

Научная статья

УДК 614.876

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-38-47

Верификация расчетов защиты медицинской кабины ионно-лучевой терапии канала 26А проекта ЛУЧ У-70*

**Владимир Александрович Пикалов¹, Олег Валентинович Суманеев²
Михаил Михайлович Сухарев³**

Институт физики высоких энергий им. А. А. Логунова
НИЦ «Курчатовский институт»,
Протвино, Россия

¹Vladimir.Pikalov@ihep.ru

²Oleg.Sumaneev@ihep.ru

³Mikhail.Sukharev@ihep.ru

Аннотация

В настоящее время опыт проектирования установок на выведенных пучках ионов углерода в России (мире) очень ограничен. Медицинская кабина ионно-лучевой терапии канала 26А проекта ЛУЧ У-70 предоставляет уникальную возможность для оценки эффективности биологической защиты и верификации расчетов. В статье представлены данные экспериментальных измерений нейтронного излучения за биологической защитой медицинской кабины. Данные получены для двух энергий выведенного пучка ускоренных ядер углерода – 400 и 450 МэВ/нуклон. Результат сравнивается с расчетом, выполненным по программе FLUKA для данной конфигурации защиты. Показано хорошее соответствие экспериментальных данных и расчета.

Ключевые слова

биологическая защита, ионы углерода, FLUKA, нейтроны

Для цитирования

Пикалов В. А., Суманеев О. В., Сухарев М. М. Верификация расчетов защиты медицинской кабины ионно-лучевой терапии канала 26А проекта ЛУЧ У-70 И // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 38–47.
DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-38-47

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

© Пикалов В. А., Суманеев О. В., Сухарев М. М., 2024

Verification of Calculation for the Protection of the Medical Cabin for Ion Therapy of Channel 26A of the Luch U-70 Project

Vladimir A. Pikalov¹, Oleg V. Sumaneev²

Mikhail M. Sukharev³

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

¹Vladimir.Pikalov@ihep.ru

²Oleg.Sumaneev@ihep.ru

³Mikhail.Sukharev@ihep.ru

Abstract

Currently, the experience in designing installations using extracted carbon ion beams in Russia (the world) is very limited. The medical cabin for ion therapy of channel 26A of the LUCH U-70 project provides a unique opportunity for assessing the effectiveness of biological protection and verifying calculations. The paper presents data from experimental measurements of neutron radiation behind the biological protection of a medical cabin. The data were obtained for two energies of the extracted beam of accelerated carbon nuclei – 400 and 450 MeV/nucleon. The result is compared with the calculation performed using the FLUKA program for a given protection configuration. Good agreement between experimental data and calculations is shown.

Keywords

radiation shielding, carbon ions, FLUKA, neutrons

For citation

Pikalov V. A., Sumaneev O. V., Sukharev M. M. Verification of Calculation for the Protection of the Medical Cabin for Ion Therapy of Channel 26a of the Luch U-70 Project. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 38–47 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-38-47

Введение

В настоящее время в России и мире наблюдается высокий интерес к созданию комплексов ионно-лучевой терапии на основе пучков С12. Только в ИФВЭ в настоящее время существует два проекта подобных комплексов ЛУЧ У-70 и ЛУЧ-ТИП. В то же время опыт проектирования таких комплексов ограничен. Отсутствуют методики расчета биологической защиты, мало экспериментальных данных. Для расчета защиты подобных комплексов обычно используются широко известные программы FLUKA [1; 2], MCNPX, PHITS, GEANT4. Тем не менее результаты расчетов по этим программам часто вызывают сомнения, в частности, из-за частого значительного расхождения друг с другом.

Существующая в ИФВЭ установка РБС [3], которая по проекту будет переоборудована в кабину 26А1 ионно-лучевого комплекса ЛУЧ-70, предоставляет уникальную возможность проведения дозиметрических измерений в условиях, максимально приближенных к реальному облучению пациентов. При этом существующие детальные чертежи защиты и расположения оборудования зоны и возможность осмотра и проведения замеров на месте позволяют создать достоверную расчетную модель. Средства диагностики пучка обеспечивают корректное описание источника ионов углерода.

Цель работы – оценка эффективности биологической защиты зоны РБС и верификация расчетов дозовых полей за биологической защитой по программе FLUKA.

Надеемся, что данные результаты окажут помочь при проектировании установок подобного типа.

1. Цель работы

1. Оценка эффективности биологической защиты установки РБС.
2. Верификация расчетов биологической защиты экспериментальных установок, использующих углеродные пучки, по программе FLUKA.

2. Содержание работ

1. Измерение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ за защитой установки РБС.
2. Расчет амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ и эффективного эквивалента дозы (H_{eff}) по программе FLUKA.

3. Характеристики пучка

Пучок ионов углерода с номинальной энергией (E_0) – 455 и 400 МэВ/нуклон. Раскрытие коллиматора 1 установки РБС – 150 × 150 мм, (алюминиевые вставки убраны) обеспечивало беспрепятственное прохождение пучка в зону РБС. Воблер-магниты выключены.

4. Источник вторичных нейтронов (мишень)

Прямоугольный фантом, внутренние размеры 33 × 35 × 53 см со стенками из поликарбоната, заполненный водой (фантом ИФВЭ). Толщина боковых стенок и основания – 15 мм, передней и задней стенок – 30 мм. Фантом располагался на столе установки РБС.

5. Средства измерений

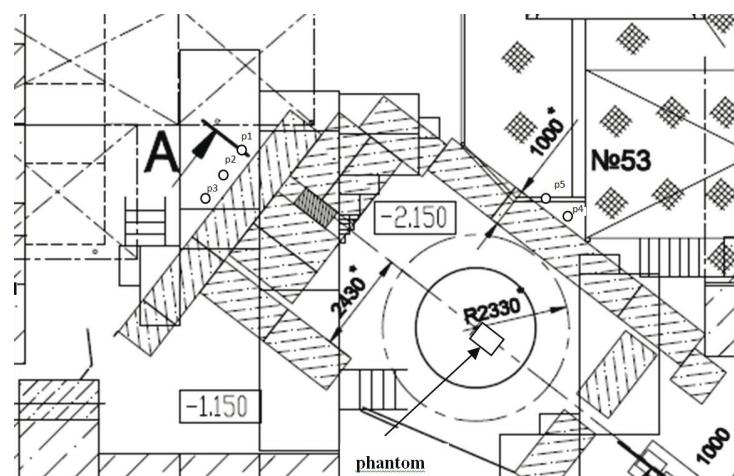
Нейтронный дозиметр – ДКС-96 [4] № Д062, свидетельство о поверке № 03-20/C до 06.09.2021.

Дополнительный контроль источника вторичных нейтронов осуществлялся парой мониторов быстрых нейтронов на основе счетчиков СНМ-14, расположенных в зоне установки РБС, в прямой видимости фантома.

6. Условия измерений

Измерения проводились в пяти точках, расположенных за защитой установки РБС на расстоянии 50 см от защиты на уровне пучка, в двух режимах:

- 1) вывод пучка ионов углерода на фантом (in);
- 2) вывод пучка ионов углерода на поглотитель пучка установки РБС (out).



*Ruc. 1. Расположение точек измерения $H_n(10)$ за защитой зоны РБС
Fig. 1. Location of $H_n(10)$ measurement points behind the protection of the RBS zone*

Координаты точек измерения $H_n(10)$ относительно изоцентра (см):

- 1 – $x = 0, y = 0, z = 798$;
- 2 – $x = 100, y = 0, z = 798$;

- $3 - x = 200, y = 0, z = 798$;
- $4 - x = -393, y = 0, z = 100$;
- $5 - x = -393, y = 0, z = 200$.

Измерения выполнены двумя сериями:

22.04.2021

E_0 – 455 МэВ/нуклон.

Координаты фантома ИФВЭ относительно изоцентра (см):

x, z (центр фантома) – 0, y (верхняя поверхность стола) – при выводе на фантом –20, при выводе на поглотитель –55. Уровень воды – 12.

29.04.2021

E_0 – 400 МэВ/нуклон.

Координаты фантома ИФВЭ относительно изоцентра (см):

x, z (центр фантома) – 0, y (верхняя поверхность стола) – при выводе на фантом –22, при выводе на поглотитель –55. Уровень воды – 14.

7. Расчеты

По программе FLUKA выполнены расчеты $H_n(10)$ и H_{eff} , а также спектров нейтронов в условиях измерений.

Конфигурация защиты и полов зоны РБС заданы в соответствии с чертежом № 9530 «Расположение оборудования установки РБС» и результатами непосредственных измерений в зоне.

Энергия и размер пучка ионов углерода на входе в зону РБС были определены по результатам измерений распределения энерговыделения в водном фантоме.

Радиус пучка, r_0 – 40 мм.

Энергия пучка: при номинальной 455 МэВ/нуклон – 434 МэВ/нуклон, при номинальной 400 МэВ/нуклон – 378 МэВ/нуклон. RUN – файлы с записью интенсивности в каждом цикле вывода при измерениях.

8. Результаты

1. Результаты измерений дозы нейтронов $H_n(10)$ 22.04.2021 г., RUNS 3–15.

22.04.2021 г. для энергии ионов углерода $E_0 = 455$ (434) МэВ/нуклон в геометрии, описанной на рис. 1, были выполнены измерения дозы нейтронов $H_n(10)$. Данные и результаты расчетов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты измерений дозы нейтронов в точках по рис. 1 и результаты расчетов в этих же точках ($E_0 = 455$ (434) МэВ/нуклон)

Table 1

The results of measurements of the neutron dose at the points in Figure 1 and the results of calculations at the same points ($E_0 = 455$ (434) MeV/nucleon)

RUN	point	date, time	$I \times 10^9$, ions	$H_n(10)$ $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$H_n(10)$ $10^{-6} \text{ pSv}/\text{ion}$	FLUKA $10^{-6} \text{ pSv}/\text{ion}$
1	2	3	4	5	6	7
3	1 in	22.04 12:59	7,97	10,5	36,6	55,7
4	2 in	22.04 13:02	7,19	8,08	31,2	45,4
5	3 in	22.04 13:07	8,82	5,50	17,3	26,1
6	4 in	22.04 13:12	9,48	14,0	41,0	56,5
7	5 in	22.04 13:16	9,49	19,1	55,9	81,1

Окончание табл. I

1	2	3	4	5	6	7
9	5 out	22.04 13:30	8,55	1,47	4,77	2,91
10	4 out	22.04 12:33	7,94	1,65	5,77	2,22
13	3 out	22.04 13:47	7,04	2,73	10,7	12,5
14	2 out	22.04 13:50	9,37	6,89	20,6	30,0
15	1 out	22.04 13:54	7,94	8,06	28,2	39,5

2. Результаты измерений дозы нейтронов $H_n(10)$ 29.04.2021 г., RUNS 31–40.

29.04.2021 г. для энергии ионов углерода $E_0 = 400$ (378) МэВ/нуклон в геометрии, описанной на рис. 1, были выполнены измерения дозы нейтронов $H_n(10)$. Данные и результаты расчетов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Результаты измерений дозы нейтронов в точках по рис. 1 и результаты расчетов в этих же точках ($E_0 = 400$ (378) МэВ/нуклон)

Table 2

The results of measurements of the neutron dose at the points in Figure 1 and the results of calculations at the same points ($E_0 = 400$ (378) MeV/nucleon).

RUN	point	date, time	$I \times 10^9$, ions	$H_n(10)$ $\mu\text{Sv}/\text{h}$	$H_n(10) 10^{-6}$ pSv/ion	FLUKA 10^{-6} pSv/ion
31	1 in	29.04 11:35	4,26	3,87	25,2	32,9
32	2 in	29.04 11:38	6,27	4,69	20,8	27,6
33	3 in	29.04 11:42	6,20	2,90	13,0	16,1
34	4 in	29.04 11:46	6,21	8,00	35,8	38,6
35	5 in	29.04 11:49	6,10	11,1	50,5	57,6
36	5 out	29.04 11:58	5,86	1,25	5,92	2,31
37	4 out	29.04 12:01	5,78	1,06	5,09	1,87
38	3 out	29.04 12:05	5,38	1,50	7,74	8,24
39	2 out	29.04 12:09	5,47	3,40	17,3	20,0
40	1 out	29.04 12:12	5,79	4,30	20,6	25,5

3. Результаты мониторирования.

При проведении измерений для оценки результатов были использованы мониторы. В качестве мониторов были применены нейтронные дозиметры с разными функциями чувствительности [5] (А и Б). Мониторы были расположены внутри зоны установки РБС и их положение не менялось во время всех измерений. Результаты мониторирования для измерений, выполненных 29.04.2021 г., приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты мониторирования для измерений при $E_0 = 400$ (378) МэВ/нуклон

Table 3

Monitoring results for measurements at $E_0 = 400$ (378) MeV/nucleon

RUN	point	date, time	$I \times 10^9$, ions	monitor A, $N_A/I, 10^{-6}$ counts/ion	monitor B, $N_B/I, 10^{-6}$ counts/ion	NA/NB
31	1 in	29.04 11:35	4,26	2,89	1,00	2,93
32	2 in	29.04 11:38	6,27	2,93	1,01	2,88
33	3 in	29.04 11:42	6,20	2,91	0,99	2,98
34	4 in	29.04 11:46	6,21	2,92	1,00	2,89
35	5 in	29.04 11:49	6,10	2,92	0,98	2,98
36	5 out	29.04 11:58	5,86	1,10	0,46	2,39
37	4 out	29.04 12:01	5,78	1,09	0,46	2,38
38	3 out	29.04 12:05	5,38	1,09	0,44	2,45
39	2 out	29.04 12:09	5,47	1,09	0,45	2,43
40	1 out	29.04 12:12	5,79	1,09	0,45	2,41

Показания мониторов позволяют сделать вывод, что изменение оценки интенсивности и энергии пучка не превышало 3 %.

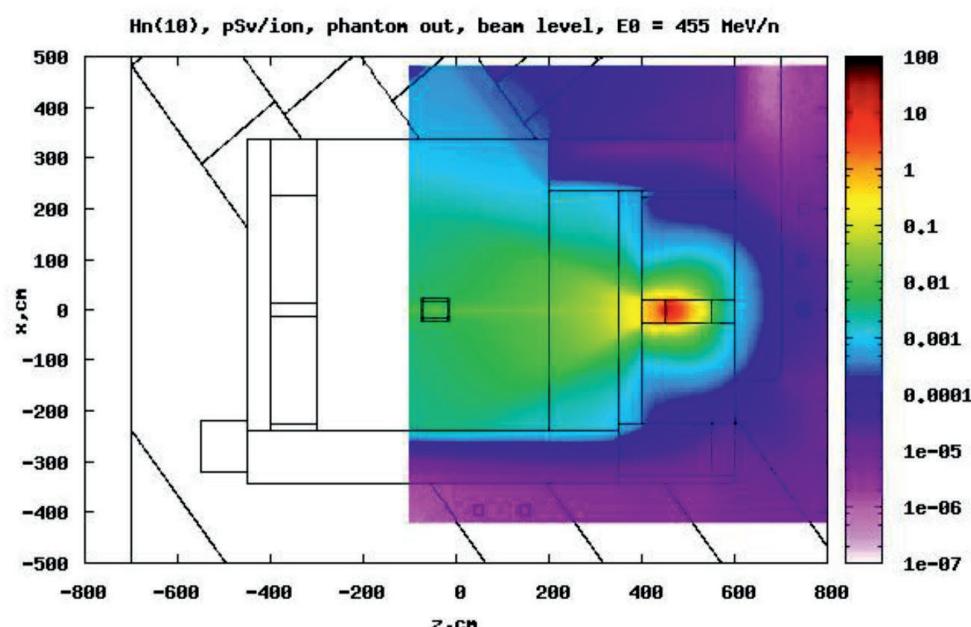


Рис. 2. Распределение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ в зоне РБС при выводе пучка ионов на поглотитель. Расчет по FLUKA, $E_0 = 455$ МэВ/нуклон

Fig. 2. Distribution of the ambient dose equivalent of $H_n(10)$ neutrons in the RBS zone when the ion beam is extracted to the absorber. Calculation by FLUKA, $E_0 = 455$ MeV/nucleon

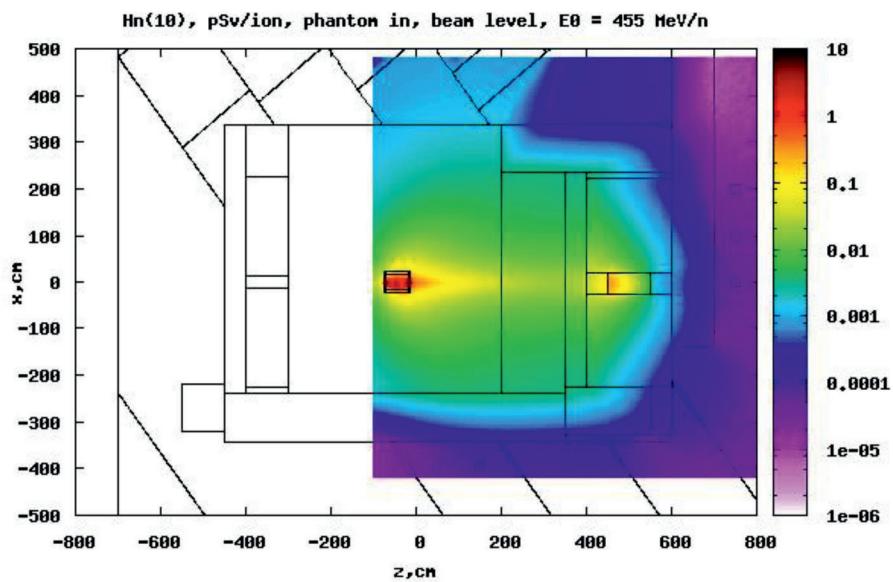


Рис. 3. Распределение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ в зоне РБС при выводе пучка ионов на фантом, $E_0 = 455$ МэВ/нуклон. Расчет по FLUKA

Fig. 3. Distribution of the ambient equivalent dose of neutrons $H_n(10)$ in the RBS zone when the ion beam is extracted to the phantom, $E_0 = 455$ MeV/nucleon. Calculation by FLUKA

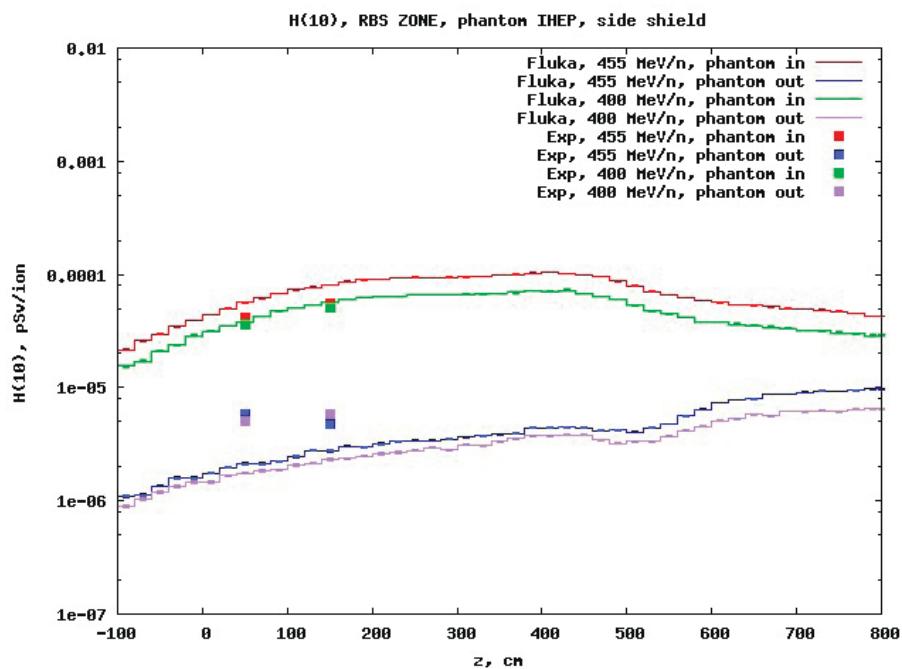
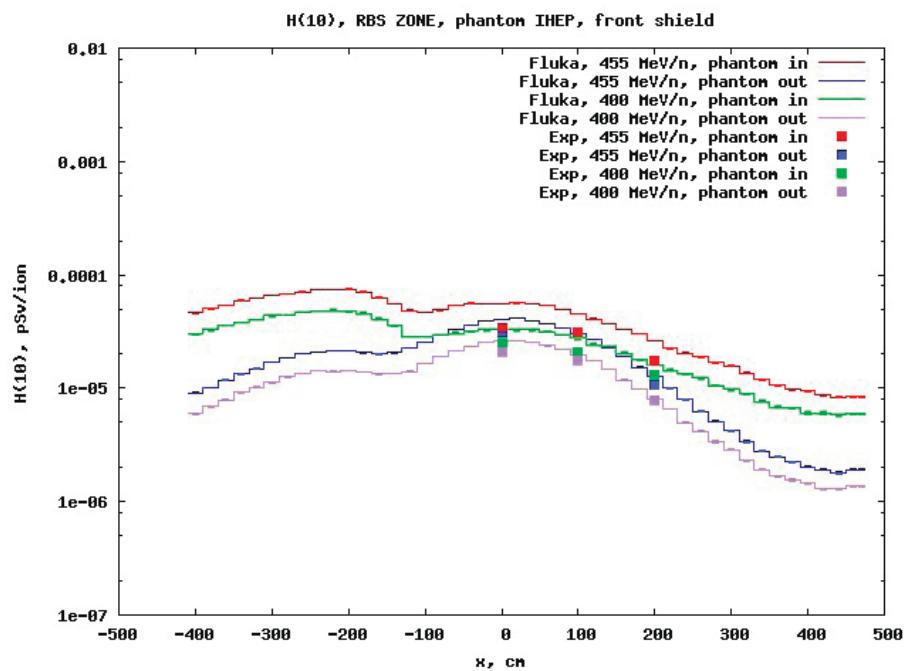


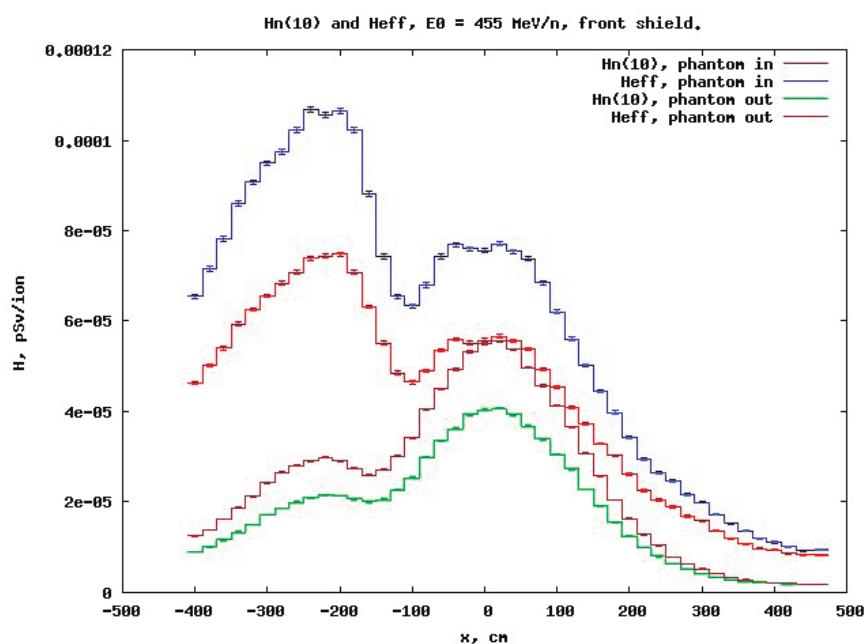
Рис. 4. Распределение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ за боковой защитой зоны РБС на уровне пучка, на расстоянии 50 см от защиты

Fig. 4. Distribution of the ambient neutron dose equivalent $H_n(10)$ behind the side protection of the RBS zone at the beam-line level, at a distance of 50 cm from the protection



Ruc. 5. Распределение амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ за передней защитой зоны РБС на уровне пучка, на расстоянии 50 см от защиты

Fig. 5. Distribution of the ambient neutron dose equivalent $H_n(10)$ behind the front protection of the RBS zone at the beam-line level, at a distance of 50 cm from the protection



Ruc. 6. Сравнение распределений амбиентного эквивалента дозы нейтронов $H_n(10)$ и эффективного эквивалента дозы H_{eff} за передней защитой зоны РБС на уровне пучка, на расстоянии 50 см, $E_0 = 455$ МэВ/нуклон

Fig. 6. Comparison of the distribution of the ambient neutron dose equivalent $H_n(10)$ and the effective dose equivalent H_{eff} behind the front protection of the RBS zone at the beam-line level, at a distance of 50 cm, $E_0 = 455$ MeV/nucleon

9. Замечания

1. Измеренные значения мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов не превышают установленного в ИФВЭ контрольного уровня – 22 мкЗв/час. При этом необходимо учитывать, что данный контрольный уровень установлен для существующего режима работы ускорителя У-70. При обосновании изменения работы установки РБС (время работы, интенсивность, энергия пучка и т. п.), необходимо произвести пересчет на установленные НРБ пределы годового облучения – 20 мЗв/год на рабочих местах персонала группы А и принятый в ИФВЭ 40 мЗв/год в местах временного пребывания персонала. Также необходимо учитывать, что данные пределы установлены для эффективного эквивалента дозы, значения которого за защитой зоны РБС до 1,5 раза превышают значения амбиентного эквивалента дозы нейтронов, и регламентированный при расчетах защиты коэффициент запаса – 2.

2. Расчетные значения амбиентного эквивалента дозы нейтронов превышают измеренные значения до 1,5 раза в большинстве измерений. Необходимо отметить, что использованный при измерениях нейтронный дозиметр ДКС-96 сертифицирован для проведения измерений при энергиях нейтронов до 10 МэВ и значительно занижает результаты при больших энергиях, как и большинство нейтронных дозиметров. Учитывая, что спектры нейтронов за защитой зоны РБС достаточно жесткие (вклад нейтронов с энергией выше 10 МэВ по дозе до 50 %), согласие между рассчитанными и измеренными значениями амбиентного эквивалента дозы нейтронов можно признать вполне удовлетворительным.

3. Обращает внимание значительное, до 2,5 раза, занижение расчетных значений по сравнению с измеренными за боковой защитой при выводе пучка ионов на поглотитель. Данное различие может быть объяснено не достаточно точным описанием геометрии расчета, в частности, полов зоны РБС вблизи точек измерения, а также погрешностью измерений при низких уровнях мощности амбиентного эквивалента дозы нейтронов ~ 1 мкЗв/час. Однако, учитывая, что мощность дозы в данном случае значительно ниже, чем при других режимах работы, и не имеет определяющего значения для оценки защиты и регламентированного при расчетах защиты коэффициента запаса – 2, результаты расчета и в этом случае можно признать достаточно достоверными.

Выводы

1. Результаты сравнения измеренных и рассчитанных значений амбиентного эквивалента дозы нейтронов позволяют сделать вывод, что результаты расчетов по программе FLUKA в условиях проведенных измерений вполне достоверны и данная программа может быть использована при проектировании биологической защиты пучков ионов углерода.

2. Существующая защита зоны РБС обеспечивает непревышение установленных в ИФВЭ контрольных уровней мощности дозы.

3. Исходя из проведенных расчетов, в настоящее время возможен вывод на мишень (фантом) в зоне РБС до $2,5 \times 10^{14}$ ионов углерода с энергией 455 МэВ/нуклон в год, без превышения установленных НРБ пределов годового облучения для персонала категории А.

Список литературы

1. **Ahdida C. et al.** New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code // Frontiers in Physics. 2022. Vol. 9. P. 788253.
2. **Battistoni G. et al.** Overview of the FLUKA code // Annals of Nuclear Energy. 2015. Vol. 82. P. 10–18.
3. **Pikalov V. A., Antipov Y. M., Maximov A. V. et al.** The results obtained on “Radiobiological stand” facility, working with the extracted carbon ion beam of the U-70 accelerator, CERN-Proceedings: 27, 27th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2021, Alushta, 27 сентября –

- 1 октября 2021 г. Alushta, 2021. Р. 124–126. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06. – EDN MLAFQY.
4. Дозиметры-радиометры ДКС-96. Руководство по эксплуатации, ТЕ1.415313.003РЭ. ОКП 43 6250 НПО “ДОЗА” Версия_7_14.02.2012.
 5. Sumaneev O. V., Azhgirey I. L., Baishov I. S., Pikalov V. A. Neutron field Measurements by GFPC based monitors at the Carbon beam at IHEP U-70 proton synchrotron // Proceedings of 27th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2021, Alushta, Russia, 2021. Р. 129. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRC01

References

1. Ahdida C. et al. New Capabilities of the FLUKA Multi-Purpose Code. *Frontiers in Physics*, 2022, vol. 9, pp. 788253.
2. Battistoni G. et al. Overview of the FLUKA code. *Annals of Nuclear Energy*, 2015, vol. 82, pp. 10–18.
3. Pikalov V. A., Antipov Y. M., Maximov A. V. et al. The results obtained on “Radiobiological stand” facility, working with the extracted carbon ion beam of the U-70 accelerator, CERN-Proceedings: 27, 27th Russian Particle Accelerator Conference, RuPAC 2021, Alushta, 27 сентября – 01 октября 2021 года. Alushta, 2021, pp. 124–126. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06. – EDN MLAFQY.
4. Dosimeters-radiometers DKS-96 User manual SPC DOZA TE1.415313.003РЭ. ОКП 43 6250 Version_7_14.02.2012 (in Russ.)
5. Sumaneev O. V., Azhgirey I. L., Baishov 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, 2021, p. 129. DOI:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRC01

Сведения об авторах

Пикалов Владимир Александрович, начальник лаборатории

Суманеев Олег Валентинович, научный сотрудник

Сухарев Михаил Михайлович, ведущий инженер

Information about the Authors

Vladimir A. Pikalov, Head of laboratory

Oleg V. Sumaneev, Researcher

Mikhail M. Sukharev, Lead Engineer

Статья поступила в редакцию 14.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 25.04.2024

The article was submitted 14.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 25.04.2024