1,25
20	30	10	12	11	2,81	0,98	1,12
21	-	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-	-
23	35	15	18	19	1,81	0,78	0,93
24	33	16	18	16	2,12	1,03	1,15
25	28	13	16	15	1,91	0,89	1,05
26	26	10	12	10	2,56	0,99	1,25
27	34	18	22	22	1,53	0,81	1,01
28	30	13	17	16	1,88	0,84	1,08
29	21	8	10	9	2,32	0,91	1,13
30	18	6	8	8	2,33	0,77	1,08
31	55	33	43	46	1,21	0,71	0,95
32	35	17	19	18	2,00	0,94	1,10
33	27	10	13	13	2,16	0,77	1,03
34	25	10	15	14	1,81	0,72	1,10
35	24	10	8	6	3,77	1,54	1,23
36	27	8	11	9	3,00	0,86	1,21



Рис.2. Дозиметр-радиометр МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором полиэтиленовых сфер-замедлителей.

в эксплуатационной документации в соответствии с описанием типа.

Третий этап работы включал измерение спектров нейтронного излучения в узлах той же упорядоченной сетки точек измерения. Измерения нейтронных спектров проводились с помощью дозиметра-радиометра МКС-АТ1117М с блоком детектирования БДКН-06 и набором полиэтиленовых сфер-замедлителей (рис.2) по аттестованной методике, номер в реестре № ФР.1.38.2020.37361.

Для измерения плотности потока нейтронов блок детектирования БДКН-06 размещался на высоте, соответствующей высоте пучка поворочной установки 1,5 м (рис.3).



Рис.3. Вид помещения с установкой УКПН-1М.

Разработка и испытание многосферного дозиметра-радиометра обсуждались в статье [18]. Скорости счета, полученные с помощью дозиметра-радиометра, использовались для расчета нейтронных спектров. В этой работе был использован один из самых популярных алгоритмов восстановления нейтронного спектра. Этот алгоритм основан на изменении параметров, включенных в описание спектра. Более подробную информацию об этом алгоритме можно найти в исследовании [19].

На сегодняшний день отсутствует единая принятая классификация нейтронного излучения по диапазонам энергий, что приводит к тому, что современные подходы к оценке воздействия нейтронного излучения принято рассматривать с учетом специфики отдельных диапазонов энергии нейтронов (табл.1) [12].

Рассчитываемые для соответствующего диапазона энергий нейтронов значения взвешивающего фактора (1–3) позволяют оценить неизмеряемое значение эффективной дозы облучения нейтронами – основную дозиметрическую величину, применяемую в качестве меры ущерба здоровью человека от радиационного облучения. Для выполнения инструментального



Табл.3. Вклад нейтронов энергетических групп в плотность потока и МАЭД.

№ точки	Вклад в плотность потока, %			Вклад в МАЭД, %		
	Быстрые (0,5–20 МэВ)	Промежуточные (1 эВ – 0,5 МэВ)	Медленные (0,001 – 1 эВ)	Быстрые (0,5–20 МэВ)	Промежуточные (1 эВ – 0,5 МэВ)	Медленные (0,001 – 1 эВ)
1	71	24	5	93,9	5,9	0,3
2	62	31	7	93,6	6,0	0,3
3	52	37	11	93,1	6,3	0,6
4	47	42	11	90,1	9,2	0,7
5	39	48	13	89,1	10,0	0,9
6	35	52	14	87,1	11,8	1,1
7	34	50	15	87,4	11,3	1,2
8	52	35	13	94,4	4,9	0,7
9	42	46	12	90,4	8,8	0,8
10	40	50	10	87,8	11,5	0,7
11	-	-	-	-	-	-
12	33	48	19	84,0	14,6	1,4
13	40	49	11	88,6	10,7	0,8
14	53	41	6	90,9	8,7	0,3
15	32	51	17	84,3	14,3	1,4
16	31	47	21	84,5	13,8	1,7
17	30	49	21	83,5	14,7	1,8
18	28	49	23	87,3	10,4	2,2
19	20	55	24	80,2	16,9	2,9
20	19	53	28	78,4	18,1	3,5
21	-	-	-	-	-	-
22	-	-	-	-	-	-
23	34	45	21	86,8	11,5	1,6
24	27	53	20	82,8	15,3	1,9
25	27	55	18	81,9	16,4	1,7
26	26	51	23	83,7	14,0	2,3
27	37	46	37	87,0	11,8	1,2
28	30	47	24	83,5	14,5	2,0
29	27	49	25	84,8	12,8	2,4
30	29	47	24	89,0	8,7	2,3
31	51	37	12	94,0	5,3	0,7
32	35	48	17	90,2	8,4	1,3
33	25	51	23	81,0	16,8	2,2
34	32	52	16	87,5	11,1	1,3
35	21	53	25	86,0	10,8	3,2
36	19	53	28	83,7	12,6	3,7

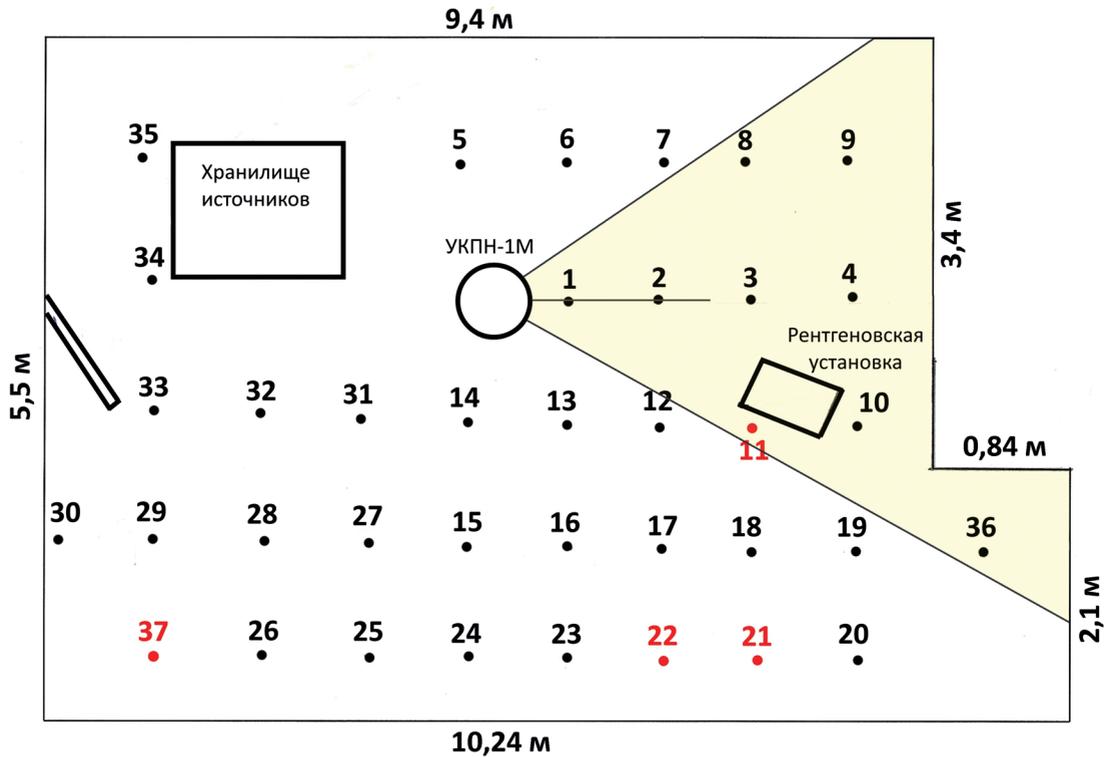


Рис. 4. Схема расположения точек измерений: черным цветом обозначены точки, в которых проводились измерения, красным – измерения отсутствуют.

контроля внешнего облучения в нейтронных полях применяются измеряемые величины – AMBIENTНЫЙ (или индивидуальный) эквивалент дозы (или мощности дозы) и плотность потока нейтронного излучения в точке измерения. Для метрологической поверки средств измерения используются эти же величины. Качество результата поверки напрямую зависит от стабильности и однородности характеристик аттестованного поля нейтронного излучения в локальных участках пространства проведения поверочных испытаний средств измерения. В реальных условиях существует вероятность проявления эффекта модерации нейтронов, приводящего к регистрируемым изменениям в пространстве характеристик поля нейтронного излучения.

В настоящей работе в каждой обследованной точке получены результаты прямого измерения и расчетные значения МАЭД на основе оценок энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. Метод

оценки энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения подробно описан в опубликованной работе [6-7].

Данные о распределении энергии нейтронов в каждой исследованной точке помещения позволили определить значение МАЭД нейтронного излучения в соответствии с формулой [15]:

$$\dot{H}^*(10) = \int_0^{\infty} h^*(10, E) \cdot \Phi_E(E) dE, \quad (4)$$

где $h^*(10, E)$ – удельный AMBIENTНЫЙ эквивалент дозы в зависимости от энергии нейтронного излучения, $\Phi_E(E)$ – энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в точке измерения.

В настоящей работе представлены результаты расчета мощности AMBIENTНОГО эквивалента дозы в каждой выбранной точке с учетом энергетического распределения нейтронного излучения в соответствии с формулой (4). Весь спектр нейтронного излучения был разбит на 34 энергетических диапазона от 10^{-9} до 20 МэВ. Так как сравнение значений МАЭД

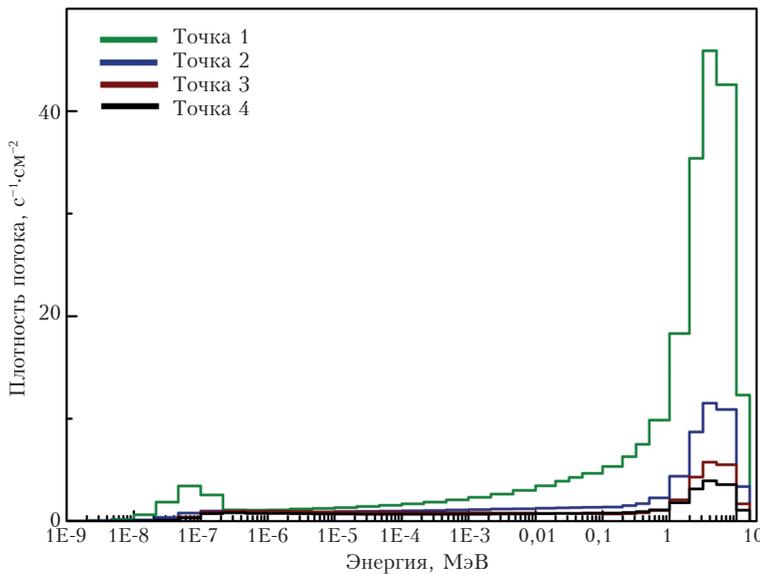


Рис.5а. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в направлении пучка: точки 1, 2, 3, 4.

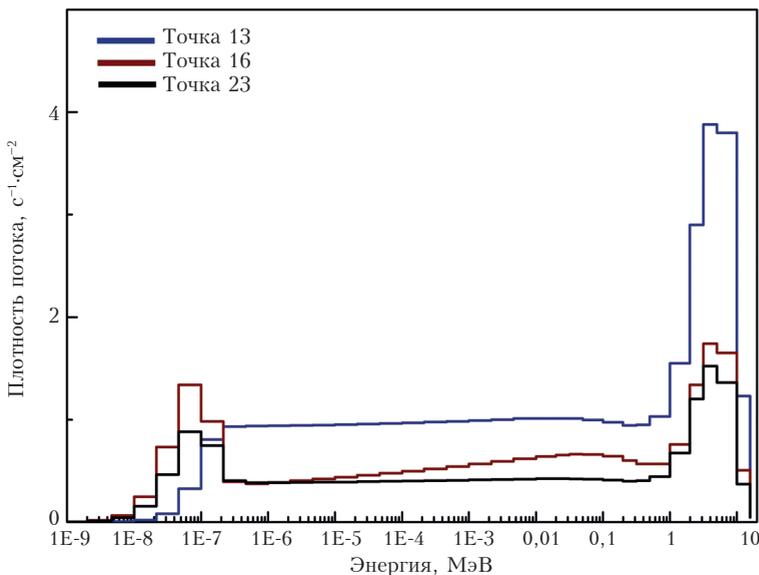


Рис.5б. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в направлении, перпендикулярном пучку: точки 13, 16, 23.

во всех 34-х энергетических диапазонах лишено смысла, они были объединены в 3 энергетических диапазона:

- быстрых нейтронов (0,5 – 20 МэВ);
- промежуточных нейтронов (1 эВ – 0,5 МэВ);
- медленных нейтронов (0,001 – 1 эВ).

Для радионуклидных источников характерный спектр при нормальных условиях окру-

жающей среды лежит в диапазоне от 10^{-8} до 20 МэВ. Холодные нейтроны и сверхбыстрые нейтроны могут наблюдаться только при работе на специфических научно-исследовательских установках в специально созданных условиях.

Результаты

В помещении поверочной установки удалось выделить 37 точек, в 33 из которых были проведены измерения. Расположение узлов сетки (точек измерений) представлено на рис.4 (желтым цветом отмечен сектор, куда попадает непосредственно прямой пучок нейтронного излучения).

В табл.2 приведены результаты прямых измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами, а также приведены рассчитанные по формуле (4) значения МАЭД, полученные с использованием измеренного спектра нейтронного излучения в точках измерений.

Расположение точек 1 и 2 соответствует расположению точек с аттестованными значениями МАЭД. Срав-

нение полученных в ходе исследований значений МАЭД в указанных точках с аттестованными значениями позволяет оценить достоверность данных настоящей работы. В точке 1 все полученные в ходе исследования значения МАЭД отличаются от аттестованных значений (без учета основной относительной погрешности аттестованного значения)

не более установленного предела допускаемой основной относительной погрешности средств измерений:

- ДКС-96 с БДКН-96 ниже на 9,4%;
- ДКС-96 с БДМН-96 ниже на 14,4%;
- МКС-АТ117М с БДКН-06 ниже на 3,8%;
- расчет МАЭД по спектру энергии нейтронов выше на 9,8%.

В точке 2 аналогичное отличие удовлетворительно не для всех полученных данных:

- ДКС-96 с БДКН-96 ниже на 22,4%;
- ДКС-96 с БДМН-96 ниже на 28,2%;
- МКС-АТ117М с БДКН-06 ниже на 4,0%;
- расчет МАЭД по спектру энергии нейтронов выше на 10,2%.

В точке 2 результат измерения МАЭД с помощью ДКС-96 с БДМН-96 отличается от аттестованного значения на величину, превышающую установленный предел допускаемой основной относительной погрешности прибора. Однако если учесть то, что основная относительная погрешность аттестованного значения составляет 4%, то результат измерений МАЭД с помощью ДКС-96 с БДМН-96 достоверно не отличается от аттестованного значения. Выполненная оценка отклонений результатов исследования от аттестованных значений позволяет сделать вывод о достоверности данных и возможности проведения дальнейшего анализа с целью получения объективных качественных и количественных характеристик стационарного поля нейтронного излучения аттестованного источника.

На рис.5а представлены результаты определения энергетических характеристик плотности потока нейтронного излучения в направле-

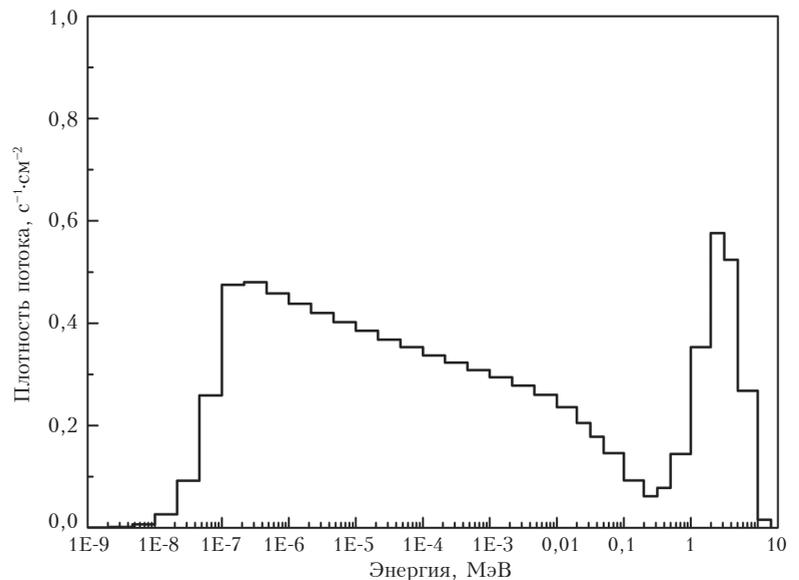


Рис.5в. Энергетическое распределение плотности потока нейтронного излучения в точке 35, находящейся за поверочной установкой вне пучка.

нии прямого воздействия пучка на расстоянии 1, 2, 3 и 4 метра от источника излучения, соответственно. Появление в правой части графика пика медленных нейтронов указывает на присутствие эффекта модерации даже в условно ближней зоне от источника нейтронов.

На рис.5б представлены результаты определения энергетических характеристик плотности потока нейтронного излучения в направлении, перпендикулярном прямому пучку, точки расположены на расстоянии 1, 2 и 3 метра от точки 1, соответственно. Наглядно видно усиление эффекта модерации в виде явного плато промежуточных нейтронов и пиков медленных нейтронов.

Наибольшее проявление эффекта модерации наблюдается в точках, находящихся в удалении от прямого пучка. Пример спектра рассеянных нейтронов представлен на рис.5в для точки 35.

Наблюдаемые на рис.5 проявления модерации нейтронов зависят от расстояния до источника нейтронов и от расположения точек относительно направления пучка нейтронов. Ожидаемо, эффект модерации усиливается

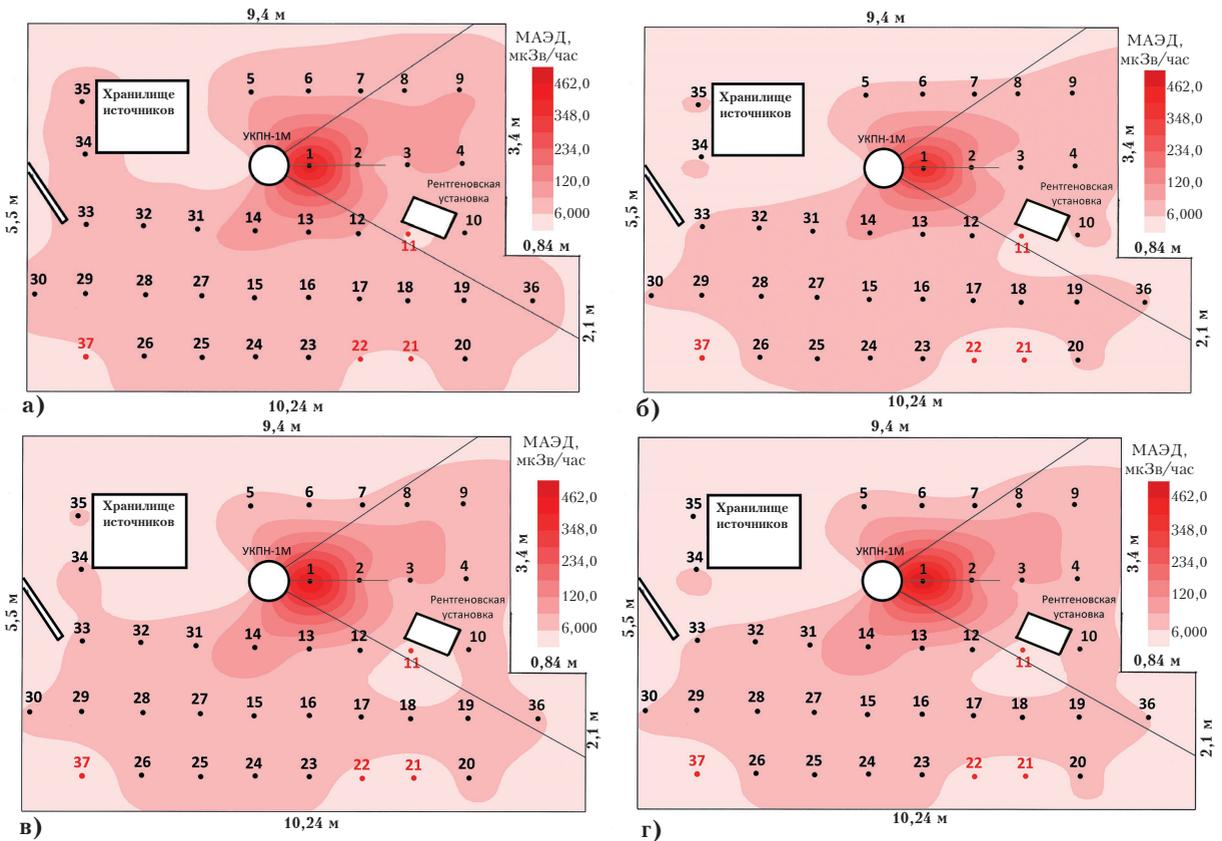


Рис. 6. Распределение МАЭД в помещении поверочной установки, измеренное с помощью дозиметров-радиометров: а) ДКС-96 с БДКН-96; б) ДКС-96 с БДМН-96; в) МКС-АТ1117М с БДКН-06; г) получен с использованием спектра по формуле (1).

в направлении, перпендикулярном направлению пучку нейтронов и на удалении от источника. При значительном удалении от источника увеличивается вероятность и частота упругих взаимодействий потока нейтронов с материалом стен (бетон), оборудования (железо), что приводит к потере нейтронами части энергии. Представленные на рис.5 графики воспроизводят ситуацию условий облучения на различных рабочих местах в полях нейтронного излучения, формируемого однотипными источниками, но с различным энергетическим распределением плотности потока [6-11].

Наблюдение снижения средней энергии спектра вследствие рассеяния нейтронов за счет увеличения вклада тепловых и промежуточных нейтронов позволяет предположить наличие неоднородных зон в исследуемом про-

странстве с различным вкладом в суммарный поток нейтронов выделенных трех энергетических групп. Вклад каждой группы нейтронов в плотность потока и МАЭД в каждой обследованной точке представлен в табл.3.

В выбранных для выполнения метрологической поверки радиометров и дозиметров нейтронного излучения точках 1 и 2, расположенных в ближней зоне прямого излучения, значение МАЭД нейтронного излучения обусловлено преимущественно быстрыми нейтронами (на ~94%) и промежуточными нейтронами (на ~4%). Вклад медленных нейтронов в величину МАЭД нейтронного излучения не превышает 0,3%. Некоторые СИ, поверенные на обследованной установке в указанных точках, будут воспроизводить адекватные результаты измерения МАЭД только на рабочих местах с аналогичным соотношением быстрых,

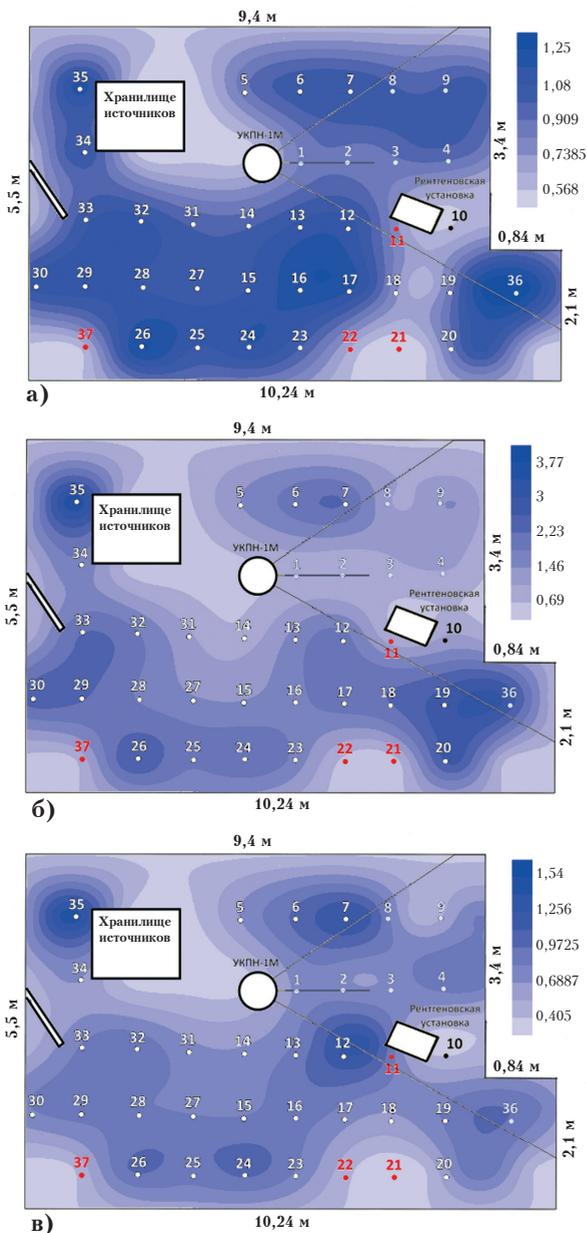


Рис. 7. Отношения результатов измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами к истинному значению МАЭД: а) МКС-АТ1117М с БДКН-06; б) ДКС-96 с БДКН-96; в) ДКС-96 с БДМН-96.

промежуточных и медленных нейтронов. Для рабочих мест с другим соотношением вклада нейтронов энергетических групп в плотность потока и МАЭД требуется введение поправочных коэффициентов для таких СИ [6-11]. В качестве примера показательно результаты исследования в точке 35, где снижение вклада быстрых нейтронов в значение МАЭД на 8%

при одновременном увеличении вклада промежуточных (на ~7%) и медленных (на ~3%) нейтронов привело к практически четырехкратному завышению результата измерения МАЭД нейтронного излучения в сравнении с условно истинным значением, рассчитанным по формуле (4).

Полученные достоверные данные прямых измерений МАЭД различными средствами измерения, определение энергетических характеристик нейтронного излучения в различных точках пространства поверочной установки, расчет значений МАЭД по установленному энергетическому распределению нейтронного излучения позволяют провести анализ пространственных характеристик нейтронного поля поверочной установки. Результаты анализа необходимы для объективной оценки степени однородности в пространстве поля нейтронного излучения, определения факторов, влияющих на результаты измерения различных средств измерения в условиях изменения спектра энергий нейтронного потока.

Обсуждение

Результаты исследования наглядно демонстрируют влияние эффекта модерации на неоднородность стационарного поля нейтронного излучения по энергетическому распределению плотности потока в пространстве. В различных точках обследованного помещения поверочной установки вклад в плотность потока меняется:

- быстрых нейтронов в 3,7 раза – от 19 до 71%;
- промежуточных нейтронов в 2,3 раза – от 24 до 55%;
- медленных нейтронов в 7,4 раза – от 5 до 37%.

К основным факторам, усиливающим модерацию нейтронов, относятся: расстояние от источника нейтронов; расположение точки измерения относительно прямого пучка нейтронов;

наполнение пространства предметами и конструкциями из железа; геометрические характеристики и расположение строительных конструкций из бетона.

Установленная неоднородность стационарного поля излучения нейтронов, сформированного аттестованным ^{238}Pu - α -Be источником быстрых нейтронов, определяет отличие результатов прямых измерений значений МАЭД и условно истинных значений, рассчитанных на основании энергетического распределения плотности потока. Диапазон отличий от условно истинных значений МАЭД меняется:

- от 0,7 до 3,8 раза для результатов измерения ДКС-96 с БДКН-96;
- от 0,4 до 1,5 раз для результатов измерения ДКС-96 с БДМН-96;
- от 0,6 до 1,3 раза для результатов измерения МКС-АТ1117М с БДКН-06.

Исходя из апертуры угла диафрагмы, под действие прямого пучка источника нейтронов попадают следующие точки измерений: 1, 2, 3, 4, 8, 9, 10, 36. В остальных точках поле формируется нейтронами, рассеянными от стен, пола, потолка комнаты, от оборудования других установок, прошедших материал поверочной установки. Можно предположить дополнительный выход излучения нейтронов из хранилища источников для точек 34 и 35.

Карта распределения МАЭД нейтронного излучения представлена на рис.6., где отмечается повышенное значение МАЭД в точках 13 и 14 по сравнению с точками 5 и 6 (более чем в 2 раза), расположенных симметрично относительно направления распространения прямого пучка. Данное отклонение наблюдается в силу того, что открытие защитного контейнера поверочной установки происходит путем отодвигания заслонки влево (в направлении точек 5 и 6, рис.3), что создает дополнительную защиту от излучения в точках 5, 6 и увеличивает количество рассеянных нейтронов в точках 13, 14 и близлежащих к ней точках.

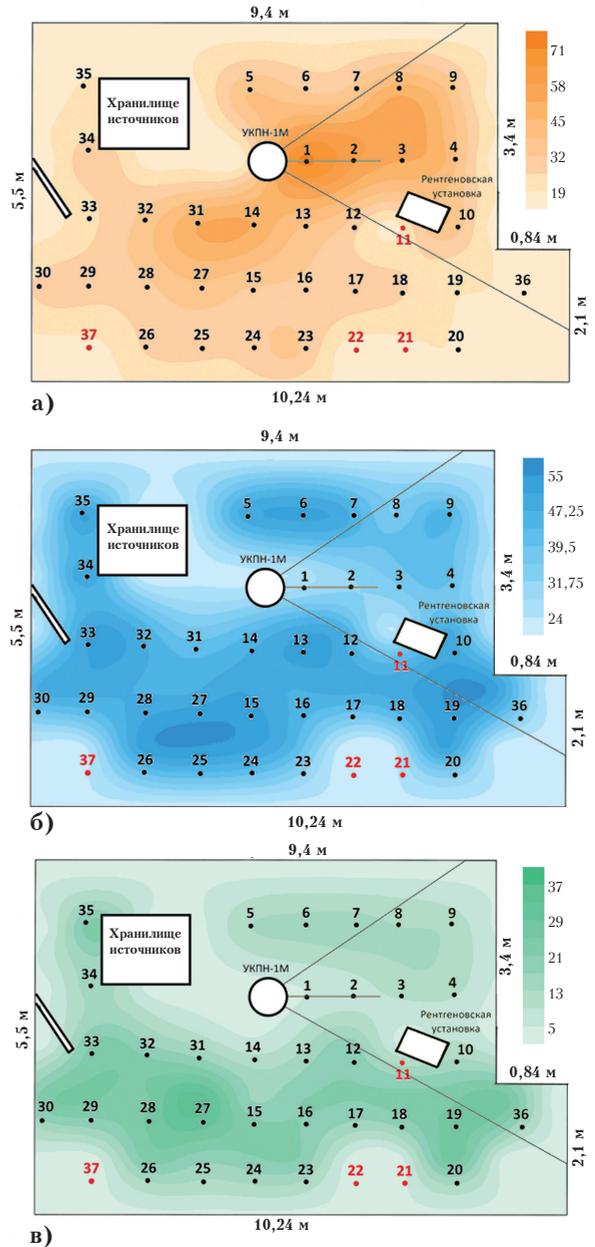


Рис.8. Вклады нейтронов различных энергий в плотность потока: а) быстрые нейтроны; б) промежуточные нейтроны; в) медленные нейтроны.

Предполагая, что МАЭД, рассчитанная по формуле (4) с использованием данных об энергетическом распределении плотности потока нейтронного излучения, отражает истинное значение, были рассчитаны отношения результатов измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами к истинному значению МАЭД. Принимая во внимание предел допускаемой основной отно-

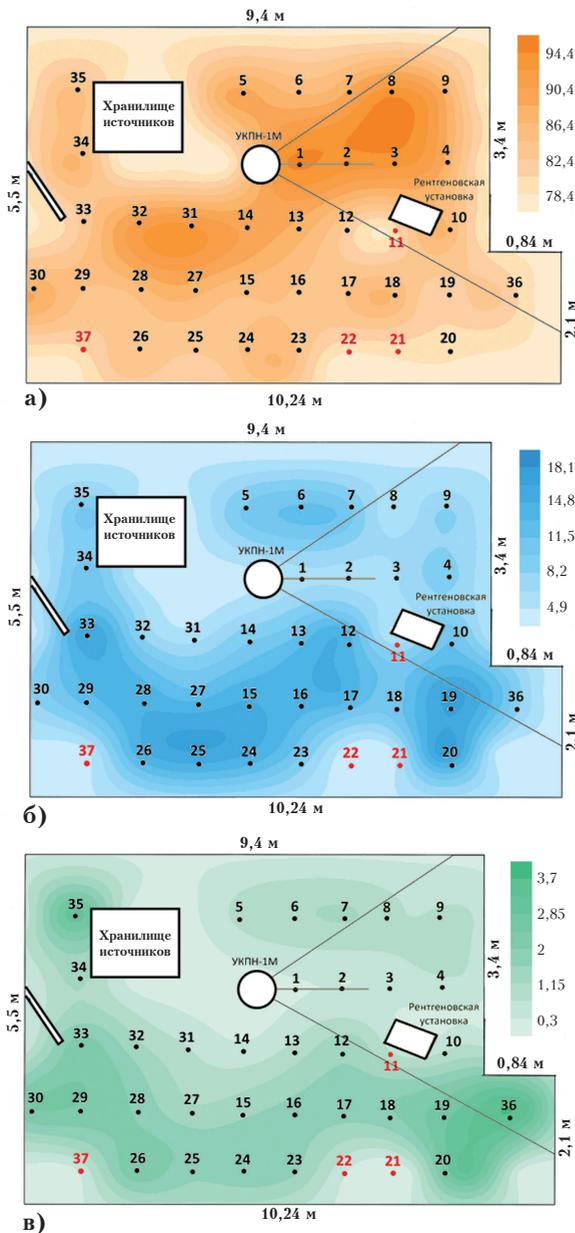


Рис.9. Вклады нейтронов различных энергий в мощность амбиентного эквивалента дозы: а) быстрые нейтроны; б) промежуточные нейтроны; в) медленные нейтроны.

сительной погрешности результата измерений МАЭД дозиметрами-радиометрами, выделен диапазон значений отношений, в пределах которого можно считать, что результат измерения соответствует истинному значению. Наглядно отношения представлены на рис.7.

Анализируя данные табл.1 и рис.8, можно увидеть, что только 20% результатов измере-

ний, полученных с помощью ДКС-96 с БДКН-96, соответствуют истинным значениям. Тот же показатель для ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06 составляет 80 и 87%, соответственно. Такое отличие результатов обуславливается преимущественно тем, что конструкция блока детектирования БДКН-96 предназначена для измерения МАЭД нейтронов только для источников быстрых нейтронов, характерных для $^{238}\text{Pu}-\alpha\text{-Be}$ источников. В полях не прямых пучков результаты измерений, полученные с применением данного блока детектирования, недооценивают или переоценивают истинное значение.

На рис.5а видно, что происходит интенсивное уменьшение пика быстрых нейтронов за счет геометрического ослабления излучения прямого пучка. На рис.5б наблюдается также геометрическое ослабление излучения в направлении, перпендикулярном прямому пучку. В точке, находящейся вдали и в противоположном направлении от прямого пучка источника, наблюдается типичный спектр рассеянного излучения, в котором присутствует пик быстрых нейтронов, вероятно, сформированный излучением, прошедшим через защитный контейнер поверочной установки, и излучением, прошедшим через защиту хранилища источников. Также в точке 35 наблюдается большое количество замедленных нейтронов, отраженных от прилегающих к точке поверхностей.

В поле прямого пучка при удалении от источника к передней стене комнаты наблюдается постепенное увеличение вклада медленных и промежуточных нейтронов в суммарную плотность потока; напротив, вклад быстрых нейтронов уменьшается. В точках, лежащих вне воздействия прямого пучка, вклад медленных нейтронов варьируется в диапазоне от 20 до 37%. Исключение составляют точки 13, 14 и 31, где имеет влияние отражение излучения от заслонки защитного контейнера, а также

испускание излучения источника через технологические зазоры и неоднородности в защитном контейнере.

Наглядная демонстрация вкладов нейтронов различных энергий в плотность потока представлена на рис.8, а в мощность амбиентного эквивалента дозы – на рис.9.

Вне прямого пучка и за исключением аномальных точек вклад нейтронов промежуточных энергий лежит в пределах $50 \pm 3\%$. Вклад быстрых нейтронов в поле рассеянного излучения вблизи стен составляет $26 \pm 5\%$, а вклад медленных – $23 \pm 4\%$.

Выводы

Проведены исследования полей нейтронного излучения, формируемых вокруг поверочной установки УКПН-1М. В помещении поверочной установки выделены 37 точек, в 33 из которых проведены измерения МАЭД и энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения. Установлено, что только 20% результатов измерений, полученных с помощью ДКС-96 с БДКН-96, соответствуют истинным значениям; тот же показатель для ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06 составляет 80 и 87%, соответственно. Дозиметры-радиометры ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06 могут применяться для измерения дозиметрических величин в широком энергетическом диапазоне нейтронного излучения – от тепловых до быстрых. Дозиметр-радиометр ДКС-96 с БДКН-96 может применяться только в полях прямого пучка источника быстрых нейтронов. Результаты измерений дозиметрами-радиометрами ДКС-96 с БДМН-96 и МКС-АТ1117М с БДКН-06 согласуются между собой на 97%.

Технологическое оборудование поверочной установки имеет влияние на формирование поля нейтронного излучения за пределами действия прямого пучка. Наличие заслонки, располагающейся слева от защитного контейнера во время работы поверочной установки, приводит к увеличению МАЭД в направлении, перпендикулярном направлению распространения пучка. В некоторых случаях (например, ручное управление заслонкой поверочной установки) это может приводить к дополнительному облучению персонала.

В поле прямого излучения ^{238}Pu - α -Be источника нейтронов вклад быстрых нейтронов в формирование МАЭД составляет не менее 90%. Пользователям средств измерения МАЭД и плотности потока нейтронного излучения целесообразно обращать внимание на данные о вкладе быстрых, промежуточных и медленных нейтронов при метрологической поверке. В случае существенного отличия распределения вклада нейтронов указанных энергетических групп в плотность потока и МАЭД на обследуемых рабочих местах от условий проведения метрологической поверки, требуется введение поправочных коэффициентов.

Однотипные стационарные источники нейтронов в различных внешних условиях (геометрия помещения, наполнение конструкциями и оборудованием) будут создавать поля нейтронного излучения с различными характеристиками энергетического распределения плотности потока нейтронного излучения в пространстве, что может потребовать применение различных поправочных коэффициентов к результатам прямых измерений МАЭД на производственных объектах и/или для индивидуальных дозиметров.

Литература

1. Горин Н.В., Екидин А.А., Головихина О.С. Атомная энергетика в национальных проектах России // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2021. № 1. С. 5-15.
2. Общие принципы радиационной защиты персонала. Публикация 75 МКРЗ. Екатеринбург. УРАЛРЭСЦЕНТР, 1999.
3. Радиационная защита и безопасность источников излучения: международные основные нормы безопасности. Общие требования безопасности. Серия норм безопасности МАГАТЭ № GSR, часть 3, МАГАТЭ, Вена, 2015.
4. Федеральный закон от 26.06.2008 № 102-ФЗ «Об обеспечении единства измерений».
5. Указ Президента РФ от 13 октября 2018 г. № 585 «Об утверждении Основ государственной политики в области обеспечения ядерной и радиационной безопасности Российской Федерации на период до 2025 года и дальнейшую перспективу».
6. Екидин А.А., Поваров В.П., Росновский С.В. и др. Совершенствование системы дозиметрического контроля нейтронного облучения персонала Нововоронежской атомной станции // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2023. № 1. С. 82-95.
7. M. Pyshkina, A. Vasilyev, A. Ekidin et al. «Study of neutron energy and directional distribution at the Beloyarsk NPP selected workplaces», *Nuclear Engineering and Technology*, 2020. P. 015.
8. Пышкина М.Д., Никитенко В.О., Жуковский М.В., Екидин А.А. Неопределенность результатов измерений индивидуальных дозиметров нейтронного излучения на рабочих местах // АНРИ. 2018. № 4(95). С. 15-23. URL: <https://www.doza.ru/anry/archive/95/1523.pdf> (дата обращения: 24.09.2022).
9. Пышкина М.Д., Васильев А.В., Екидин А.А. и др. Дозиметрия нейтронного излучения на рабочих местах персонала АО «Институт реакторных материалов» // Радиационная гигиена. 2021. Т. 14. № 2. С. 89-99.
10. Алексеев А.Г., Пикалов В.А., Алексеев П.А. Поправочные коэффициенты при измерении мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов // АНРИ. 2021. № 4(107). С. 32-40.
11. Пышкина М.Д., Васильев А.В., Екидин А.А. и др. Профессиональное облучение нейтронами на Белоярской АЭС // АНРИ. 2021. № 3(106). С. 16-26.
12. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Neutron Monitoring for Radiation Protection, Safety Reports Series no. 115, IAEA, Vienna, 2023.
13. V. Gressier et al. «Characterisation of the IRSN CANEL/T400 facility producing realistic neutron fields for calibration and test purposes», *Radiat. Prot. Dosim.*, № 110, pp. 523-527, 2004.
14. Методика поверки нейтронных дозиметров в коллимированном пучке МИ 172-78.
15. International standard ISO 8529. – Switzerland: International Standard Organization, 2021.
16. Приложение к свидетельству № 43717 об утверждении типа средства измерения. Дозиметры-радиометры ДКС-96.
17. AT1117M Radiation Monitor. URL: https://atomtex.com/sites/default/files/datasheets/at1117m_all_options_0.pdf (дата обращения: 2.12.2024).
18. M. Pyshkina, A. Vasilyev, A. Ekidin, M. Zhukovsky. Development and testing of a neutron radiation spectrometer in fields of radionuclide sources. AIP Conference Proceeding.
19. R. Bedogni, C. Domingo, A. Esposito, F. Fernandez. FRUIT: An operational tool for multisphere neutron spectrometry in workplaces. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, vol. 580, pp. 1301-1309.
20. Радиационная безопасность. Рекомендации Междунар. комис. по радиол. защите 1990 г. Публ. 60 МКРЗ, ч. 2. Приняты МКРЗ в нояб. 1990 г. Пер. с англ. Кузьминой Т.Д. Под ред. Кеирим-Маркуса И.Б. М.: Энергоатомиздат, 1994. 207 с.
21. Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ). Пер с англ. под общей ред. Киселева М.Ф. и Шандалы Н.К. М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009.

Spatial Distribution of Characteristics of the Inhomogeneous Stationary Field of Fast Neutron Source

Pyshkina Maryia¹, Vasilyev Aleksey¹, Ekinin Aleksey¹, Nazarov Evgeniy¹, Mishchenko Lubov², Furtikova Olesya³

¹ Institute of Industrial Ecology UrO RAS, Yekaterinburg, Russia

² FBU Uraltest, Yekaterinburg, Russia

³ LLC «АЭБ «Альфа-Кх91», Yekaterinburg, Russia

Abstract. The results of the study of the stationary field of neutron radiation of the verification installation UKPN-1M under normal operating conditions are presented. The influence of reflecting and absorbing surfaces, materials of structures, equipment, and tooling on the moderation of the neutron energy spectrum is demonstrated. In certain points of the location space of the UKPN-1M, the proportion of thermal neutrons in the energy spectrum increases by a factor of 7,5 and the proportion of intermediate energy neutrons doubles. For these local areas of space, the contribution to the equivalent absorbed dose in tissue of thermal neutrons increases from 0,3% to 3,7%, and for intermediate energy neutrons from 5,9% to 18,1% compared to areas of space without the moderation effect of the neutron energy spectrum by surrounding materials. The moderation effect of the neutron flux leads to an overestimation of the results of measuring the equivalent absorbed dose in tissue of neutron radiation compared to the calculated value of the equivalent absorbed dose by the energy spectrum by factors of 3,77, 1,54, and 1,25 respectively for DCS-96 with BDCN-96, DCS-96 with BDMN-96, and MKS-AT1117M with BDCN-06.

Keywords: *neutron radiation, spectra, moderation, dose rate, measuring instruments, metrology.*

М.Д.Пышкина (к.т.н., н.с.)¹, А.В.Васильев (к.т.н., с.н.с.)¹, А.А.Екидин (к.ф.-м.н., в.н.с.)¹, Е.И.Назаров (к.т.н., зав.лаб.)¹, Л.А.Мищенко (инж.)², О.И.Фуртикова (менеджер)³

¹ *Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург*

² *ФБУ Уралтест, г. Екатеринбург*

³ *ООО «АЭБ «Альфа-Х91», г. Екатеринбург*

Контакты: maria1pyshkina@gmail.com, тел. +7 (912) 667-71-69