

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ МОНИТОР ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫХ ПУЧКОВ ПРОТОНОВ

© 2025 г. С. В. Акулиничев^{1)*}, Ю. К. Гаврилов¹⁾, Р. М. Джилкибаев¹⁾

Поступила в редакцию 30.09.2024 г.; после доработки 30.09.2024 г.; принята к публикации 30.09.2024 г.

Представлены результаты исследования черенковского монитора протонных пучков с большим импульсным током. Для пучков протонов с энергией 160 МэВ и импульсным током 4 мА получено хорошее согласие измерений монитора с данными индукционного датчика тока. Проведены стендовые измерения координаты положения светового потока, имитирующего световой образ протонного пучка в радиаторе двухкоординатного монитора. Представлен анализ алгоритмов восстановления координаты положения светового пучка с результатами моделирования монитора.

Ключевые слова: черенковский монитор, индукционный датчик тока, стендовые измерения

DOI: 10.31857/S0044002725010197, **EDN:** GQGCZA

1. ВВЕДЕНИЕ

Работа посвящена разработке монитора протонных пучков для прикладных задач, в том числе использования в лучевой терапии. Основные требования к монитору: широкий диапазон интенсивности пучка, включая режимы флэш-терапии; возможность онлайн-контроля профиля и положения пучка; нечувствительность к электромагнитному фону; высокая прозрачность монитора для быстрых протонов. Лучевая терапия с использованием пучков протонов сверхвысокой интенсивности является перспективным направлением повышения эффективности лучевой терапии новообразований. Это связано с так называемым флэш-эффектом, который заключается в избирательном разрушении опухолевых клеток при сверхвысокой мощности дозы [1]. Одним из условий для дальнейшего развития в этом направлении является разработка детекторов для on-line контроля подведенной к мишени дозы и положения пучка протонов. Ионизационные камеры обладают линейностью показаний только в области относительно малых импульсных токов. Индукционные датчики тока, наоборот, лучше работают в области больших импульсных токов, но их показания могут искажаться вкладом низкоэнергетического электромагнитного фона, и эти детекторы обычно не дают информацию о положении пучка. В настоящее время еще не выбран оптимальный детектор для флэш-терапии, который бы обладал высокой радиационной стойкостью, сохранял линейность в

максимально широком диапазоне тока протонов и позволял определять on-line поглощенную дозу и положение пучка без искажения пучка материалом самого детектора. Цель настоящей работы — разработка позиционно-чувствительного монитора, работающего в широком диапазоне интенсивностей и длительностей импульса протонного пучка, в условиях сильного низкоэнергетического электромагнитного фона. Монитор позволяет измерять в on-line режиме временную структуру, число протонов и положение центра пучка в каждом отдельном импульсе протонного пучка. Монитор предназначен для работы на медицинском канале центра коллективного пользования ИЯИ РАН в широком диапазоне интенсивностей протонного пучка. Конструкция монитора протонного пучка, предложенная в работе [2], позволяет преобразовать монитор в позиционно-чувствительный детектор заменой фотоумножителя (XP2020) на позиционно-чувствительный многоканальный кремниевый фотоумножитель (SiPM).

Ускоритель протонов с энергией 105–269 МэВ работает в диапазоне частот 1–50 Гц, в широком диапазоне интенсивностей протонного пучка от малых импульсных токов от 0.1 до 10 мА, при этом длительность импульса протонов находится в диапазоне от 0.3 до 100 мкс. Такой широкий спектр режимов работы ускорителя очень важен для проведения радиобиологических исследований в области флэш-терапии и для других прикладных задач. Рассматриваемый черенковский монитор предназначен для использования во всем указанном диапазоне интенсивностей протонного пучка, он не регистрирует фо-

¹⁾ Институт ядерных исследований РАН, Троицк, Россия.

* E-mail: akulenic@inr.ru

тоны и электроны с энергией ниже 170 кэВ, что важно для подавления вклада низкоэнергетического фона. В работе [3] представлены результаты калибровочных измерений черенковского монитора протонного пучка с импульсным током до 10 мкА, соответствующим конвенциональному режиму облучения. Там было получено хорошее согласие измерений монитора с показаниями ионизационной камеры и пленочного детектора, радиохромной пленки EBT-XD (Gafchromic, США). Пленочный детектор измеряет интегральную поглощенную дозу, но он не может работать в режиме on-line. Известные электронные детекторы, такие как ионизационные камеры [4, 5] и индукционные датчики тока (ИДТ) [6] не могут работать во всем диапазоне интенсивностей данного ускорителя. Ионизационные камеры хорошо работают в области сравнительно малых токов до 10 мкА. При больших токах в ионизационных камерах возникают нелинейные эффекты, связанные пространственным зарядом и рекомбинацией ионов. ИДТ хорошо работают в области сравнительно больших токов выше 10 мкА. В показания этих детекторов вносит вклад и низкоэнергетический электромагнитный фон, к тому же ИДТ обычно не контролируют положение пучка. Рассматриваемый монитор измеряет черенковский свет, излучаемый δ -электронами, образованными протонами в тонком стеклянном радиаторе монитора. Протоны с энергией 209 МэВ излучают в среднем 0.5 фотона/протон [2] в области чувствительности спектра фотоумножителя XP2020. Протоны с энергией больше 310 МэВ могут непосредственно излучать черенковский свет в стеклянном радиаторе с показателем преломления, равным 1.5. Поглощенная доза в веществе детекторов и черенковское излучение электронов пропорциональны количеству регистрируемых протонов.

2. ОПИСАНИЕ И КАЛИБРОВКА ДВУХКООРДИНАТНОГО МОНИТОРА

Одним из важных преимуществ рассматриваемого монитора по сравнению с индукционным датчиком тока является возможность контроля положения пучка в реальном времени. Конструкция монитора [2] позволяет преобразовать монитор в позиционно-чувствительный детектор заменой ФЭУ (XP2020) на позиционно-чувствительный кремниевый фотоумножитель (SiPM), также известный как многопиксельный счетчик фотонов (MPPC). Этот детектор становится популярным в приложениях, где необходимо регистрировать даже одиночные фотоны.

В настоящей работе использовался Hamamatsu S12573-050C [7], состоящий из 4 SiPM с размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$, расположенных компактно на одной подложке.

Принцип определения положения пучка протонов по световому пятну, образуемому пучком в радиаторе за счет черенковского излучения, представлен на рис. 1а. Протонный пучок в проведенных экспериментах был расфокусирован и имел диаметр около 50 мм, необходимый для облучения планшетов с клетками и других биологических образцов. Профиль протонного пучка в радиаторе диаметром 50 мм преобразуется в пучок света диаметром $\sim 5 \text{ мм}$ на уровне SiPM.

Схема стенда для измерения координаты положения светового пучка, имитирующего световой образ протонного пучка в радиаторе двухкоординатного монитора, показана на рис. 1б. Световой пучок образуется с помощью светодиода (LED) и коллиматора диаметром 3 мм. При этом фотодетектор SiPM может передвигаться относительно коллиматора в одном направлении (X) на расстояние 10 мм. Для координатных измерений фотоэлементы объединялись в две группы по два элемента. Тем самым фотодетектор имеет два фотоэлемента (Pixel-1, Pixel-2) размером 3 мм по оси X и 6 мм по другой оси. Pixel-1 объединяет фотоэлемент 1 и 3, и Pixel-2 объединяет фотоэлемент 2 и 4. На рис. 1б показано: положение центра светового пучка (X_p); размер пикселя $D = 3 \text{ мм}$; координаты левого (X_L) края Pixel-1; центра положения между фотоэлементами (X_s); правого (X_R) края Pixel-2; A_1 и A_2 — амплитуды сигналов от элементов Pixel-1 и Pixel-2 соответственно.

Следует отметить, что размер светового потока выбирался сравнимым с размером пикселя $\sim 3 \text{ мм}$ таким образом, чтобы световой поток, направленный в центр пикселя, практически полностью (95%, 4σ) регистрировался. По результатам измерений на стенде сигналов A_1 и A_2 от фотоэлементов Pixel-1 и Pixel-2 проведена реконструкция координат положения светового пучка для двух алгоритмов реконструкции (AVR и EXP). Алгоритм AVR — восстановление координаты по методу центра тяжести. Формула для восстановления координаты имеет вид $X_{\text{гес}} = (A_1 X_{c1} + A_2 X_{c2}) / \Sigma A_i$, где A_i , X_{c_i} — амплитуда и координата центра фотоэлемента. В частном случае, когда амплитуды равны ($A_1 = A_2$), реконструированная координата по методу центра тяжести равна $X_s = 0.5(X_{c1} + X_{c2})$ и определяет координату положения между фотоэлементами. В процедуре EXP [8] используется предположение, что распределение интенсивности в световом пучке имеет форму Гаусса и формула для восстановления координаты имеет вид $X_{\text{гес}} = X_s +$

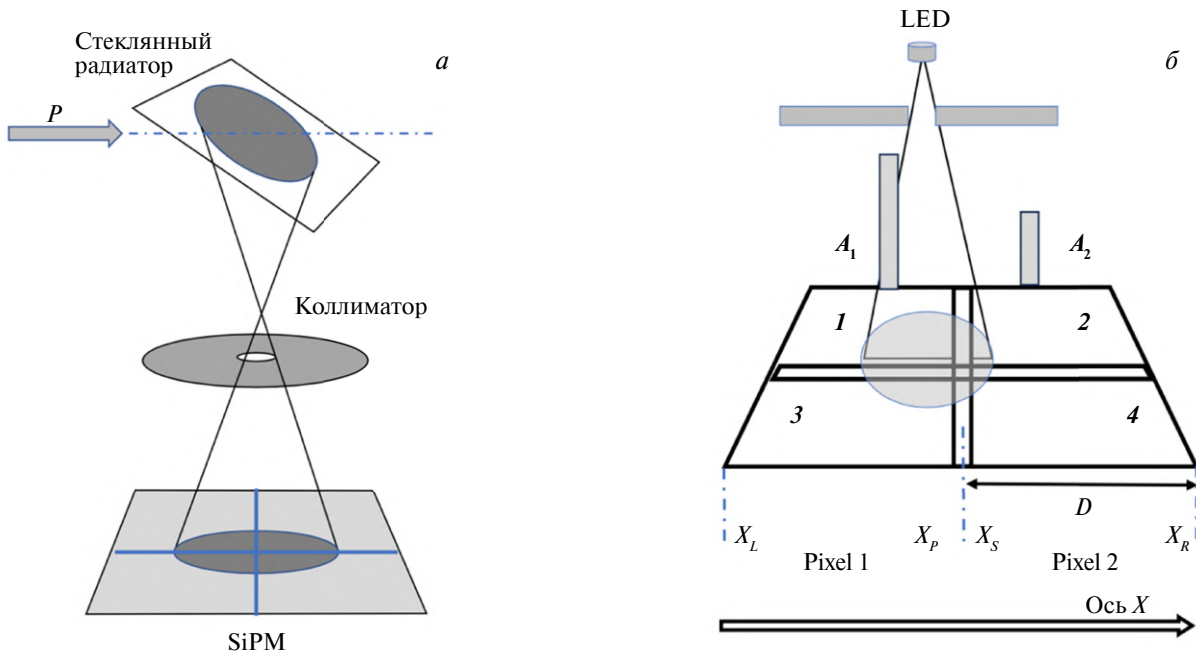


Рис. 1. *a* – Схема позиционно-чувствительного монитора и его расположение на протонном пучке P ; *б* – схема стенда для измерения координаты положения светового луча в четырехканальной матрице SiPM: X_P – положение центра светового пучка; Pixel-1 объединяет фотоэлемент 1 и 3, Pixel-2 объединяет фотоэлемент 2 и 4; X_L , X_R и X_S – координаты соответствующих краев фотоэлементов и центра матрицы; A_1 и A_2 – амплитуды сигналов от элементов Pixel-1 и Pixel-2 соответственно.

$+ b \log(A_2/A_1)$, где параметр b связан с шириной распределения Гаусса (σ) соотношением $b \sim 0.5\sigma$.

Зависимость реконструированной координаты X_{rec} светового пучка от реального положения светового потока X (горизонтальная ось) для двух алгоритмов реконструкции (AVR, EXP) показана на рис. 2. Для сравнения качества алгоритмов AVR и EXP сравниваются с идеальным алгоритмом LIN, которому соответствует прямая линия, уравнение которой выглядит следующим образом: $X_{\text{rec}} = X$ (см. рис. 2). Как видно из рис. 2, алгоритмы AVR и EXP восстановления координат X_{rec} имеют максимальное отклонение от идеального случая, равное ± 0.5 мм в пределах положения светового потока ± 1.5 мм от центра SiPM. Следует отметить, что ширина светового потока составляет величину, равную 3 мм.

Световой образ пучка протонов диаметром 50 мм преобразуется в световой луч шириной 5 мм в плоскости фотодетектора SiPM (см. рис. 1а). Для работы с таким более широким световым пучком можно использовать те же матрицы Hamamatsu S12573-050C с объединением всех четырех фоточувствительных элементов в каждом устройстве. Для этого планируется использовать четыре матрицы S12573-050C с объединением фоточувствительных элементов. В этом случае размер фоточувствительного эле-

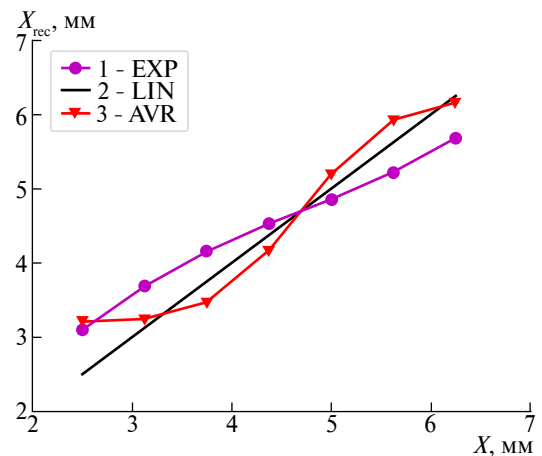


Рис. 2. Зависимость реконструированной координаты X_{rec} светового пучка от реального положения светового потока X (горизонтальная ось) для двух алгоритмов реконструкции (AVR, EXP). Прямая линия (LIN) соответствует идеализированному случаю $X_{\text{rec}} = X$.

мента будет равен $6 \times 6 \text{ мм}^2$ и сравним с размером светового луча от протонного пучка.

3. КАЛИБРОВОЧНЫЕ ИЗМЕРЕНИЯ НА ПРОТОННОМ ПУЧКЕ

Калибровочные измерения монитора протонного пучка Ch проводились на медицинском ка-

нале центра коллективного пользования ИЯИ РАН вместе с индукционным датчиком тока протонного пучка. Индукционный датчик тока (ID) протонного пучка расположен в вакуумном канале пучка примерно в 15 м от мишени, помещенной в водный фантом MP3-P T41029 (PTW, Германия) размером $448 \times 480 \times 350$ мм³ (рис. 3), в котором протоны останавливаются в области S .

Детектор Ch устанавливался в воздушном зазоре по центру протонного пучка перед фантомом. Детекторы Ch и ID измеряют мгновенный ток во времени для каждого импульса протонов. Интегрирование тока по времени дает заряд, пропорциональный числу протонов для каждого импульса.

Форма сигнала с детекторов Ch и ID измерялась с помощью четырехканального 12-битного преобразователя CAEN DT5720 waveform digitizer [9], работающего на частоте 250 МГц (рис. 4). Оцифровка сигналов производилась после прихода стартового сигнала от ускорителя в 65536 точках каждые 4 нс. Временной интервал измерения составлял величину, равную 262.14 мкс. При этом передний фронт протонного импульса начинался в районе 130 мкс, что позволяет проводить измерения протонного импульса длительностью до 130 мкс. Измерение нулевой линии (пьедестал) преобразователя CAEN проводилось в интервале от 0 до 100 мкс, что исключало появления сигналов от протонов. Интегрирование протонного импульса тока проводилось в интервале от 130 до 230 мкс. Для каждого протонного импульса определялись среднее и среднеквадратическое отклонения (δ_p) пьедестала на основании $N_p = 2.5 \times 10^4$ измерений в интервале 100 мкс.

Суммарный заряд Q в одном событии можно выразить в упрощенной форме как произведение двух случайных величин N и усредненное уси-

ние G_{avr} следующим образом:

$$Q = e \sum_{i=1}^N G_i = eN \sum_{i=1}^N G_i / N = eNG_{avr},$$

где e — заряд электрона, G_i — усиление для i -го фотоэлектрона, N — число фотоэлектронов.

Относительная флуктуация регистрируемого заряда Q зависит от флуктуации числа фотоэлектронов N и флуктуации усиления фотоумножителя следующим образом:

$$\left(\frac{\delta Q}{Q}\right)^2 = \frac{1}{N} + (\delta G_{avr}/G_{avr})^2 = \left(1 + \left(\frac{\delta G_1}{G_{avr}}\right)^2\right) / N.$$

Относительная дисперсия усиления $\delta G_1/G_{avr}$ может быть измерена при регистрации одиночных фотоэлектронов. Известно, что относительная дисперсия усиления SiPM меньше, чем для ФЭУ. Для консервативной оценки точности измерения заряда можно взять измеренную в работе [2] относительную дисперсию усиления ФЭУ, которая составляет величину, равную 0.6. Число фотоэлектронов, регистрируемых SiPM в интервале времени ~ 20 мкс, для импульсного тока протонного пучка, равного 1 мА, составляет около 2×10^4 [2]. Таким образом, можно оценить вклад в ошибку при измерении заряда вследствие флуктуаций числа фотоэлектронов величиной, равной $\delta Q/Q \sim 10^{-2}$. Относительная точность измерения детектором ID составляет величину $\sim 2\%$. Суммарные значения заряда детекторов Ch и ID для всей фракции облучения, состоящей из одного импульса, измеряются в условных единицах (у.е.).

Результаты измерений поглощенной дозы детекторами Ch и ID для шести фракций облучения (F1–F6) со средним импульсным током ~ 4 мА представлены в табл. 1. Облучение биологических мишеней с таким током протонов представляет особый интерес для исследования флэш-эффекта в лучевой терапии. Этот режим облучения, когда фракция облучения состоит из одного импульса, позволяет получить рекордную для протонов мощность дозы. Например, для мишени массой $m = 0.2$ кг, поглотившей все протоны с энергией $E_p = 160$ МэВ $= 2.56 \times 10^{-11}$ Дж и током $I = 4$ мА, среднюю за фракцию мощность дозы $\dot{D}$ можно оценить следующим образом. Количество протонов, поглощенных в мишени за фракцию из одного импульса длительностью $T = 10$ мкс, составит $N = 2.4 \times 10^{11}$ протонов. Их поглощенная энергия составит $E_{abs} = NE_p = 6.1$ Дж. Следовательно, в этом случае мощность дозы составит $\dot{D} = E_{abs}/(T \cdot m) \sim 3 \times 10^6$ Гр/с. Как бы-

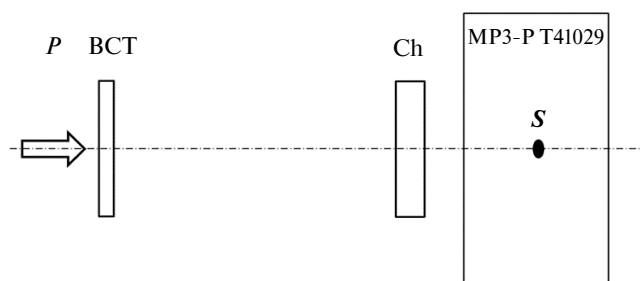


Рис. 3. Схема расположения индукционного датчика тока протонов (ID) и черенковского монитора (Ch) на пучке протонов (P), S — место остановки протонов в фантоме.

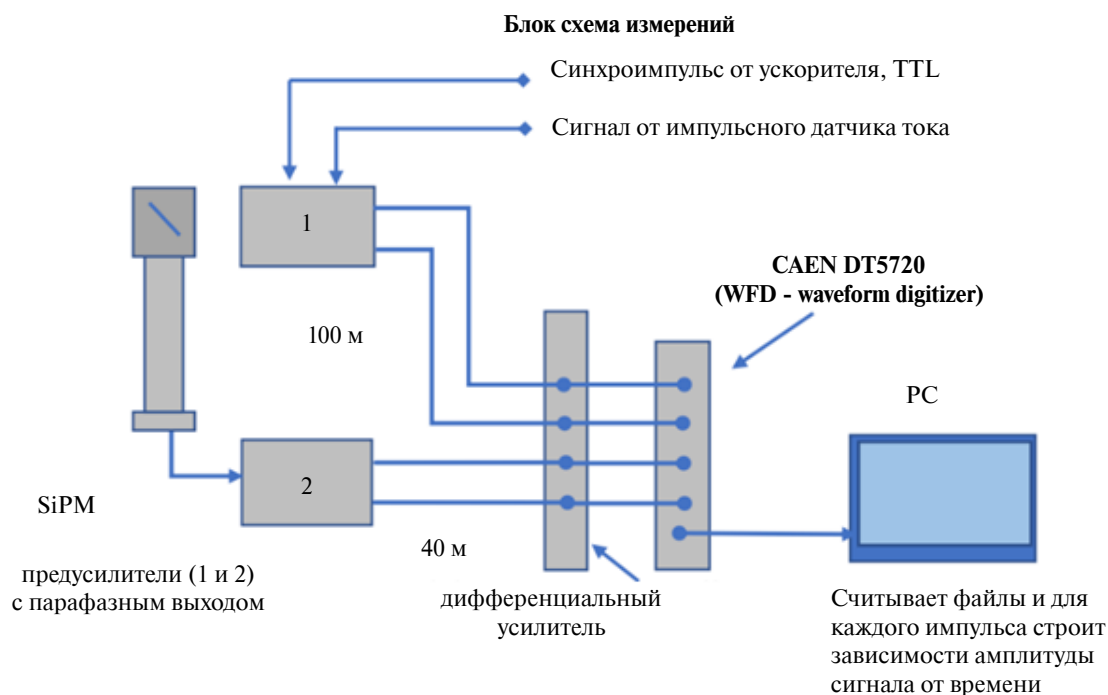


Рис. 4. Схема измерений с детекторами ID и Ch на пучке протонов (P) с энергией 160 МэВ.

Таблица 1. Результаты измерений поглощенной суммарной дозы ионизирующего излучения детекторами (ID и Ch) в шести фракциях облучения одним импульсом, T — длительность протонного импульса

Фракция	Ток, мА	ID, заряд, усл. ед.	Ch, заряд, усл. ед.	T , мкс
$F1$	3.1	0.22	0.23	10
$F2$	4.3	0.74	0.78	20
$F3$	4.5	1.4	1.51	30
$F4$	4.2	1.87	1.97	40
$F5$	4.5	2.67	2.88	50
$F6$	4.1	2.65	2.77	60

ло показано в работе [10], при облучении биологических объектов в таком режиме, названном “сплэш” (от splash, single-pulse-flash), наблюдаются новые биологические эффекты. Измеренный детекторами Ch и ID заряд, который получается путем интегрирования мгновенного тока детектора для каждого протонного импульса, пропорционален числу протонов за фракцию облучения, а при неизменной энергии и других параметрах пучка протонов — пропорционален поглощенной в мишени дозе.

На рис. 5 показан график зависимости показаний черенковского монитора Ch от заряда, измеренного индукционным датчиком тока ID за каждый импульс ускорителя. Результат аппроксимации измерений линейной зависимостью показан прямой линией. Ошибки измерений не превышают размеры экспериментальных точек на графике.

Показания быстрых электронных мониторов ID и Ch (см. рис. 5) хорошо согласуются между собой, что говорит о линейной зависимости показаний черенковского монитора (Ch) от показаний индукционного датчика тока ID. При этом датчик тока ID находился в глубоком вакууме в канале транспортировки пучка, а монитор Ch — на воздухе вблизи мишени. Этот результат подтверждает, что черенковский монитор протонов может быть использован для on-line контроля поглощенной дозы в протонной флэш-терапии.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования позиционно-чувствительного черенковского монитора протонного пучка. Для дальнейшего его использования при контроле в реальном времени положения и профиля пучка протонов представлен сравнительный анализ алгоритмов восста-

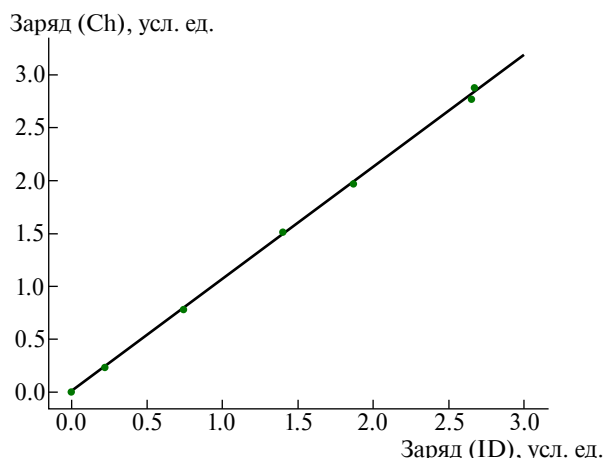


Рис. 5. Зависимость показаний черенковского монитора (Ch) от показаний индукционного датчика тока (ID) для каждой фракции в одноимпульсном режиме облучения (сплэш) и ее аппроксимация прямой линией.

новления координаты положения светового пучка с использованием результатов моделирования монитора. Проведены стендовые измерения координаты положения светового пучка, имитирующего световой образ протонного пучка в радиаторе двухкоординатного монитора. Также проведены испытания монитора на пучках протонов со средним током около 4 мА. Получено хорошее согласие измерений монитора на протонном пучке с показаниями индукционного датчика тока в режимах облучения с рекордно высокой для протонов мощностью дозы. Результаты работы подтвердили перспективность применения нового монитора в протонной флэш-терапии.

БЛАГОДАРНОСТИ

Выражаем благодарность Д.А. Коконцеву, Г.В. Мерзликину, А.Б. Неганову, И.И. Ткачеву

и И.А. Яковлеву за содействие в проведении исследований.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 24-15-00040 “Разработка ядерно-физических и радиобиологических методов протонной флэш-терапии”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. V. Favaudon, L. Caplier, V. Monceau, F. Pouzoulet, M. Sayarath, C. Fouillade, M.-F. Poupon, I. Brito, P. Hupé, J. Bourhis, J. Hall, J.-J. Fontaine, and M.-C. Vozenin, *Sci. Transl. Med.* **6**(245), 245ra93 (2014).
2. R. M. Djilkibaev, *Instrum. Exp. Tech.* **64**, 508 (2021).
3. S. V. Akulinichev, Yu. K. Gavrilov, and R. M. Djilkibaev, *Instrum. Exp. Tech.* **66**, 365 (2023).
4. J. W. Boag, *Ionization Chamber in Radiation Dosimetry* (Press Academic, New York, 1968).
5. А. И. Абрамов, Ю. А. Казанский, Е. С. Матусевич, *Основы экспериментальных методов ядерной физики* (Атомиздат, Москва, 1970).
6. А. Ф. Дьяченко, *Вестн. Харьков. ун-та. Сер. физ.* **887** (1,45), 118 (2010).
7. Hamamatsu Photonics, www.hamamatsu.com
8. G. A. Akopdjanov, A. V. Inyakin, V. A. Kachanov, R. N. Krasnokutsky, A. A. Lednev, Yu. V. Mikhailov, Yu. D. Prokoshkin, E. A. Razuvaev, and R. S. Shuvalov, *Nucl. Instrum. Methods* **140**, 441 (1977).
9. DT5720, CAEN DT5720, 4 channels 12 bit waveform digitizer, www.caen.it
10. S. V. Akulinichev, Yu. K. Gavrilov, S. I. Glukhov, A. V. Ivanov, D. A. Kokontsev, T. M. Kulinich, E. A. Kuznetsova, V. V. Martynova, and I. A. Yakovlev, *Bull. Russ. Acad. Sci.: Phys.* **87**, 1221 (2023).

POSITION-SENSITIVE CHERENKOV MONITOR OF HIGH-INTENSITY PROTON BEAMS

© 2025 S. V. Akulinichev¹⁾, Yu. K. Gavrilov¹⁾, R. M. Djilkibaev¹⁾

¹⁾Institute for Nuclear Research RAS, Troitsk, Russia

The results of the study of the Cherenkov monitor of proton beams with a high pulse current are presented. For proton beams with an energy of 160 MeV and a pulse current of 4 mA, good agreement was obtained between the monitor measurements and the data of the beam current transformer. Bench measurements of the position coordinate of the light flux simulating the light image of the proton beam in the radiator of the 2-coordinate monitor were carried out. An analysis of the algorithms for restoring the position coordinate of the light beam with the results of the monitor simulation is presented.