

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА МОНОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ НЕЙТРОНОВ СПЕКТРОМЕТРОМ-ДОЗИМЕТРОМ SDMF-1608SN В РАДИАЦИОННЫХ ПОЛЯХ РТВ ИОННОЙ УСКОРИТЕЛЬНОЙ УСТАНОВКИ (PIAF), ГЕРМАНИЯ

© 2022 г. П. И. Руднев^{а,*}, И. В. Чешигин^а

^а ООО “Центр АЦП”

Россия, 125040, Москва, ул. Верхняя, 6

*e-mail: peter@centeradc.ru

Поступила в редакцию 10.03.2022 г.

После доработки 16.04.2022 г.

Принята к публикации 29.04.2022 г.

Приведены результаты измерений плотности потока медленных нейтронов и энергетических распределений плотности потока быстрых нейтронов с помощью цифрового спектрометра-дозиметра SDMF-1608SN в полях ионной ускорительной установки PIAF (РТВ – Physikalisches-Technische Bundesanstalt Nationales Metrologieinstitut, Германия). Полученные результаты демонстрируют высокую точность измерения энергии и плотности потока нейтронов в широком энергетическом диапазоне (от 24 кэВ до 20 МэВ).

DOI: 10.31857/S0032816222050214

ВВЕДЕНИЕ

Мобильный цифровой спектрометр-дозиметр нейтронного и γ -излучения SDMF-1608SN разработан в ООО “Центр АЦП”, Москва [1, 2]. Внешний вид спектрометра-дозиметра показан на рис. 1.

Для измерения энергетического распределения плотности потока быстрых нейтронов в диапазоне энергий 0.1–16 МэВ используется детектор на основе органического сцинтиллятора. Метод регистрации основан на упругом рассеянии

нейтронов на ядрах водорода с последующим восстановлением энергетического спектра нейтронов из аппаратного спектра протонов отдачи методом сглаживающего дифференцирования [3]. В процессе восстановления учитываются и вводятся поправки на многократное рассеяние нейтрона в сцинтилляторе и краевые эффекты (выход протона отдачи за пределы сцинтиллятора).

Детектор на органическом сцинтилляторе также регистрирует энергетические распределения γ -квантов в диапазоне от 100 кэВ до 8 МэВ. Метод



Рис. 1. Внешний вид спектрометра-дозиметра.

регистрации основан на упругом рассеянии γ -квантов на свободных электронах (комптоновское рассеяние). Энергетическое распределение плотности потока γ -квантов восстанавливается из аппаратного распределения комптоновских электронов методом сглаживающего дифференцирования с введением поправок на многократное рассеяние γ -квантов в сцинтилляторе и краевые эффекты (выход электронов отдачи за пределы сцинтиллятора) [3].

Для измерения плотности потока медленных нейтронов в диапазоне энергий от 0.03 эВ до 100 кэВ используется детектор на основе борного счетчика СНМ-13 с полиэтиленовым замедлителем. Детектор откалиброван в широком диапазоне полей медленных нейтронов, сформированных за различными легкими защитными материалами толщиной от 5 до 50 см. Первичным источником быстрых нейтронов служит радионуклидный источник $^{239}\text{Pu}(\alpha, n)^9\text{Be}$ со средней энергией ~ 4.9 МэВ. Энергетические распределения плотности потока нейтронов с энергией выше 0.1 МэВ за защитными материалами рассчитывались с помощью кода VRAD (Virtual Radiation) [4], реализующего метод расчетного эксперимента Монте-Карло, и измерялись с помощью спектрометра-дозиметра SDMF-1608SN. Результаты расчета сравнивались с измеренными энергетическими распределениями плотности потока быстрых нейтронов и нормировались на них, что позволяло объединить результаты измерений различными детекторами.

Спектрометр-дозиметр в реальном масштабе времени обеспечивает измерение аппаратных распределений импульсов и их идентификацию, восстановление энергетических спектров быстрых нейтронов и γ -квантов с отображением результатов на экране спектрометра-дозиметра и определение (вычисление) мощности эффективной дозы или мощности амбиентного эквивалента дозы (в зивертах) от излучений обоих видов в любом выбранном пользователем диапазоне энергий нейтронов и γ -квантов.

При вычислении мощности эффективной дозы и амбиентного эквивалента дозы используются значения конверсионных коэффициентов (в зиверт-квадратных сантиметрах) на единичный поток нейтронов и γ -квантов при различных энергиях излучения для отечественных (НРБ-99/2009) или международных (ISO-8529(3)-2001, ICRP 74, 1995) норм радиационной безопасности в зависимости от установки пользователя. Для γ -квантов вычисляется также мощность экспозиционной дозы в воздухе (в рентгенах) с использованием значений экспозиционной дозы на единичный поток γ -квантов при различных энергиях излучения (в микрорентген-квадратных санти-

метрах) — так называемая дозовая кривая Снай-дера.

При вычислении мощности эффективной дозы принимается во внимание также геометрия источника излучения (выбирается пользователем) — изотропное поле излучения или мононаправленный пучок излучения. Также для мононаправленного пучка излучения можно выбрать условия облучения человека: грудью, спиной, правым боком, левым боком и круговое облучение (также выбирается пользователем).

Опираясь на определение эффективной дозы, как

$$D_{\text{эф}}(E) = Q(E) \sum w_t D_{\text{abs},t}(E),$$

где $D_{\text{эф}}(E)$ — энергетический спектр эффективной дозы; $Q(E)$ — энергетическое распределение коэффициента качества излучения; w_t — весовой коэффициент для различных органов человека; $D_{\text{abs},t}(E)$ — энергетический спектр поглощенной дозы для различных органов человека, рассчитывается поглощенная доза (в греях) нейтронов и γ -излучения для всего человека. Для γ -квантов также вычисляется поглощенная доза (в радах) в воздухе.

Для спектрометра-дозиметра предусмотрена возможность проведения online измерений, что было активно использовано в настоящей работе.

Спектрометр-дозиметр SDMF-1608SN может применяться, в частности, для измерения энергетического распределения плотности потока быстрых нейтронов и γ -квантов на ядерно-энергетических установках, ускорителях и генераторах быстрых нейтронов, а также при калибровках интегральных дозиметров для γ -квантов и нейтронов.

В этой статье будут описаны результаты работы, относящиеся к нейтронному излучению.

УСЛОВИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Измерения спектрометром-дозиметром SDMF-1608SN проводились в полях ионной ускорительной установки PIAF (PTB — Physikalisch-Technische Bundesanstalt Nationales Metrologieinstitut) при энергиях нейтронов: 24, 144, 250, 565 кэВ, 1.2, 2.5, 5.0, 8.0, 14.8, 19.0 МэВ) с 7 по 14 июня 2021 года [5, 6]. Информация о мишенях, использованных нейтронно-образующих реакциях и энергиях нейтронов представлена в табл. 1.

Измерения осуществлялись в полях монохроматических нейтронов в соответствии с общими рекомендациями международных стандартов: ISO 8529-1:2001 “Излучения нейтронные эталонные. Часть 1. Характеристики и методы получения”; ISO 8529-2:2000 “Излучения нейтронные эталонные. Часть 2. Основные принципы калибровки радиационно-защитных приборов, каса-

Таблица 1. Данные моноэнергетических нейтронных полей

Реакция	Мишень	Θ_n	E_n , МэВ	ΔE_n , кэВ
${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$	Li, 70 мкг/см ²	76.5°	0.024	8
${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$	Li, 70 мкг/см ²	0°	0.144*	11*
${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$	Li, 70 мкг/см ²	0°	0.250	9
${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$	Li, 70 мкг/см ²	0°	0.565	8
${}^3\text{H}(p, n){}^3\text{He}$	Ti(T), 1 мг/см ²	0°	1.2	74
${}^3\text{H}(p, n){}^3\text{He}$	Ti(T), 2 мг/см ²	0°	2.5	103
${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$	D ₂ , 850 гПа	0°	5.0	124
${}^2\text{H}(d, n){}^3\text{He}$	D ₂ , 1830 гПа	0°	8.0	100
${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$	Ti(T), 1 мг/см ²	0°	14.8	435
${}^3\text{H}(d, n){}^4\text{He}$	Ti(T), 2 мг/см ²	0°	19.0	250

Примечание. Для угла падения нейтронов Θ_n , средней энергии нейтронов E_n и половинной ширины на уровне половинной амплитуды распределения прямых нейтронов ΔE_n указаны номинальные значения.

* Из-за распределения лития, отличного от номинального, фактическая средняя энергия была на 3.4 кэВ ниже номинальной, а ширина распределения увеличилась на 6%.

ющиеся основных величин, характеризующих радиационное поле”; ISO 8529-3:1998 “Излучения нейтронные эталонные. Часть 3. Калибровка дозиметров местности и персональных дозиметров, определение их характеристик чувствительности как функции энергии электронов и угла падения”.

Измерения выполнялись в условиях “открытой геометрии” (в помещении размером 24 × 30 × 14 м с малым рассеянием нейтронов) на ускорительном комплексе РИАФ РТВ (рис. 2). Температура в помещении в процессе выполнения измерений поддерживалась в пределах 21.5 ± 1.0°С.

При проведении измерений использовались три детектора спектрометра-дозиметра для различных областей энергетического диапазона:

– детектор быстрых нейтронов и γ -квантов № 1 был настроен для диапазона энергий нейтронов от 100 кэВ до 2 МэВ;

– детектор быстрых нейтронов и γ -квантов № 2 был настроен для диапазона энергий нейтронов от 500 кэВ до 21 МэВ;

– детектор медленных нейтронов № 3 с диапазоном энергий нейтронов от тепловых нейтронов до 100 кэВ.

Ниже приводятся условия и процедура проведения измерений, а также результаты, полученные на основании отчетов РТВ [7–9] и данных измерений.

В каждом измерении детектор (№ 1 и № 2) испытуемого прибора размещался в воздухе, так что в точке измерения находилась его передняя стенка (торцевая часть). Расстояние между точкой измерения и реактивным слоем мишени для образования нейтронов составляло 200 см.

В измерениях медленных нейтронов с энергией 24 кэВ нейтроны падали перпендикулярно направлению оси цилиндрического детектора № 3. Детектор размещался таким образом, чтобы точ-

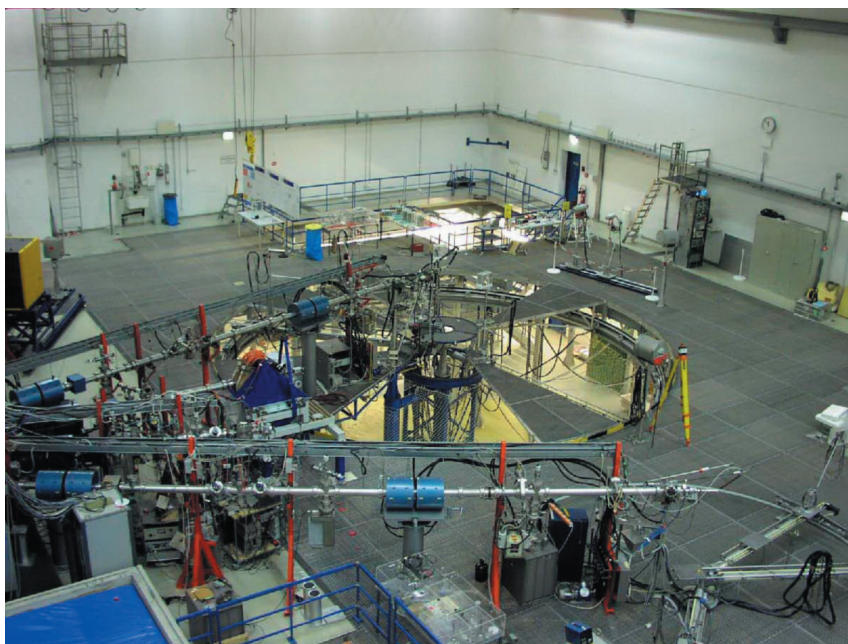
**Рис. 2.** Экспериментальный зал ускорительной установки РТВ.



Рис. 3. Проведение измерения фонового нейтронного излучения.

ка измерений находилась на поверхности детектора в 6 см от передней стенки (торцевой части), которая являлась эффективным центром детектора медленных нейтронов.

Облучение детекторов испытываемого устройства при энергиях нейтронов более 100 кэВ осуществлялось под углом 0° относительно направления ионного пучка, а при более низких энергиях нейтронов (с энергией 24 кэВ) – под углом более 0° (см. табл. 1).

Для определения количества нейтронов, рассеянных в воздухе или в элементах конструкций помещения (ВГ), проводились отдельные облучения с использованием теневого конуса, размещаемого между мишенью и детектором спектрометра-дозиметра (рис. 3). При этом детектор располагался в пределах затененной области. Для некоторых нейтронных полей облучения с тенью конусом не выполнялись ввиду малого числа рассеянных нейтронов.

Таблица 2. Результаты измерений тока пучка заряженных частиц (результаты РТВ)

E , МэВ	Обозначение детектора	MS	t , с	dI/dt , %/(60 · с)	$I_{\text{кон}} - I_{\text{нач}}$, %
1.2	Детектор 1 ВГ	9	351.48	-0.73	$-0.29 \cdot 10^1$
2.5	Детектор 1 ВГ	6	477.01	0.73	$0.44 \cdot 10^1$
14.8	Детектор 1	6	1474.01	-0.346	-7.62
14.8	Детектор 1 ВГ	7	1149.04	-0.402	-6.84

В качестве мишени при энергиях облучения 5 и 8 МэВ использовался газообразный дейтерий. Для учета вклада в суммарный отклик детектора нейтронов, образующихся при взаимодействии ядер дейтерия с материалом входного окна (молибденовая фольга) и *золотым поглотителем пучка*, проводились отдельные облучения с мишенями без газа.

При энергии 19 МэВ поле содержит ионы, возникающие при взаимодействии пучка ядер дейтерия с материалом титана тритиевой мишени (Ti(T)). Для устранения влияния данных нейтронов проводилось отдельное облучение с мишенью из титана той же толщины, но без трития. Помимо этого, такое поле содержит монохроматические нейтроны, образующиеся в результате реакции $D(d, n)^3\text{He}$ с дейтерием, присутствующим в тритии из-за его неидеальной чистоты. Средняя энергия данных нейтронов 5.81 МэВ, а их плотность потока составляет до 3.6% от плотности потока моноэнергетических нейтронов с энергией 19 МэВ, образующихся в результате реакции $T(d, n)^4\text{He}$.

ПРОЦЕДУРА ИЗМЕРЕНИЙ

Все измерения выполнялись в режиме online, при этом экспериментаторы, управляющие спектрометром-дозиметром, находились в России (Москва), а сам спектрометр-дозиметр – в РТВ, Германия (Braunschweig).

Измерения выполнялись по следующей процедуре.

Таблица 3. Результаты измерений при проведении облучений (результаты РТВ)

E , кэВ	Обозначение детектора	MS	d , см	t , с	Q , мКл	Φ_{dir} , 10^5 см^{-2}	Φ_{dir}/t , $\text{см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$
24	Детектор 1	5	200	946.58	3.4677	0.194	$2.04 \cdot 10^1$
	Детектор 3	6	200	1048.24	3.7927	0.213	$2.03 \cdot 10^1$
	Детектор 3 BG	7	200	1042.45	3.7634		
	Детектор 3 сбоку	8	200	1060.67	3.8261	0.216	$2.03 \cdot 10^1$
144	Детектор 1	5	200	2594.41	3.1252	1.78	$6.86 \cdot 10^1$
	Детектор 1 BG	6	200	330.22	0.4060		
250	Детектор 1	5	200	1332.43	4.0737	1.07	$8.1 \cdot 10^1$
	Детектор 1 BG	6	200	636.34	1.9370		
565	Детектор 1	5	200	820.16	2.5368	3.36	$4.10 \cdot 10^2$
	Детектор 1 BG	6	200	533.06	1.6331		
	Детектор 2	7	200	427.58	1.2944	1.73	$4.03 \cdot 10^2$
1200	Детектор 1	8	200	805.23	2.6548	3.38	$4.20 \cdot 10^2$
	Детектор 1 BG	9	200	351.48	1.1528		
	Детектор 2	5	200	1344.92	4.4242	5.64	$4.19 \cdot 10^2$
	Детектор 2 BG	6	200	387.08	1.2816		
2500	Детектор 1	5	200	884.55	1.4015	7.44	$8.4 \cdot 10^2$
	Детектор 1 BG	6	200	477.01	0.7703		
5000	Детектор 1	5	200	1318.68	1.9531	13.5	$1.02 \cdot 10^3$
	Детектор 1 BG	6	200	371.03	0.5534		
	Детектор 1 без газа	7	200	504.82	0.7652		
8000	Детектор 1	7	200	1024.11	0.5913	14.8	$1.43 \cdot 10^3$
	Детектор 1 BG	8	200	604.38	0.3463		
	Детектор 1 без газа	9	200	407.27	0.2322		
14800	Детектор 1	6	200	1474.01	4.9269	10.8	$7.3 \cdot 10^2$
	Детектор 1 BG	7	200	1149.04	3.4659		
19000	Детектор 1	5	200	2603.84	7.6217	5.39	$2.07 \cdot 10^2$
	Детектор 1 BG	6	200	623.00	1.8102		
	Детектор 1 пустой	7	200	602.60	1.7428		

1. Оператор источника нейтронов (специалист РТВ) устанавливал детектор спектрометра-дозиметра на необходимое расстояние от мишени ускорителя и включал спектрометр-дозиметр, устанавливая связь между ним и компьютером оператора спектрометра-дозиметра в Москве (специалист ООО "Центра АЦП").

2. Оператор источника нейтронов (специалист РТВ) запускал пучок и информировал об этом оператора спектрометра-дозиметра (специалист ООО "Центр АЦП") по конференц-связи.

3. Оператор спектрометра-дозиметра выполнял измерения с помощью установленного детектора. По завершении измерений он сообщал об этом оператору источника нейтронов.

4. Оператор источника нейтронов отключал пучок.

5. Все измеренные значения ставились в соответствие времени от включения пучка до его отключения. Длительность фактического интервала измерений не сообщалась. Таким образом, средняя величина плотности потока в течение периода, когда пучок был включен, и периода измерений могли различаться.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Результаты измерений специалистами РТВ приведены в табл. 2, 3. Их надежность многократно подтверждена результатами международных сличений (CCRI(II)-K10, CCRI(III)-K11 [10, 11]). В таблицах приведены обозначения для иденти-

Плотность потока, нейтронов/(см² · с · МэВ)

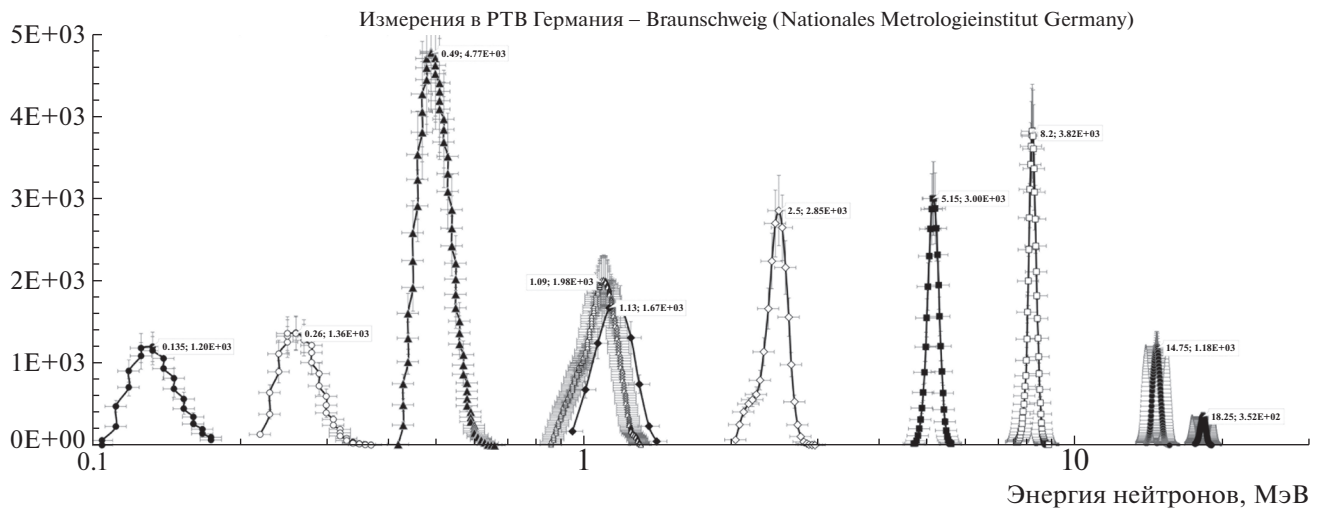


Рис. 4. Энергетические распределения плотности потока быстрых нейтронов, измеренные спектрометром-дозиметром SDMF-1608SN.

фикации облучения по номеру детектора спектрометра-дозиметра, а также по номеру запуска облучения MS. Для устранения влияния нейтронов, рассеянных в воздухе или испускаемых конструкциями помещения, посредством теневого конуса, расположенного между детектором и мишенью, в данных таблицах приведен заряд пучка Q , т.е. интеграл тока пучка по времени. Аналогично может быть устранено влияние нейтронов, испускаемых мишенью ускорителя, без учета рассеяния в газе.

Величина t соответствует времени измерения, а d — расстоянию между мишенью и точкой расположения детектора. Плотность потока прямых нейтронов Φ_{dir} приведена для точки, расположенной на расстоянии d от мишени, производящей нейтроны. Стандартная погрешность u_d измерений расстояния d составляет 0.2 см. Данные измерений времени t и заряда Q носят информационный характер.

Мониторинг тока пучка I для всех полей, за исключением поля нейтронов с энергией 24 кэВ,

Таблица 4. Сравнение параметров источника (измерения РТВ) и данных измерений спектрометром-диметром SDMF-1608SN

Источник		Измерение		Источник	Измерение	
E , МэВ	ΔE_n , МэВ	E , МэВ	ΔE_n , МэВ	Φ , см ⁻² · с ⁻¹	Φ , см ⁻² · с ⁻¹	$\Delta \Phi_n$, см ⁻² · с ⁻¹
0.024	0.008	0.024	—	20.3	18	2.7
0.144	0.011	0.133	0.00665	68.6	63.7	3.185
0.25	0.009	0.26	0.013	81.4	86.4	4.32
0.565	0.008	0.49	0.0245	410	450	22.5
1.2*	0.073	1.1	0.055	419	428	21.4
1.2**	0.073	1.16	0.058	420	447	22.35
2.5	0.103	2.5	0.125	840	888	44.4
5	0.124	5.16	0.258	1020	1030	51.5
8	0.1	8.2	0.41	1430	1430	71.5
14.8	0.435	14.7	0.735	730	741	37.05
19	0.25	18.2	0.91	203	206	10.3

*детектор № 1

**детектор № 2

Примечание. E — энергия нейтронов; ΔE_n — абсолютная погрешность; Φ — измеренная плотность потока нейтронов; $\Delta \Phi_n$ — абсолютная погрешность измерения плотности потока нейтронов.

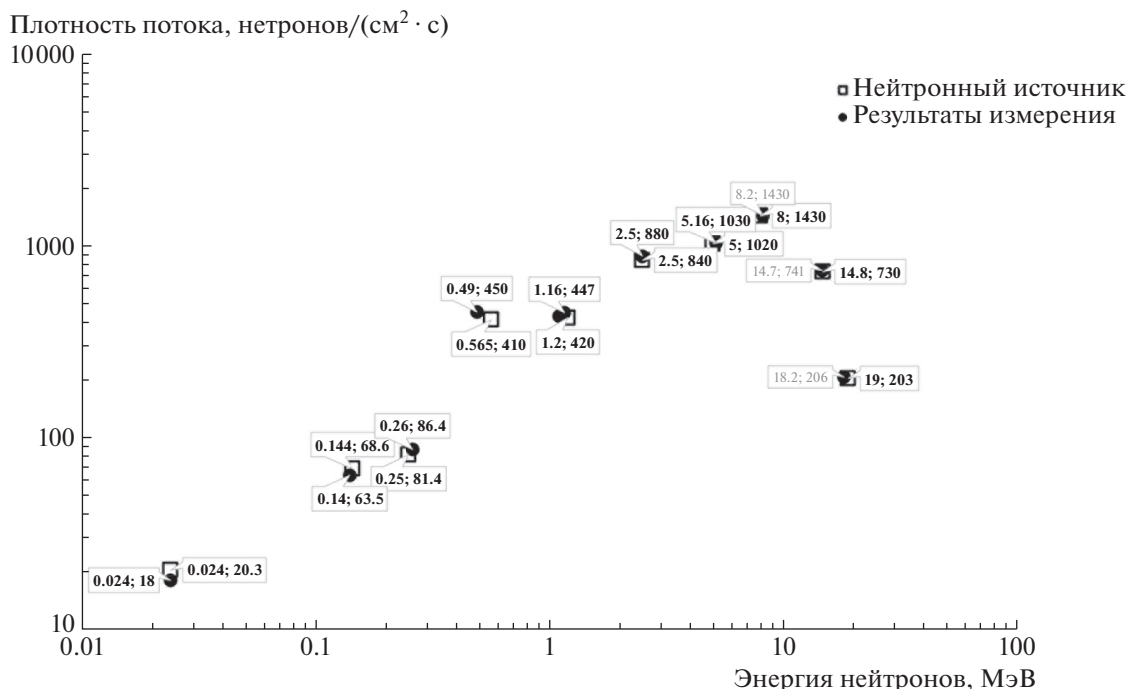


Рис. 5. Сравнение плотности потока источника (измерения РТВ) с данными измерений спектрометром-дозиметром SDMF-1608SN.

выполнялся путем регистрации заряда Q с интервалом в 1 мин. Относительное среднее квадратичное отклонение для этих измерений тока в большинстве случаев составило менее 1.5%. В отдельных случаях наблюдалось линейное отклонение величины I . Соответствующие результаты измерений и наблюдавшиеся отклонения относительно среднего тока для каждого измерения приведены в табл. 2 для обеспечения возможности коррекции и вычисления погрешностей.

На рис. 4 приведены данные измерений энергетической зависимости плотности потока быстрых нейтронов, а в табл. 4 и на рис. 5 — плотность потока источника (измерения РТВ) в сравнении с соответствующими измерениями спектрометром-дозиметром. При энергии нейтронов 1.2 МэВ была выполнена смена детекторов нейтронов (детектор № 1 на детектор № 2). Данные измерений и сличение их с параметрами источника показывают высокую точность проведенных измерений, а также подтверждают способность спектрометра-дозиметра измерять энергетические зависимости абсолютной плотности потока нейтронов в широком энергетическом диапазоне.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Моисеев Н.Н., Дидык А.В. // Журнал АНРИ. 2016. № 4. С. 24.
2. Руднев П., Моисеев Н., Дидык А. // Электроника НТБ. 2016. № 8. С. 78.
3. Колеватов Ю.И., Семенов В.П., Трыков Л.А. Спектрометрия нейтронов и гамма-излучения в радиационной физике. М.: Энергоатомиздат, 1991.
4. Кожевников А.Н., Мадеев В.Г. // Сборник тезисов докладов 10-й юбилейной научной конференции “Радиационная защита и радиационная безопасность в ядерных технологиях”. Обнинск, 2015. С. 297–298.
5. Brede H.J., Cosack M., Dietze G., Gumpert H., Guldbakke S., Jahr R., Kutscha M., Schlegel-Bickmann D., Scholermann H. // Nucl. Instrum. and Methods. 1980. V. 169. P. 349. [https://doi.org/10.1016/0029-554x\(80\)90928-3](https://doi.org/10.1016/0029-554x(80)90928-3)
6. Lesiecki H., Cosack M., Scholermann H. // РТВ-Mitteilungen. 1988. V. 97. P. 373.
7. Test Report РТВ-6.4-2021/14N. Braunschweig, 2021.
8. Nolte R., Röttger S. РТВ report РТВ-N-58. Braunschweig, 2018.
9. Schlegel D. РТВ laboratory report РТВ-6.42-05-2. Braunschweig, 2005.
10. Chen J., Wang Z., Rong C., Lövestam G., Plompen A., Puglisi N., Gilliam D.M., Eisenhauer C.M., Nico J.S., Dewey M.S., Kudo K., Uritani A., Harano H., Takeda N., Thomas D.J. et al. // Metrologia. 2007. V. 44. Tech. Suppl. 06005. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/44/1A/06005>
11. Gressier V., Bonaldi A.C., Dewey M.S., Gilliam D.M., Harano H., Masuda A., Matsumoto T., Moiseev N., Nico J.S., Nolte R., Oberstedt S., Roberts N.J., Röttger S., Thomas D.J. // Metrologia. 2014. V. 51. № 1A. Tech. Suppl. 06009. <https://doi.org/10.1088/0026-1394/51/1A/06009>