

КАЛИБРОВКА ЧЕРЕНКОВСКОГО МОНИТОРА ПРОТОННОГО ПУЧКА

© 2023 г. С. В. Акулиничев^{a,b}, Ю. К. Гаврилов^a, Р. М. Джилкибаев^{a,*}

^aИнститут ядерных исследований РАН

Россия, 117312, Москва, просп. 60-летия Октября, 7а

^bРоссийский научный центр хирургии им. Б.В. Петровского
Россия, 119435, Москва, Абрикосовский пер., 2

*e-mail: rmd@inr.ru

Поступила в редакцию 27.09.2022 г.

После доработки 07.10.2022 г.

Принята к публикации 11.11.2022 г.

Представлены результаты калибровочных измерений черенковского монитора протонного пучка. Получено хорошее согласие измерений монитора с показаниями ионизационной камеры и пластикового монитора. Черенковский монитор не регистрирует фотоны и электроны с энергией ниже 170 кэВ, что важно для подавления низкоэнергетического фона.

DOI: 10.31857/S0032816223020131, EDN: GSKNMH

1. ВВЕДЕНИЕ

Калибровочные измерения двух черенковских мониторов (Ch1, Ch2) протонного пучка [1] проводили на медицинском канале центра коллективного пользования ИЯИ РАН в сравнении с ионизационной камерой (IC) Semiflex Ionization Chamber Type 31010 [2] объемом 0.14 см³, используемой совместно с клиническим дозиметром “PTW Multidos elektrometer” и калиброванным пластиковым монитором (RF) “Gafchromic EBT³” [3].

Ускоритель протонов с энергией 169–209 МэВ работает в диапазоне частот 1–50 Гц, в широком диапазоне интенсивностей протонного пучка — от малых импульсных токов 0.1 мкА до 10 мА, при этом длительность импульса протонов находится в диапазоне от 0.3 до 100 мкс. Черенковский монитор имеет принципиальную возможность работать в этом диапазоне интенсивностей протонного пучка в условиях сильного низкоэнергетического электромагнитного фона. Известные детекторы, такие как ионизационные камеры [4–6] и индукционные датчики тока [7, 8], не могут работать в таком широком диапазоне интенсивностей. Ионизационные камеры хорошо работают в области сравнительно малых токов, до 10 мкА. При больших токах в ионизационных камерах возникают нелинейные эффекты, связанные с пространственным зарядом и рекомбинацией ионов в газе камеры. Индукционные датчики тока работают хорошо в области сравнительно больших токов, выше 10 мкА. Ионизационная камера и пластиковый

монитор измеряют поглощенную дозу ионизирующего излучения. Черенковский монитор измеряет черенковский свет, излучаемый протонами в тонком стеклянном радиаторе монитора. Протоны с энергией 209 МэВ излучают в среднем 0.5 фотона/протон [1] в области чувствительности спектра фотоумножителя XR2020. Монитор не регистрирует фотоны и электроны с энергией ниже 170 кэВ, что важно для подавления низкоэнергетического фона. Поглощенная доза в веществе детекторов и черенковское излучение пропорциональны количеству регистрируемых протонов.

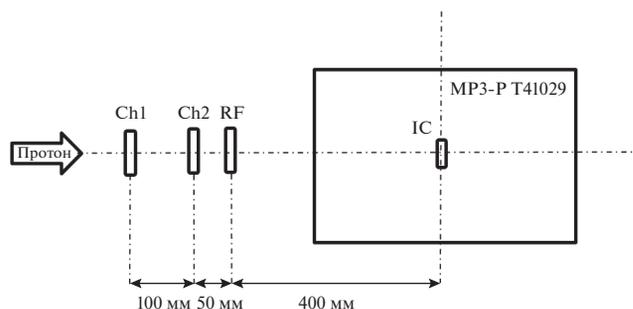


Рис. 1. Схема расположения детекторов и водного фантома MP3-P T41029 на пучке протонов с энергией 169 МэВ. Ch1, Ch2 — черенковские детекторы; RF — калиброванный пластиковый детектор; IC — ионизационная камера.

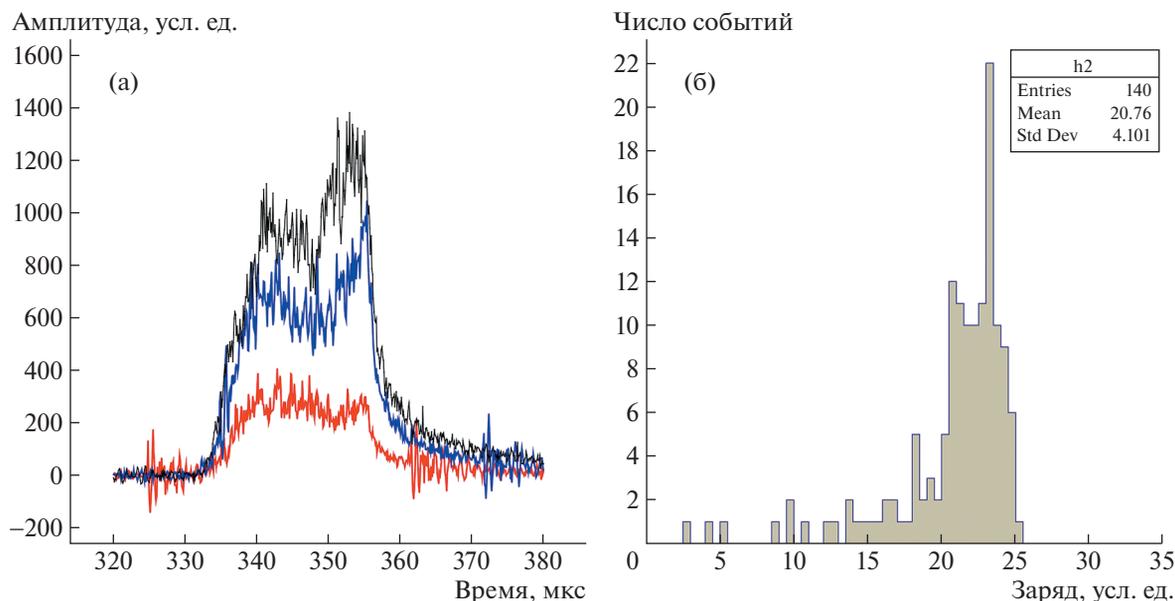


Рис. 2. а – зависимость амплитуды сигнала детектора Ch1 от времени для трех выборочных импульсов (малого, среднего, большого) протонного пучка из цикла D1; б – гистограмма распределения заряда в каждом импульсе для цикла D1, состоящего из 140 импульсов.

2. КАЛИБРОВОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ

Схема расположения детекторов на пучке протонов с энергией 169 МэВ показана на рис. 1. Протонный пучок полностью поглощался в водном фантоме MP3-PT41029 размером $448 \times 480 \times 350$ мм, в котором в области максимального энерговыделения (брэгговский пик) протонного пучка размещалась ионизационная камера IC. Черенковские Ch1, Ch2 и пластиковый RF мониторы устанавливались по центру протонного пучка перед фантомом в воздушном зазоре.

Измерения проводились на пучке протонов с энергией 169 МэВ и с длительностью импульса протонов, равной 35 мкс, для трех режимов работы ускорителя: цикл D1 – 140 импульсов, D2 – 943 импульса и D3 – 1561 импульс. Детекторы IC и RF измеряют суммарную дозу в цикле от всех импульсов протонов. Детекторы Ch1 и Ch2 измеряют импульс тока во времени для каждого импульса протонов. Интегрирование импульса тока

по времени дает заряд, пропорциональный числу протонов, для каждого импульса.

На рис. 2а приведены зависимости амплитуды сигнала от времени для трех выборочных импульсов. Амплитуда сигнала от детекторов Ch1 и Ch2 измерялась с помощью преобразователя CAEN DT5720 [9]. Гистограмма распределения числа протонов в каждом импульсе для цикла D1, состоящего из 140 импульсов, показана на рис. 2б.

Результаты измерений поглощенной дозы детекторами Ch1, IC и RF в трех режимах работы ускорителя представлены в табл. 1. Ионизационная камера IC и пластиковый монитор RF откалиброваны в грях. Измеренная доза черенковским монитором получена путем интегрирования импульса тока (см. рис. 2а) для определения заряда в каждом импульсе (см. рис. 2б). Суммарные значения заряда детектора Ch1 для всего цикла измерения в табл. 1 представлены в условных единицах.

На рис. 3а показаны результаты измерений дозы пластиковым монитором RF в зависимости от

Таблица 1. Результаты измерений поглощенной дозы ионизирующего излучения детекторами (Ch1, IC и RF) в трех режимах работы ускорителя

Цикл	Число импульсов	Заряд Ch1, усл. ед.	Доза, Гр, измеренная	
			IC	RF
D1	140	1.92	1.32	1.0
D2	943	8.37	8.26	8.0
D3	1561	18.9	18.1	17.8

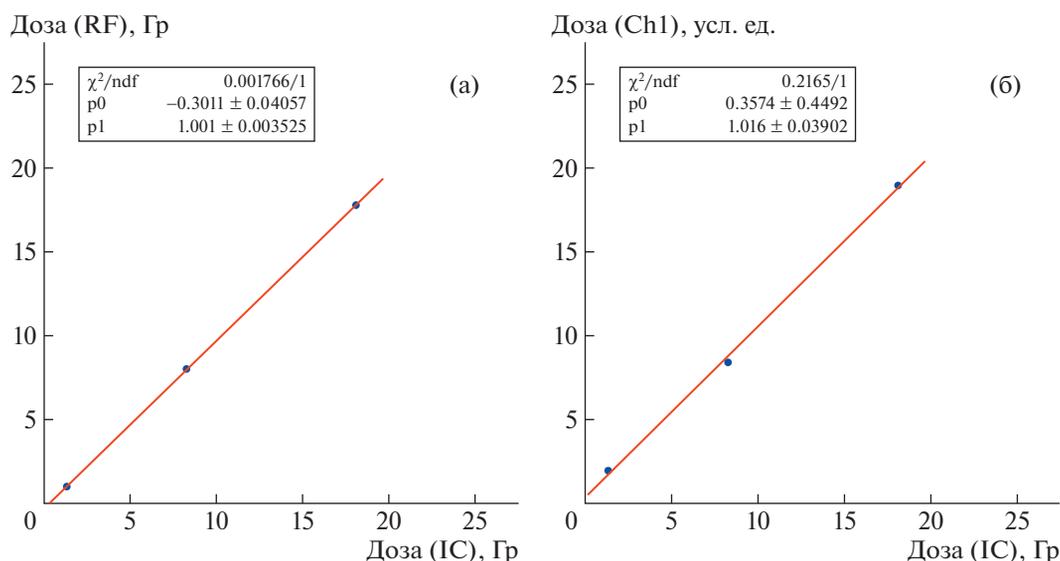


Рис. 3. а – зависимость суммарной дозы, измеренной пластиковым монитором RF, от суммарной дозы, измеренной ионизационной камерой; б – калибровочный график связи результатов измерений суммарной дозы черенковским монитором Ch1 и ионизационной камерой IC. Сплошные линии – результаты подгонок линейными зависимостями.

суммарной дозы, измеренной ионизационной камерой IC, в трех режимах работы ускорителя. Сплошной линией представлен результат фита линейной зависимостью. Результат показывает хорошее соответствие данных, полученных детекторами IC и RF. Это демонстрирует хорошую калибровку детекторов IC и RF. Полученная в результате фитирования линейная зависимость суммарной

дозы, измеренной черенковским монитором Ch1, от суммарной дозы, полученной ионизационной камерой IC, говорит о том, что детекторы хорошо согласуются между собой (рис. 3б). Тем самым показано, что черенковским детектором можно измерять дозу в водном фантоме в области максимального энерговыделения (брэгговский пик) протонного пучка.

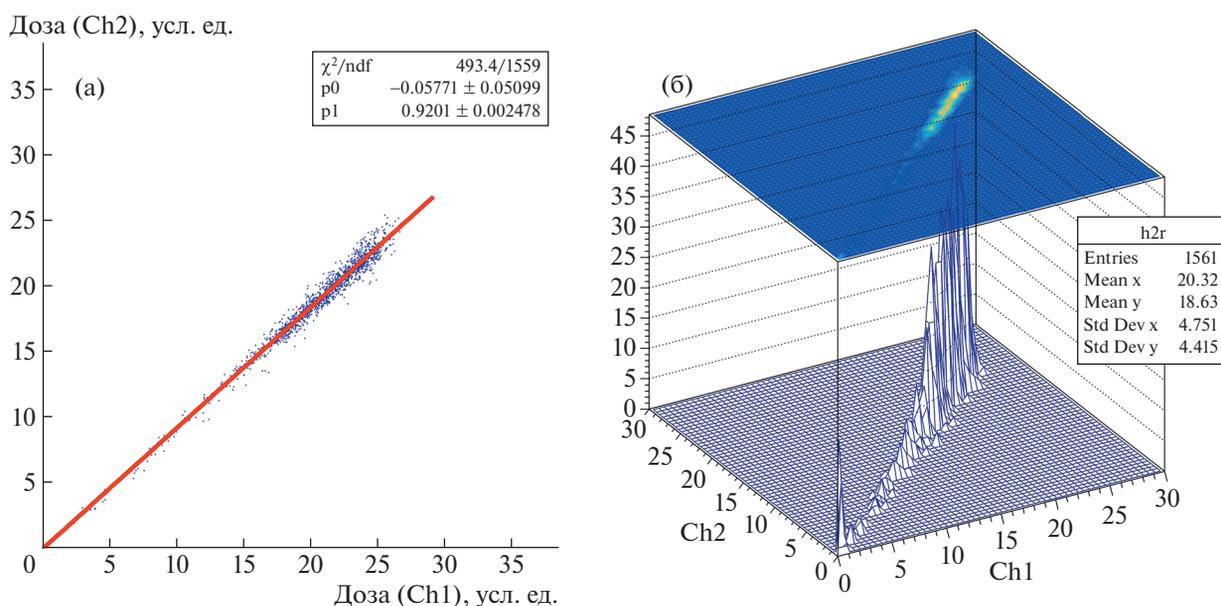


Рис. 4. а – зависимость суммарной дозы, измеренной черенковским монитором Ch2, от дозы, измеренной черенковским монитором Ch1, сплошная линия – результат подгонки линейной зависимостью; б – двумерная гистограмма результатов измерений мониторами Ch1 и Ch2, демонстрирующая степень корреляции и разброс независимых результатов измерений дозы черенковскими мониторами.

Измерения черенковскими мониторами Ch1 и Ch2 хорошо согласуются между собой (рис. 4). Относительную точность измерений дозы монитора Ch можно оценить по разбросу точек (см. рис. 4а) в области 20–25 Гр, ее величина равна ~3%.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты калибровочных измерений черенковским монитором протонного пучка. Получено хорошее согласие результатов измерений монитором с показаниями ионизационной камеры и пластикового монитора. Черенковский монитор не регистрирует фотоны и электроны с энергией ниже 170 кэВ, что важно для подавления низкоэнергетического фона.

БЛАГОДАРНОСТИ

В заключение авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность И.И. Ткачеву, Д.А. Коконцеву, И.А. Яковлеву и В.Е. Постоеву за поддержку и помощь в работе.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Ускорительный центр нейтронных исследований структуры вещества и ядерной медицины ИЯИ РАН” при поддержке Министерства образования и науки Российской Федера-

ции в рамках Соглашения о предоставлении субсидии (№ 14.621.21.0014 28.08.2017), уникальный идентификатор RFMEFI62117X0014. Работа поддержана грантом РНФ № 22-25-00211 “Исследование реакции клеток на воздействие рекордно мощных сверхкоротких импульсов протонов”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Джилкибаев Р.М.* // ПТЭ. 2021. № 4. С. 10. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040145>
2. www.rpdinc.com “Scanditronics ionization chamber”
3. www.gafchromic.com. An Efficient Calibration Protocol for Radiochromic Film, April 2011 available at www.filmqapro.com
4. *Boag J.W.* Ionization chamber in Radiation dosimetry. USA, NY.: Press Academic, 1968.
5. *McDonald J., Velissaris C., Viren B., Diwan M., Erwin A., Naples D., Ping H.* // Nucl. Instrum. and Methods in Physics Res. 2003. V. A496. P. 293. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01768-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01768-0)
6. *Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С.* Основы экспериментальных методов ядерной физики. М.: Атомиздат, 1970.
7. *Reinhardt-Nikoulin P., Gaidash V., Menshov A., Mirzozjan A., Feschenko A.* // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2006. V. 2 (46). P. 113.
8. *Дьяченко А.Ф.* // Вестник Харьковского университета. Серия физика. 2010. Вып. 1 (45). № 887. P. 118.
9. CAEN DT5720. 4 channel 12 bit waveform digitizer. <http://www.caen.it>