

# Расчеты методом Монте-Карло поправочных коэффициентов для протонного калориметра

Наличие вакуумных зазоров в калориметрах, предназначенных для измерения доз ионизирующих излучений, приводит к изменению флюенса частиц, что в свою очередь приводит к изменению значения поглощенной дозы в точке измерения от того значения, которое было бы в однородной среде. Приведены результаты расчетов методом Монте-Карло поправочных коэффициентов, учитывающих искажение флюенса протонов медицинского пучка с энергией протонов от 50 до 250 МэВ для протонного калориметра, разработанного во «ВНИИФТРИ». Полученные результаты использованы для определения поглощенной дозы протонного излучения калориметром, вошедшем в состав Государственного первичного эталона ГЭТ 38-2024.

## **Ключевые слова:**

*протонное излучение, калориметр, флюенс протонов, поглощенная доза, метод Монте-Карло, пик Брэгга, дозиметрия.*

**А.В.Берлянд<sup>1</sup>, В.А.Берлянд<sup>1</sup>,  
Ю.Е.Титаренко<sup>2</sup>, К.В.Павлов<sup>2</sup>,  
В.Ф.Батяев<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> ФГУП Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, пос. Менделеево Московской обл.

<sup>2</sup> ФГБУ Институт теоретической и экспериментальной физики имени А.И. Алиханова Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва

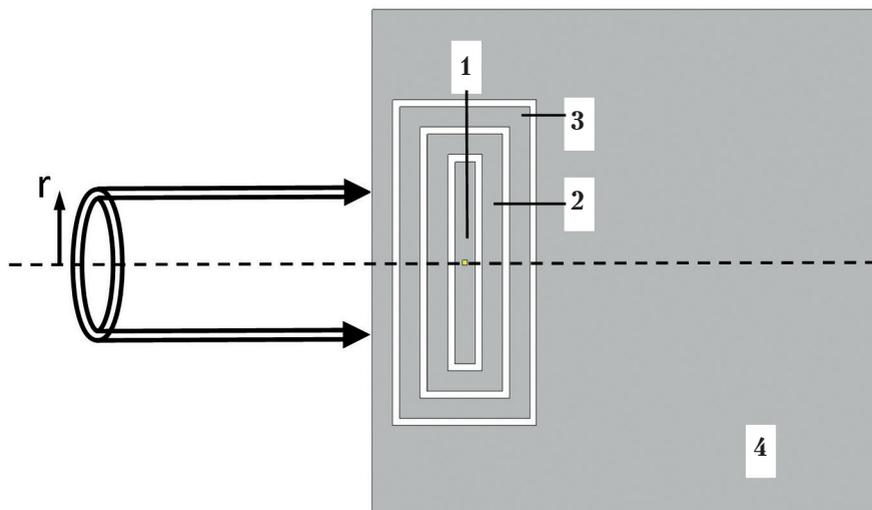
**Л**учевая терапия с использованием протонного излучения имеет существенное преимущество по сравнению с применением фотонного излучения. При попадании фотонного излучения (гамма-излучения Со-60 или тормозного излучения ускорителей электронов) на объект облучения поглощенная доза вначале растет за счет вклада рассеянного излучения, а затем падает примерно по экспоненциальному закону. В отличие от этого, кривая поглощенной дозы от протонов характеризуется низким значением дозы на большом участке своего пробега, а в конце пробега значение поглощенной дозы резко возрастает – так называемый пик Брэгга. Затем поглощенная доза протонов

падает до нуля, чего никогда не бывает в случае фотонного излучения. Положение пика Брэгга зависит от энергии протонного излучения. Поэтому меняя энергию частиц, можно обеспечить максимальное значение поглощенной дозы в нужной локализации при минимальном значении дозы в других точках облучаемого объекта. В соответствии с рекомендациями IAEA TRS-398 [1] дозиметрию протонного излучения для целей лучевой терапии надо проводить с помощью ионизационных камер, прокалиброванных в единицах поглощенной дозы в воде для данного вида излучения. Для того, чтобы определить калибровочный коэффициент ионизационной камеры для протонного излучения, используется калориметрический метод. Калориметрический метод измерения поглощенной дозы является единственным, который позволяет измерять эту величину в соответствии с ее определением. Поэтому этот метод рекомендован для использования в первичных эталонах поглощенной дозы различных видов ионизирующих излучений [2-5,10]. В ФГУП «ВНИИФТРИ» разработан графитовый транспортабельный протонный калориметр. Схематически разрез калориметра представлен на рис.1. Калориметр состоит из поглотителя (1), 1-й (2) и 2-й (3) оболочек, размещенных в мини-фантоме (4). Все детали изготовлены из графита и отделены друг от друга вакуумными зазорами.

### Расчетное моделирование

Задачей является определение поправочных коэффициентов  $k_3$ , учитывающих искажение флюенса протонов вакуумными зазорами калориметра. Для этого надо выполнить расчетное определение удельного энерговыделения (далее – УЭ) в центральной (измерительной) точке поглотителя от протонного пучка с энергией протонов от 50 до 250 МэВ, как в случае наличия зазоров между телом среды, как показано на рис.1, так и в случае отсутствия зазоров (измерительная точка в таком случае сдвигается влево на тройную толщину зазоров). Поправочные коэффициенты  $k_3$  определяются через отношение УЭ без вакуумных зазоров к УЭ с вакуумными зазорами.

Вакуумные зазоры между поглотителем, оболочками и мини-фантомом имеют единую толщину 0,7 мм. Поглотитель имеет диаметр 20 мм. Ввиду нетривиальной геометрии среды такая задача может быть решена только с использованием программ переноса излучения



**Рис.1.** Разрез калориметра и схема модели взаимодействия с ним кольцевого пучка протонов.

в произвольной среде методом Монте-Карло. Одной из широко используемых таких программ является программа SHIELD [6]. Программа может вести транспорт практически любых частиц, включая протоны, нейтроны, фотоны, электроны с энергиями от долей эВ для нейтронов и от 1 кэВ до сотен ГэВ для остальных частиц. Программа позволяет создавать ячейки любой формы из комбинаций стандартных геометрических фигур, наполнять их материалами произвольного элементного состава и плотности, задавать первичные частицы, например, в виде пучков произвольного размера и рассчитывать функционалы различного типа, в частности, энерговыделение в заданных ячейках. В данной работе рассчитывались УЭ от первичных и вторичных протонов, а также от вторичных нейтронов в центральной ячейке. Ввиду того, что рассчитываемая ячейка имеет очень малый поперечный размер (диаметр 0,5 мм) в сравнении с размером возможного протонного пучка (диаметр от 20 мм и более), через нее может проходить лишь небольшая доля первичных и вторичных частиц пучка, что в свою очередь приведет к необходимости набора историй (статистики) гигантского размера для достижения необходимой в данной задаче точности. Очевидно, чтобы получить точность расчета УЭ, например, на уровне  $10^{-2}$  % необходимо, чтобы через расчетную ячейку прошло не менее  $10^8$  частиц, т. е. флюенс моделируемых первичных протонов на оси калориметра должен быть на уровне  $10^{11}$  р/см<sup>2</sup>, что соответствует сотням млрд. историй при моделировании пучков с указанными выше размерами. Эта проблема может стать особенно острой, если необходимо получить результат для нескольких вариантов пространственного распределения протонного пучка. Чтобы сократить статистические требования, было предложено представить пучок с произвольной зависимостью плотности потока от радиуса в виде суммы (комбинации) отдельных вложенных друг в друга кольцевых пучков, внутренний и внешний радиус каждого из которых соответствует внешнему и внутреннему радиусу соседних пучков. В таком случае, имея такие расчетные индивидуальные УЭ в центральной ячейке для кольцевых пучков разных радиусов, можно получить интегральное УЭ для пучка произвольной радиальной зависимости путем сложения индивидуальных УЭ с соответствующими весами:

$$P_{In} = \sum_{i=1}^n [w_i \cdot p_i], \quad (1)$$

где  $w_i$  – весовые коэффициенты, соответствующие радиальной форме пучка и численно равные значениям плотности потока реального пучка на радиусе  $r_i$ ,  $P_{In}$  – интегральное УЭ от первого кольцевого пучка до  $n$ -го,  $p_i$  – индивидуальное УЭ от кольцевого пучка с номером  $i$  и единичной плотности потока. Отметим также, что даже если плотность пучка имеет не одномерную (только от радиуса), а двухкоординатную зависимость, то и в этом случае возможно получить УЭ в центральной ячейке, используя в качестве  $w_i$  в формуле (1) средние значения плотности потока при радиусах  $r_i$ .

Результаты, представленные в данной работе, соответствуют пучку с единой плотностью потока во всех кольцах. При этом непосредственным результатом расчета программы SHIELD является исходное удельное энерговыделение (УЭ) размерности МэВ/г на исходный протон. Чтобы получить  $p_i$  – УЭ от кольцевого пучка  $i$  с единичной плотностью потока – исходное УЭ нормировалось на плотность потока протонов кольцевых пучков, что сводилось к умножению исходных УЭ на площади колец моделируемых пучков. В итоге значения УЭ, представленные на рис.2–6, получили размерность (МэВ/г)/(р/см<sup>2</sup>).

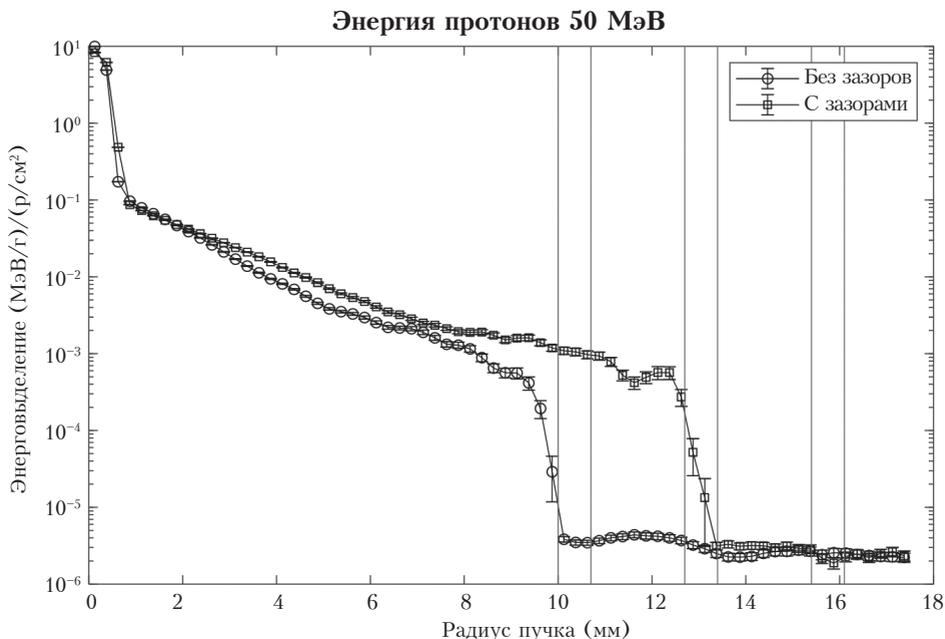
$$p_i^{ucx} [\text{МэВ/г}] / \varphi_i [p/\text{см}^2] = p_i^{ucx} [\text{МэВ/г}] \cdot S_i [\text{см}^2/p] = p_i [(\text{МэВ/г})/(p/\text{см}^2)], \quad (2)$$

где:  $p_i^{исх}$  и  $p_i$  – соответственно, исходные и итоговые УЭ, рассчитываемые отдельно для всех колец  $i$  и всех энергий;  $\varphi_i$  и  $S_i$  – соответственно, плотность потока протонов и площадь кольцевого пучка  $i$ ; в квадратных скобках указаны размерности величин.

Для каждой протонной энергии были моделированы 70 кольцевых пучков с внешними радиусами от 0,25 мм до 17,5 мм. Количество историй в каждом моделировании составляло 250 млн протонов.

### Результаты расчетного моделирования

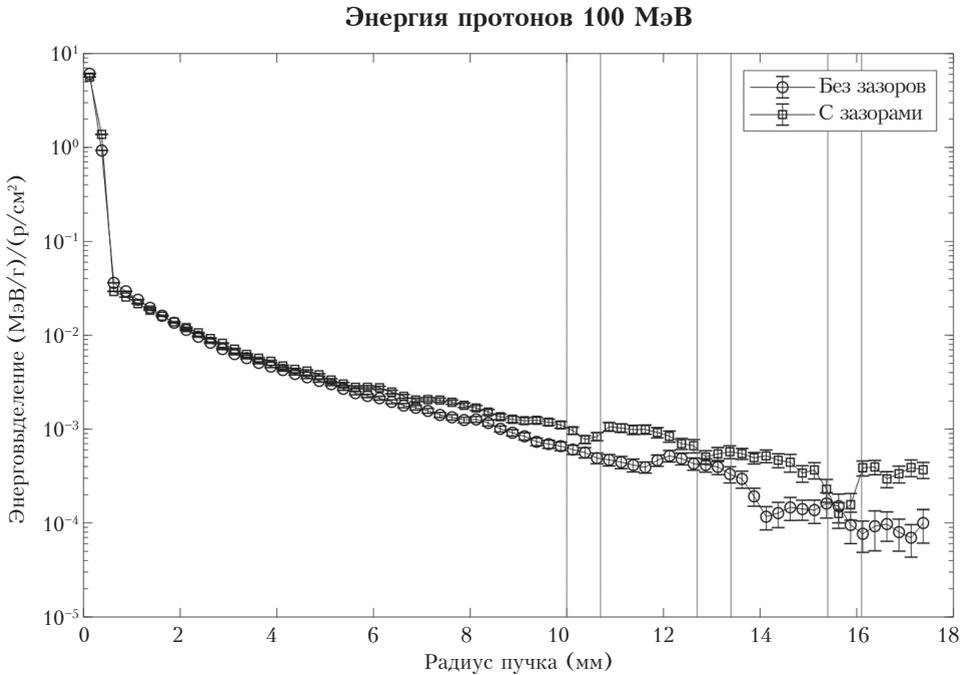
На рис.2–6 представлены результаты расчетов УЭ в центральной ячейке при воздействии на calorimeter обеих версий (с зазорами и без них) кольцевых пучков протонов с энергией 50, 100, 150, 200 и 250 МэВ, соответственно. Для каждой протонной энергии было рассчитано 75 пучков равной радиальной ширины (0,25 мм) с максимальным внешним диаметром 35 мм. Первый пучок с нулевым внутренним и внешним радиусом, равным 0,25 мм, точно соответствует профилю расчетной ячейки, поэтому во всех случаях первый пучок дает максимальное УЭ. Второй пучок с радиусом в интервале 0,25–0,5 мм уже выходит за профиль расчетной ячейки и поэтому дает несколько меньшее УЭ. Как видно из рисунков, отношение УЭ от второго и первого пучков сильно зависит от энергии протонов. Эта зависимость объясняется обратной зависимостью среднего угла рассеяния протонов от его энергии. По мере удаления пучка от оси calorimeter главная роль в УЭ в расчетной ячейке постепенно переходит от первичных протонов к вторичным протонам и нейтронам, которые в отличие от первичных протонов движутся почти во всех направлениях. Вследствие этого, начиная с примерного 5-го пучка, зависимость УЭ от номера пучка становится более гладкой. При относительно малых энергиях протонов



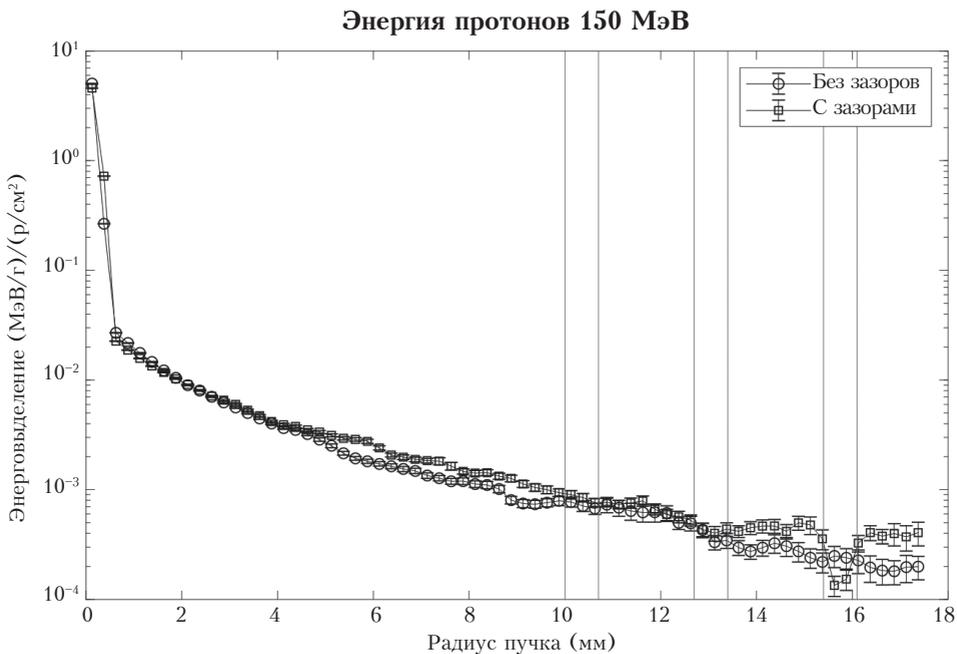
**Рис.2.** Результат моделирования УЭ в центральной ячейке в зависимости от радиуса воздействующего на calorimeter кольцевого пучка протонов с энергией 50 МэВ в случае наличия и отсутствия зазоров в коллиматоре. Внешний и внутренний радиусы всех пучков отличаются на 0,25 мм. Вертикальные линии соответствуют расположению боковых зазоров.

(50 МэВ) вторичные протоны имеют ограниченный радиальный пробег и поэтому в зависимостях УЭ от радиуса кольцевых пучков могут наблюдаться обрывы.

Интегрированием значений кольцевых УЭ, приведенных на рис. 2–6, по формуле (1) с единичными весами  $w_i$  были получены интегральные УЭ для обоих вариантов (с зазорами и без них) и далее отношения интегральных УЭ в зависимости от радиуса пучков.



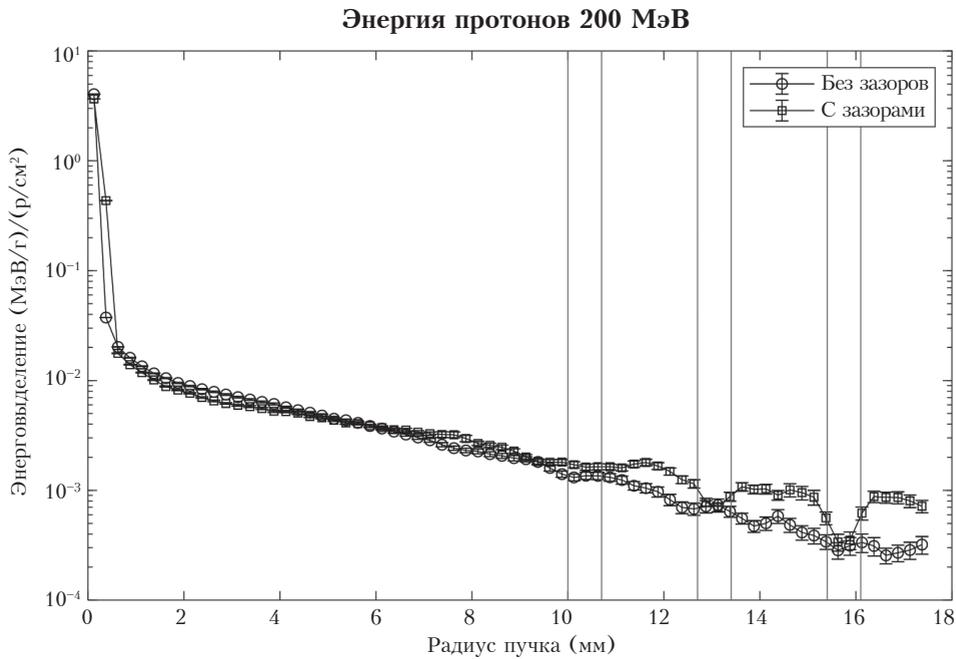
**Рис.3.** То же, что рис.2, но при энергии протонов 100 МэВ.



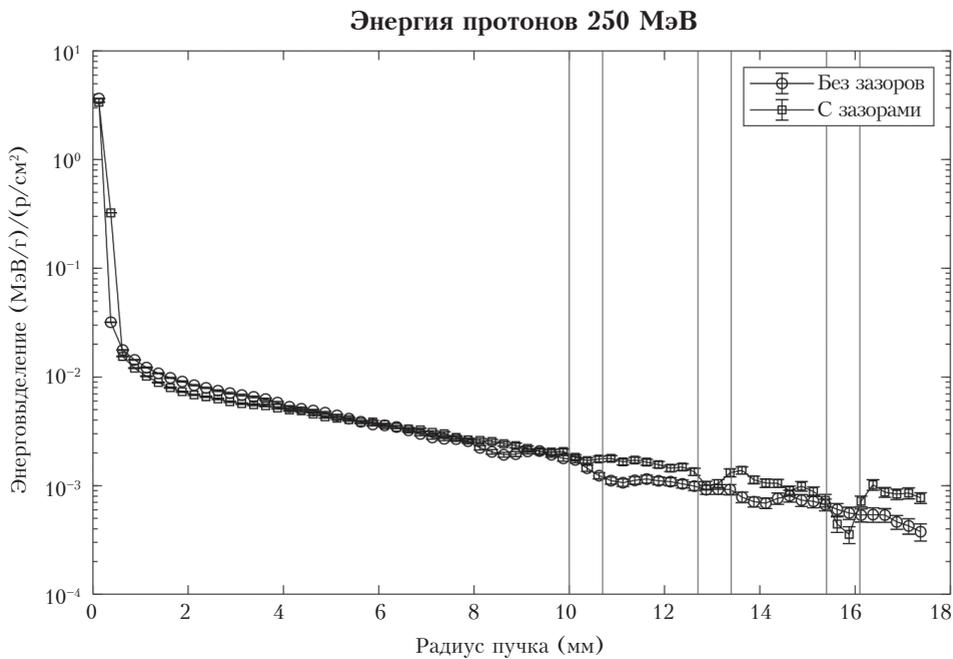
**Рис.4.** То же, что рис.2, но при энергии протонов 150 МэВ.

Результаты отношений УЭ «без зазоров/с зазорами» представлены на рис.7 для  $P_{In}$ , где  $n$  – от 2 до 75, что соответствует диаметру плоского пучка от 1 до 35 мм.

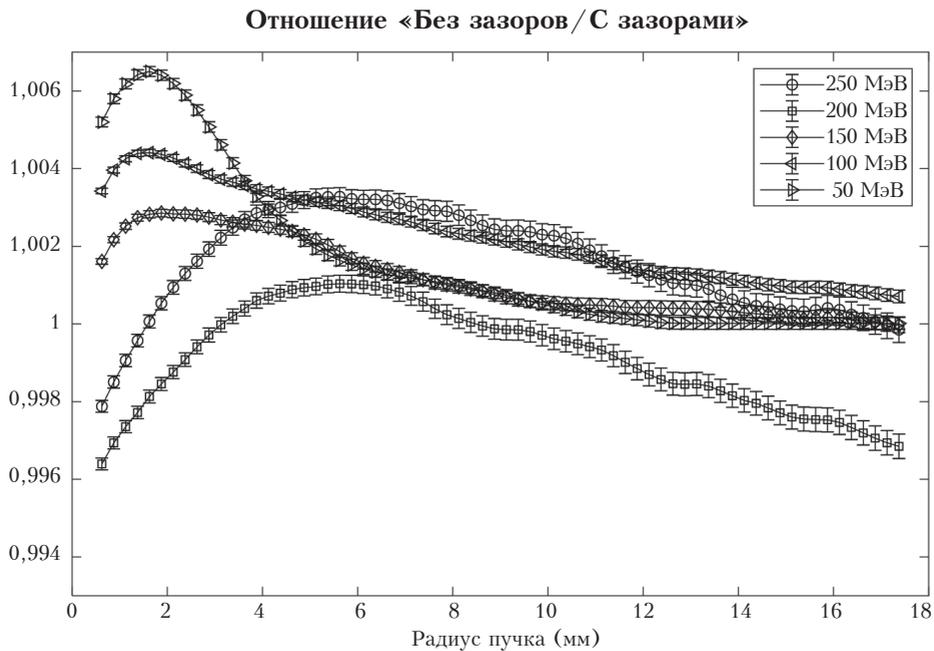
Результаты показывают, что для всех 5 энергий протонов отношение отличается от единицы менее чем на 1% для любых пучков диаметром более 1 мм.



**Рис.5.** То же, что рис.2, но при энергии протонов 200 МэВ.



**Рис.6.** То же, что рис.2, но при энергии протонов 250 МэВ.



**Рис.7.** Отношения УЭ в центральной ячейке «без зазоров/с зазорами» в зависимости от радиуса плоского пучка при энергиях протонов 50, 100, 150, 200 и 250 МэВ.

**Табл.1.** Значения УЭ (МэВ/г) в центральной ячейке от плоского протонного пучка единичной плотности потока и диаметром 35 мм.

Энергия (МэВ)	УЭ «без зазоров» (МэВ/г)/(р/см <sup>2</sup> )	УЭ «с зазорами», (МэВ/г)/(р/см <sup>2</sup> )	$k_3$
250	3,9167±0,0009	3,9173±0,0009	0,9999±0,0003
200	4,3161±0,0009	4,3297±0,0010	0,9969±0,0003
150	5,5212±0,0007	5,5214±0,0008	1,0000±0,0002
100	7,2639±0,0008	7,2587±0,0009	1,0007±0,0002
50	15,648±0,002	15,648±0,002	1,0000±0,0002

## Заключение

Расчеты поправочных множителей, учитывающих искажение флюенса протонов вакуумными зазорами калориметра, осуществлялись рядом автором с применением различных программ Монте-Карло. Конструкции калориметров достаточно близки, что позволяет сравнивать результаты расчетов. Так, в работе [7] в результате расчетов с использованием программы GEANT 4 были рассчитаны значения  $k_3$  для 5 значений энергии моноэнергетических протонов в диапазоне энергий от 60 до 230 МэВ. Зависимость  $k_3$  от энергии оказалась нелинейной, а значения  $k_3$  менялись от 1,0006 для 60 МэВ до 1,0036 для 230 МэВ. В работе [8] для расчетов использовалась модифицированная версия Монте-Карло – PTRAN. Расчеты проводились для протонных пучков, модулированных и немодулированных, с энергией 62 МэВ. В результате расчетов установлено значение  $k_3$ , равное единице со стандартной неопределенностью по типу А, обусловленной статистикой расчетов, равной 0,05%. Результаты, полученные в данной работе, не сильно отличаются от данных, полученных другими авторами. Различие может быть обусловлено различной конструкцией калориметров, а также использованием различных моделей расчетов.

Данные, полученные в результате расчетов методом Монте-Карло поправочных коэффициентов, позволили снизить систематическую погрешность определения поглощенной дозы протонного излучения калориметром из состава Государственного первичного эталона ГЭТ38-2024 [9].

### Литература

1. IAEA TRS-398 Absorbed dose determination in external beam radiotherapy: an international code of practice for dosimetry based on standards of absorbed dose to water: Technical report. – Vienna: International Atomic Energy Agency, 2000.
2. «Clinical Proton Dosimetry Part I: Beam Production, Beam Delivery and Measurement of Absorbed Dose», 1998. ICRU Report 59. L. Verhey (Chairman), H. Blattman, P.M. DeLuca, and D. Miller.
3. J. Lyman et al. 1986 Protocol for heavy charged-particle therapy beam dosimetry. A report of Task group 20 Radiation Therapy Committee American Association of Physicists in Medicine Report 16 (New York: AIP).
4. S. Vynckier, D.E Bonnett and D. T. L. Jones, «Code of practice for clinical proton dosimetry», *Radiother. Oncol.*, № 20, 1991, pp. 53-63.
5. S. Vynckier, D.E. Bonnett and D. T. L. Jones, «Supplement to the code of practice for clinical proton dosimetry», *Radiother. Oncol.*, no. 32, 1994, pp. 174–179.
6. SHIELD – Расчет взаимодействия элементарных частиц со сложными средами. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2008613935. 18 августа, 2008.
7. L.M. Petrie, S. Galer, D.Shipley, H.Palmans, «Monte Carlo calculated correction factors for the NPL proton calorimeter», *Radiation Physics and Chemistry*, vol. 140, November 2017, pp. 383-385.
8. Hugo Palmans, Russell Thomas, Mary Simon, Simon Duane, Andrzej Kacperek, Alan DuSautoy and Frank Verhaegen, «A small-body portable graphite calorimeter for dosimetry in low-energy clinical proton beams», *Phys. Med. Biol.*, no. 49, 2004, p. 3737.
9. Берлянд А.В. Государственный первичный эталон единиц поглощенной дозы и мощности поглощенной дозы фотонного, электронного, протонного излучений и в пучках ионов углерода, количества, флюенса, плотности потока и энергии частиц в пучках протонов и тяжелых заряженных частиц ГЭТ 38-2024 // Измерительная техника. 2024. № 9. С. 12.
10. Берлянд А.В., Берлянд В.А. Методическое обеспечение дозиметрии для целей лучевой терапии // Альманах современной метрологии. 2019. № 3(19). С. 54-57.

# Monte Carlo Calculations of Correction Coefficients for a Proton Calorimeter

Berlyand Alexander<sup>1</sup>, Berlyand Vladimir<sup>1</sup>, Titarenko Yury<sup>2</sup>, Pavlov Kirill<sup>2</sup>, Batyaev Viacheslav<sup>2</sup>

<sup>1</sup> FSUE All-Russian Scientific Research Institute of Physical, Technical and Radio Measurements, Mendeleevo, Moscow region, Russia

<sup>2</sup> Alikhanov Institute of Theoretical and Experimental Physics of the Kurchatov Institute National Research Center, Moscow, Russia

**Abstract.** The presence of vacuum gaps in calorimeters designed to measure doses of ionizing radiation leads to a change in particle flux, which in turn leads to a change in the value of the absorbed dose at the measuring point from the value that would be in a homogeneous medium. The results of Monte Carlo calculations of correction coefficients that take into account the distortion of the fluence of protons in a medical beam with a proton energy from 50 to 250 MeV for a proton calorimeter developed by VNIIFTRI are presented. The results obtained were used to determine the absorbed dose of proton radiation with a calorimeter included in the State Primary Standard GET 38-2024.

**Keywords:** *proton radiation, calorimeter, proton fluence, absorbed dose, Monte Carlo method, Bragg peak, dosimetry.*

*А.В.Берлянд (к.т.н., нач.лаб.)<sup>1</sup>, В.А.Берлянд (к.т.н., в.н.с.)<sup>1</sup>, Ю.Е.Титаренко (профессор, д.ф.-м.н., нач.лаб.)<sup>2</sup>, В.Ф.Батяев (к.ф.-м.н., с.н.с.)<sup>2</sup>, К.В.Павлов (к.ф.-м.н., в.н.с.)<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> *Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, пос. Менделеево Московской обл.*

<sup>2</sup> *Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», г. Москва*

*Контакты: +7 (495) 660-17-44; sander.00007@gmail.com.*