

Научная статья

УДК 53.089

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-41-49

Измерения параметров поля нейтронов мониторами на основе газонаполненных пропорциональных счетчиков*

**Игорь Леонидович Ажгирей¹, Игорь Сергеевич Байшев²
Владимир Александрович Пикалов³, Олег Валентинович Суманеев⁴**

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логанова

НИЦ «Курчатовский институт»

Протвино, Россия

¹Igor.Azhgirey@ihep.ru

²Igor.Baishev@ihep.ru

³Vladimir.Pikalov@ihep.ru

⁴Oleg.Sumaneev@ihep.ru

Аннотация

Нейтронные мониторы на основе газонаполненных пропорциональных счетчиков и первые результаты измерений были показаны на RuPAC-2018 и RuPAC-2021. Предполагается использовать эти детекторы для мониторинга стабильности условий проведения сеансов радиационной терапии. Здесь представлены процедура калибровки мониторов на источнике нейтронов AmBe и новые экспериментальные данные. Мониторы были использованы для измерения флюенса нейтронов за защитой экспериментальной установки «Центр коллективного пользования – радиобиологический стенд на углеродном пучке У-70» с энергией пучка ионов 450 МэВ/нуклон. Измерения сопровождались расчетным моделированием с использованием пакета программ CERN FLUKA. Показано хорошее согласие между результатами измерений и расчетов. Даже одиночный монитор со свинцовой вставкой, откалиброванный на AmBe-источнике, позволяет получать хорошие результаты в реальном нейтронном поле. Продemonстрирована возможность оценки флюенса нейтронов с энергией выше 10 МэВ по показаниям пары мониторов. Для улучшения качества измерений необходимо принимать во внимание разницу между условиями калибровки и измерений.

Ключевые слова

измерения поля нейтронов, газонаполненные пропорциональные счетчики, моделирование радиационного поля

Для цитирования

Ажгирей И. Л., Байшев И. С., Пикалов В. А., Суманеев О. В. Измерения параметров поля нейтронов мониторами на основе газонаполненных пропорциональных счетчиков // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 2. С. 41–49. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-41-49

* Статья подготовлена по материалам конференции Russian Particle Accelerator Conference (RuPAC'23), Budker INP, 11–15 September 2023.

Measurements of the Neutron Field Parameters with Monitors based on the Gas-Filled Proportional Counters

Igor L. Azhgirey¹, Igor S. Bayshev²
Vladimir A. Pikalov³, Oleg V. Sumaneev⁴

Institute for High Energy Physics named after A. A. Logunov
of National Research Center “Kurchatov Institute”
Protvino, Russian Federation

¹Igor.Azhgirey@ihep.ru

²Igor.Baishev@ihep.ru

³Vladimir.Pikalov@ihep.ru

⁴Oleg.Sumaneev@ihep.ru

Abstract

Neutron monitors with the gas filled proportional counters inside and first data were presented at RuPAC-2018 and RuPAC-2021 conferences. It is planned to use such devices to monitor the stability of irradiation conditions during radiation therapy sessions. We present here the calibration procedure for these monitors at AmBe neutron source, and the new data. These monitors have been used to measure the neutron fluence behind the shielding of the 450 MeV/nucleon carbon beam based experimental facility “Shared use Center – radiobiological stand with the carbon beam of the U-70 accelerator at IHEP”. The measurements were supported by the set of extensive simulations using the CERN FLUKA code. Good agreement between the FLUKA simulations and measurements was shown. Even single monitor with lead insertion calibrated at AmBe neutron source allows to have a good result in the real neutron field. The possibility to estimate the fluence of the high energy neutrons with the energy above 10 MeV using data from the pair of monitors was demonstrated. To improve the quality of the measurements one needs to take into account difference between calibration and measurements conditions.

Keywords

neutron field measurements, gas-filled proportional chambers, radiation field simulations

For citation

Azhgirey I. L., Bayshev I. S., Pikalov V. A., Sumaneev O. V. Measurements of the neutron field parameters with monitors based on the gas-filled proportional counters. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 2, pp. 41–49 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-2-41-49

Введение

Нейтронные мониторы на основе GFPC разработаны для измерения флюенса нейтронов на ускорителях. Полученные данные используются для мониторинга радиационных нагрузок на электронику и для проверки эффективности радиационной защиты, а также для бенчмаркинга вычислительных моделей сложных экспериментов [1]. Второе поколение мониторов (GFPC2), предназначенное для работы в полях со значительной фракцией быстрых (с энергией выше 100 кэВ) нейтронов, описано в работах [1; 2]. Чувствительность к различным областям нейтронного спектра определяется структурой материалов, окружающих счетчик. Главная цель нейтронного мониторинга – определение интенсивности жесткой части нейтронного спектра.

Модератор, поглотитель и радиатор для пары мониторов GFPC2 подобраны таким образом, чтобы мониторы имели схожую функцию чувствительности для части нейтронного спектра ниже 100 кэВ, и максимально различную – выше 100 кэВ. Таким образом, пара может работать как простейший 2-групповой спектрометр нейтронов. Монитор, чувствительный к быстрым нейтронам, обозначен как монитор типа А, вспомогательный монитор, используемый для вычитания мягкой части спектра – как монитор В. Мониторы предыдущего поколения, предназначенные для регистрации мягких нейтронов, используются в эксперименте Compact Muon Solenoid (CMS) на Большом адронном коллайдере [3; 4].

Мониторы могут работать без обслуживания длительный период времени. Доступ к ним осуществляется через одиночный коаксиальный кабель, используемый для питания и переда-

чи данных. Мониторы радиационно стойки и не подвергаются воздействию магнитного поля. Результаты предыдущих исследований отклика мониторов приведены в работе [5].

Цель данной работы – продолжение тестирования пары нейтронных мониторов GFPC2 в нейтронном поле на ускорителе заряженных частиц. Проведены измерения флюенса нейтронов с энергией выше 100 кэВ за защитой поглотителя пучка зоны РБС У-70 [6]. Перед измерениями была проведена калибровка мониторов на нейтронном источнике AmBe.

Измерения сопровождались полномасштабным моделированием с использованием программы CERN FLUKA [7; 8].

1. Калибровка мониторов

Отклик каждого монитора индивидуален и зависит от типа монитора, характеристик используемого счетчика (толщина слоя бора, эффективность сбора заряда) и настройки порогов внутренней электроники.

Цель калибровки – определение калибровочных коэффициентов k_R и k_{AmBe} :

$$k_R = \frac{R}{N},$$

где R – расчетный отклик идеального монитора в калибровочном поле, N – счет реального детектора;

$$k_{AmBe} = \frac{\Phi}{N},$$

где Φ – расчетный флюенс нейтронов в месте положения детектора.

Калибровка выполнена на источнике нейтронов AmBe в открытой геометрии. Спектр источника приведен на рис. 1.

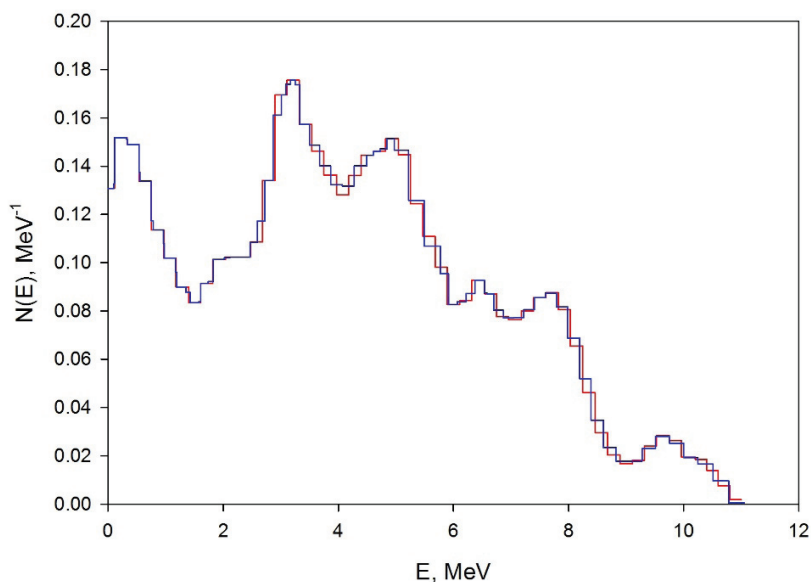


Рис. 1. Спектр источника AmBe. Красная линия – данные ISO 8529 [9], синяя – то же в энергетическом представлении программы CERN FLUKA
Fig. 1. Energy spectrum of AmBe neutron source. Red histogram – ISO 8529 data [9], blue one – the same in the energy binning of the CERN FLUKA code

Расчетный отклик R определялся как число ионов ^4He и ^7Li , попадающих в рабочий объем счетчика. Отклик мониторов R и флюенс нейтронов Φ рассчитаны по программе CERN FLUKA.

Результаты расчетов R , Φ и измерений N на различном расстоянии от калибровочного источника приведены в табл. 1 для обоих типов мониторов.

Статистическая погрешность расчетов – порядка 0,1 %, измерений – около 1 %. Расчетная оценка погрешности, вносимой рассеянием на оборудовании (крепление источника, подставка под мониторы) – порядка 1 %.

Необходимо учесть вклад фона (рассеянного излучения) в измерения при калибровке мониторов. Учитывая, что основные источники фона (пол, стены и т. д.) расположены на достаточном расстоянии от точек измерений (не менее 6 м), предполагаем, что вклад фона в счет мониторов не зависит от расстояния L от источника до детектора. Тогда суммарный счет N можно представить как:

$$N(L) = N_0(L) + N_b,$$

где $N_0(L)$ – «истинный» счет на расстоянии L , а N_b – фон. В то же время

$$N_0(L) = \frac{R(L)}{k_R} = \frac{\Phi(L)}{k_{AmBe}}.$$

K_R , K_{AmBe} определяются методом наименьших квадратов.

Таблица 1

Результаты расчетов величин отклика R , флюенса Φ и измерений счета N для мониторов типа А и В (на 10^6 нейтронов источника).

L – расстояние от источника до монитора

Table 1

Results for simulated values of the response R , fluence Φ , and experimental values of the count rate N for A and B type monitors (for 10^6 source neutrons).

L is the distance from the source to the monitor

L , м	R_A , ионов/ 10^6 нейтронов источника	N_A , имп./ 10^6 нейтронов источника	R_B , ионов/ 10^6 нейтронов источника	N_B , имп./ 10^6 нейтронов источника	Φ , нейтронов/ $10^6 \times \text{см}^2$
1,0	9,907	6,826	3,126	2,206	7,994
1,5	4,385	3,201	1,385	1,011	3,531
2,0	2,453	1,909	0,7753	0,591	1,987

В результате калибровки получены следующие калибровочные коэффициенты:

$$k_R^A = 1,52 \pm 0,03$$

$$k_{AmBe}^A = 1,23 \pm 0,03$$

$$k_R^B = 1,46 \pm 0,04$$

$$k_{AmBe}^B = 3,73 \pm 0,06$$

2. Измерения

Измерения выполнены в осеннем сеансе 2022 г. за защитой поглотителя зоны РБС ускорителя У-70 ИФВЭ.

Выбор места измерений определялся следующими факторами.

1. Комфортные загрузки детекторов (20 – 100 Гц) позволяют получить приемлемую статистику, и в то же время далеки от предельных, поэтому нет необходимости вводить поправку на мертвое время [5].

2. Тепловые и промежуточные нейтроны, образующиеся и накапливающиеся в зоне РБС, эффективно ослабляются биологической защитой, что позволяет улучшить фоновые условия измерений и значительно повысить достоверность расчетов.

В ходе измерений пучок ионов углерода с номинальной энергией 400 МэВ/нуклон выводился через входной коллиматор зоны РБС на заполненный водой фантом (рис. 2). В качестве фантома использовался заполненный водой прямоугольный резервуар с внутренним размером $33 \times 35 \times 53$ см, со стенками из поликарбоната. Толщина боковых стенок и дна – 1,5 см, передней и задней стенок – 3 см. Уровень воды в резервуаре – 30 см. Фантом располагался параллельно оси пучка. Центр фантома находился на оси пучка, на расстоянии 380 см от начала входного коллиматора.

Интенсивность пучка определялась по показаниям плоскопараллельной воздушной ионизационной камеры с зазором 3 мм и размерами 200×200 мм. Энергия пучка на входе в зону, определенная по результатам измерения распределения профиля энергосвечения в водном фантоме – 378 МэВ/нуклон. Пучок выводился в импульсном режиме, время импульса – 900 мс, время цикла между импульсами – 8 с. Длительность измерений – 286 циклов.



Рис. 2. Расположение оборудования и защиты зоны РБС.

Пучок приходит с юго-восточного направления на фантом, расположенный в центре зоны

Fig. 2. Layout of the radiobiological stand hardware and shielding.

Beam is coming from south-east direction on to the phantom, placed in the center of the stand region

Раскрытие коллиматора 150×150 мм обеспечивало беспрепятственное пропускание пучка ионов на фантом. Средний радиус пучка на фантоме – около 40 мм.

Пара мониторов располагалась за бетонной защитой, окружающей стальной поглотитель пучка, расположенный в северо-западной зоне РБС. Центры мониторов располагались симме-

трично на расстоянии 15 см относительно оси пучка ионов, расстояние от поверхности защиты – 27 см, высота на 4 см ниже уровня пучка.

Результаты измерений величины N приведены в табл. 3. Статистическая погрешность измерений для монитора А – 0,6 %, монитора В – 1,3 %.

3. Расчеты

Расчет отклика мониторов R и флюенса нейтронов Φ в условиях измерений выполнен по программе CERN FLUKA [7; 8], версия 4.3-1. Транспорт нейтронов ниже 20 МэВ описан в многогрупповом приближении. Расчетные спектры нейтронов в местах расположения мониторов А и В показаны на рис. 3.

Ввиду сложности набора достаточной статистики для определения отклика мониторов расчет проводился в два этапа – сначала рассчитывался промежуточный источник на цилиндрических поверхностях, окружающих мониторы, затем рассчитывался отклик мониторов от данного источника для разных пороговых энергий нейтронов (см. табл. 2).

Таблица 2

Результаты расчетов флюенса Φ и откликов мониторов R (на 10^9 ионов)

Table 2

Simulated results for the fluence Φ and response R values (for 10^9 of ions)

Область энергий спектра нейтронов	Φ^A , нейтронов/ $109 \times \text{см}^2$	R^A , ионов/ 10^9 нейтронов источника	Φ^B , нейтронов/ $10^9 \times \text{см}^2$	R^B , ионов/ 10^9 нейтронов источника
$E_n < 0,2$ эВ	24,7	0,077	23,8	0,096
$E_n < 100$ кэВ	44,8	4,21	43,8	2,93
$E_n < 10$ МэВ	78,3	43,1	54,4	23,1
Весь спектр	157,7	125,8	155,5	23,2

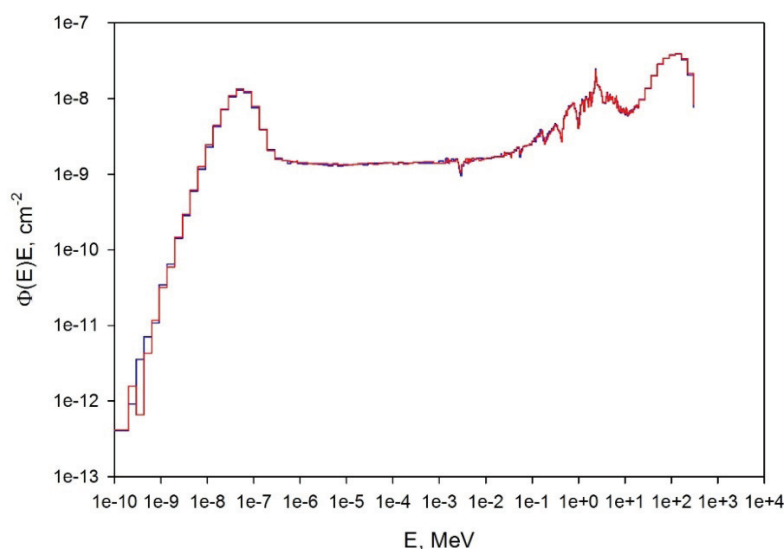


Рис. 3. Расчетные спектры нейтронов в местах расположения мониторов (красная линия – позиция монитора А, синяя – монитора В)

Fig. 3. Simulated neutron spectra at the positions of monitors (red line – at monitor A position, blue line – at monitor B)

Некоторое различие в расчетных значениях флюенса нейтронов обусловлено конфигурацией защиты, в частности смещением стального керна и колодца поглотителя относительно оси пучка (около 3 см в сторону монитора В) – см. рис. 2.

4. Анализ результатов

В табл. 3 приведены сравнения основных результатов измерений и расчетов. Представлены измеренный счет N , произведение счета N на калибровочный коэффициент k_R т. е. восстановленный отклик монитора), расчетный отклик R и произведение счета N на калибровочный коэффициент k_{AmBe} (т. е. восстановленный флюенс нейтронов), а также расчетные величины флюенса нейтронов Φ с энергиями выше 0,2 эВ и 100 кэВ.

Расчетный вклад тепловых нейтронов в показания мониторов пренебрежимо мал, менее 0,5 % для монитора В и менее 0,1 % для монитора А. Расчетный вклад нейтронов с энергией меньше 100 кэВ в показания монитора А, используемого как основной при определении флюенса нейтронов с энергией выше 100 кэВ, составляет 3,3 %.

Таблица 3

Сравнение результатов расчетов и измерений

Table 3

Comparison of the measured and simulated values

Величина	А	В	А/В
Счет $N \times 10^{-9}$	73,0	18,9	3,86
$N \times K_R \times 10^{-9}$	110,8	27,5	4,03
$R \times 10^{-9}$	125,8	23,2	5,42
$N \times K_{AmBe} \times 10^{-9}/\text{см}^2$	89,7	70,5	
$\Phi_{E>0.2\text{эВ}} \times 10^{-9}/\text{см}^2$	133,0	131,7	
$\Phi_{E>100\text{кэВ}} \times 10^{-9} / \text{см}^2$	112,9	111,7	

Отношение расчетного отклика монитора А к флюенсу нейтронов (за вычетом тепловых) несколько ниже, чем при калибровке, – 0,94 против 1,23, что объясняется разными условиями облучения (угловым распределением нейтронов и энергетическим спектром источника).

Измеренный флюенс нейтронов с энергией более 100 кэВ (по показания монитора А) совпадает с расчетным в пределах 20 %, расчетный отклик мониторов совпадает с измеренным для монитора А в пределах 12 %, для монитора В – в пределах 16 %.

Расчетное отношение откликов мониторов заметно больше измеренных. Можно предположить, что программа моделирования завышает выход вторичных нейтронов с энергией выше 10 МэВ при взаимодействии ядра углерода с энергией порядка 300–400 МэВ/нуклон с веществом, или калибровка ионизационной камеры, примененной в качестве монитора интенсивности пучка, завышает количество ионов углерода, выводимых на фантом. Используя показания двух мониторов, можно провести коррекцию флюенса нейтронов в этом диапазоне энергий:

$$R_{E>10\text{MeV}}^A = R^A - R_{E<10\text{MeV}}^A,$$

или, с учетом того, что $R_{E<10\text{MeV}}^B$ практически совпадает с R^B ,

$$R_{E>10\text{MeV}}^A = R^A - y \times R^B,$$

где

$$y = \frac{R_{E < 10 \text{ MeV}}^A}{R_{E < 10 \text{ MeV}}^B} = 1,87.$$

Заменяя расчетный отклик на измеренный, получим:

$$R_{E > 10 \text{ MeV}}^A = N^A \times k_R^A - 1,87 \times N^B \times k_R^B = 59,4$$

против расчетного 79,3.

С учетом отношения расчетного отклика монитора А для нейтронов с энергией выше 10 МэВ к соответствующему флюенсу, равному 1,04, скорректированный флюенс нейтронов с энергией выше 100 кэВ составит $92,8 \times 10^{-9} \text{ см}^{-2}$.

Выводы

Продemonстрировано хорошее согласие между измерениями и расчетами. Показана возможность оценки флюенса нейтронов с энергией более 10 МэВ по показаниям двух мониторов. Даже единственный монитор типа А с калибровкой на источнике AmBe позволяет получать вполне достоверные результаты в реальных нейтронных полях. Для повышения точности результатов необходимо учитывать различия между условиями облучения и калибровки.

Список литературы / References

1. **Dabrowski A., Stickland D., Auzinger G., Pasztor G., Lujan P. et al. (CMS Collaboration).** The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation Instrumentation and Luminosity detectors. CERN, Geneva, CERN-LHCC-2021-008, CMS-TDR-023, 2021.
2. **Azhgirey I. L., Bayshev I. S., Kurochkin I. A., Pikalov V. A., Sumaneev O. V., Lukanin V. S.** Neutron monitors for high energy accelerators. In: *Proceedings of 26th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2018*, Ptovino, Russia, 2018, p. 225, DOI:10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUP-SA38
3. **Gribushin A. M. et al.** A Neutron Field Monitoring System for Collider Experiments. *Instruments and Experimental Techniques*, 2017, Vol. 60, No. 2, pp. 167–174. DOI: 10.1134/S0020441217020051
4. **The CMS Collaboration.** The Phase-2 Upgrade of the CMS Beam Radiation, Instrumentation, and Luminosity Detectors: Conceptual Design. CERN, Geneva, CMS NOTE-2019/008
5. **Sumaneev O. V., Azhgirey I. L., Baishev I. S., Pikalov V. A.** Neutron field Measurements by GFPC based monitors at the Carbon beam at IHEP U-70 proton synchrotron. In: *Proceedings of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021*, Alushta, Russia, p. 129, 2021. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRC01
6. **Antipov Yu. M., Britvich G. I., Ivanov S. V. et al.** Formation of a transversely flat dose field and the first radiobiological experiments on a carbon beam extracted from the U-70. *Instruments and experimental techniques*, 2015, No. 4, pp. 107–116. (in Russ.)
7. **Ahdida C. et al.** New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Frontiers in Physics*, 2022, No. 9, p. 788253.
8. **Battistoni G. et al.** Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, No. 82, pp. 1018.
9. **INTERNATIONAL STANDARD ISO 8529-1.** Neutron reference radiations fields – Part 1: Characteristics and methods of production (ISO 8529-1:2021, IDT).

Сведения об авторах

Ажгирей Игорь Леонидович, кандидат физико-математических наук, начальник лаборатории

Байшев Игорь Сергеевич, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник

Пикалов Владимир Александрович, начальник лаборатории

Суманеев Олег Валентинович, научный сотрудник

Information about the Authors

Igor L. Azhgirey, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Head of the Laboratory

Igor S. Bayshev, Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher

Vladimir A. Pikalov, Head of the Laboratory

Oleg V. Sumaneev, Researcher

*Статья поступила в редакцию 28.12.2023; одобрена после рецензирования 12.01.2024;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 28.12.2023; approved after reviewing 12.01.2024;
accepted for publication 05.03.2024*