

ФИЗИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ ДЛЯ ЭКОЛОГИИ, МЕДИЦИНЫ, БИОЛОГИИ

УДК 539.1.074

ПОЗИЦИОННО-ЧУВСТВИТЕЛЬНЫЙ ЧЕРЕНКОВСКИЙ МОНИТОР ПРОТОННОГО ПУЧКА

© 2024 г. С. В. Акулиничев^{a, b}, Ю. К. Гаврилов^a, Р. М. Джилкибаев^{a, *}

^aИнститут ядерных исследований Российской академии наук
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 02.11.2023 г.

После доработки 28.03.2024 г.

Принята к публикации 17.06.2024 г.

Представлены результаты исследования нового черенковского монитора протонных пучков с большим импульсным током. Для пучков протонов с энергией 160 МэВ и импульсным средним током 1 мА получено хорошее согласие измерений монитора с данными пленочного детектора Gafchromic и индукционного датчика тока. Проведены стендовые измерения координаты положения светового потока, имитирующего световой образ протонного пучка в радиаторе двухкоординатного монитора. Представлен сравнительный анализ алгоритмов восстановления координаты положения светового пучка с результатами моделирования монитора.

DOI: 10.31857/S0032816224050172 EDN: ER0TST

1. ВВЕДЕНИЕ

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 онлайн-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 вкладам низкоэнергетичного электромагнитного фона, и эти детекторы обычно не дают инфор-

мации о положении пучка. В настоящее время еще не выбран оптимальный детектор для флэш-терапии, который обладал бы высокой радиационной стойкостью, сохранял линейность в максимально широком диапазоне тока протонов и позволял определять поглощенную дозу в онлайн-режиме и положение пучка без искажения пучка материалом самого детектора. Цель данной работы – разработка позиционно-чувствительного монитора, работающего в широком диапазоне интенсивностей и длительностей импульса протонного пучка, в условиях сильного низкоэнергетичного электромагнитного фона. Монитор позволит измерять в онлайн-режиме временную структуру, число протонов и положение центра пучка в каждом отдельном импульсе протонного пучка. Монитор протонного пучка предназначен для работы на медицинском канале центра коллективного пользования ИЯИ РАН в широком диапазоне интенсивностей протонного

пучка. Конструкция черенковского монитора протонного пучка, предложенная в работе [2], позволяет преобразовать монитор в позиционно-чувствительный детектор путем замены 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 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 низкоэнергетичного электромагнитного фона. В работе [3] представлены результаты калибровочных измерений черенковского монитора протонного пучка с импульсным током до 10 мкА, соответствующим конвенциональному режиму облучения. Было получено хорошее согласие измерений монитора с показаниями ионизационной камеры и пленочного детектора радиохромной пленки Gafchromic EBT [4]. Монитор не регистрирует фотоны и электроны с энергией ниже 170 кэВ, что важно для подавления вклада низкоэнергетичного фона. Пленочный детектор измеряет интегральную дозу и не может работать в режиме онлайн. Известные электронные детекторы, такие как ионизационные камеры [5–7] и индук-

ционные датчики тока [8, 9] 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 хорошо работают в области сравнительно больших токов выше 10 мкА. Ионизационная камера и пленочный детектор измеряют поглощенную дозу ионизирующего излучения. Черенковский 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 пропорциональны количеству регистрируемых протонов.

2. ОПИСАНИЕ И КАЛИБРОВКА ДВУХКООРДИНАТНОГО МОНИТОРА

Конструкция монитора [2] (см. рис. 1а) позволяет преобразовать монитор в позиционно-чувствительный детектор заменой ФЭУ (XP2020)

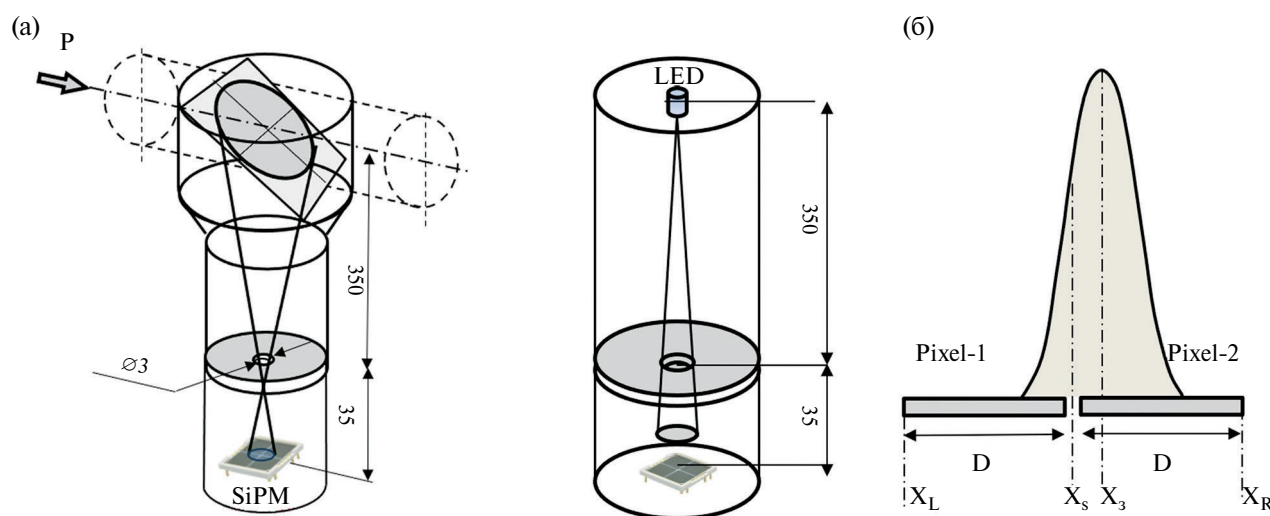


Рис. 1. а – Схематическое устройство двухкоординатного Ch монитора и расположение Ch на протонном пучке (размеры указаны в мм); б – схема стенда для измерения координаты положения светового луча, имитирующего световой образ протонного пучка в четырехканальной матрице SiPM.

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 данной работе использовался Hamamatsu S12573–050C [10], состоящий из 4 SiPM с размером $3 \times 3 \text{ мм}^2$, расположенных компактно на одной подложке.

На рис. 1а показано схематическое устройство двухкоординатного Ch-монитора и расположение Ch на протонном пучке. Протонный пучок расфокусирован и имеет диаметр порядка 50 мм, необходимый для облучения кассет с исследуемыми материалами. Фотодетектор SiPM находился за коллиматором диаметром 1.5 мм на расстоянии 35 мм. Таким образом профиль протонного пучка в радиаторе диаметром 50 мм преобразуется в пучок света диаметром около 5 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, установленного на расстоянии 350 мм от LED. 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 (Pixel1, Pixel2) размером 3 мм по оси X и 6 мм по другой оси. На рис. 1б по горизонтальной оси X показано положение центра светового пучка (X_p), размер пикселя ($D = 3 \text{ мм}$) и координаты левого (X_L) края Pixel1, центра положения между фотоэлементами (X_s) и правого (X_R) края Pixel2.

Предполагая, что распределение интенсивности в световом пучке имеет форму Гаусса, можно выразить амплитуды сигналов от фотоэлементов Pixel1 и Pixel2 в зависимости от положения пучка (X_p) следующим образом:

$$\begin{aligned} F_1(X_p) &= \frac{C}{\sigma} \int_{X_L}^{X_s} \exp\left(-\frac{(x - X_p)^2}{2\sigma^2}\right) dx; \\ F_2(X_p) &= \frac{C}{\sigma} \int_{X_s}^{X_R} \exp\left(-\frac{(x - X_p)^2}{2\sigma^2}\right) dx. \end{aligned} \quad (1)$$

Следует отметить, что размер светового пучка выбирался сравнимым с размером пикселя равным примерно 3 мм таким образом, чтобы световой поток, направленный в центр пикселя, практически полностью (95%, 4σ) регистрировался. Результаты измерений сигналов A_1 и A_2 в зависимости от положения светового пучка показаны на рис. 2. При этом по горизонтальной оси X показано положение светового пучка. По вертикальной оси A (слева) показаны амплитуды (A_1, A_2) сигналов. Используя измеренные данные (A_1, A_2) и метод наименьших квадратов, можно определить параметр σ в распределения (1). На рис. 2 показаны распределения F_1 и F_2 , полученные в результате процедуры аппроксимации измеренных данных, приведенными выше (1), зависимостями $F_1(X_p)$ и $F_2(X_p)$. При этом параметр σ для распределений F_1 и F_2 равен $\sigma_1 = 0.66 \text{ мм}$ и $\sigma_2 = 0.65 \text{ мм}$ соответственно. По вертикальной оси X_{rec} (справа) на рис. 2 показаны реконструированные координаты X_{rec} положения светового пучка для двух алгоритмов реконструкции (AVR, EXP). Алгоритм AVR – восстановление координаты по методу центра тяжести. Формула для восстановления координаты имеет вид

$$X_{\text{rec}} = (A_1 X_{c1} + A_2 X_{c2}) / \Sigma A_i,$$

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 [11] используется предположение, что распределение интенсивности в световом пучке имеет форму Гаусса и формула для восстановления координаты имеет вид $X_{\text{rec}} = X_s + b \ln(A_2/A_1)$, где параметр b связан с шириной распределения Гаусса (σ) следующим образом $b \sim 0.5\sigma$. На рис. 2 для сравнения качества алгоритмов (AVR, EXP) приводится прямая линия (LIN), уравнение которой выглядит следующим образом: $X_{\text{rec}} = X$.

При этом линейное восстановление координат X_{rec} возможно в интервале порядка ширины светового луча (3мм) при условии, что диаметр луча (3мм) сравним с размером фотоэлемента (3мм). 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

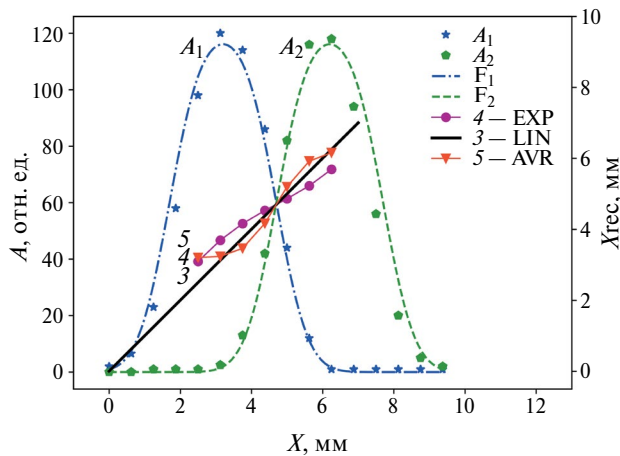


Рис. 2. Зависимость измеренных амплитуд сигналов A_1 и A_2 , от положения светового луча. Кривые F_1 и F_2 получены в результате процедуры аппроксимации измеренных данных A_1 и A_2 , зависимостями (1) $F_1(X_p)$ и $F_2(X_p)$. Правая вертикальная ось X_{rec} используется для отображения зависимости реконструированной координаты светового потока от реального положения потока для двух алгоритмов реконструкции (AVR, EXP). Прямая линия (LIN) соответствует $X_{\text{rec}} = X$.

световым пучком можно использовать те же Hamamatsu S12573–050C с объединением всех четырех фоточувствительных элементов в каждом устройстве. В следующем мониторе планируется использовать четыре S12573–050C с объединением фоточувствительных элементов. В этом случае размер фоточувствительного элемента 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 черенковского монитора Ch протонного пучка проводились

на медицинском канале центра коллективного пользования ИЯИ РАН в сравнении с индукционным датчиком тока протонного пучка и калиброванным пленочным детектором (RF) Gafchromic EBT-XD [3]. Индукционный датчик тока (ID) протонного пучка расположен в вакуумном канале пучка примерно в 15 м от мишени – водного фантома MP3-P T41029 размером $448 \times 480 \times 350 \text{ мм}^3$, в котором останавливаются протоны. Схема расположения детекторов на пучке протонов с энергией 160 МэВ, показана на рис. 3. При этом протоны останавливаются в водном фантоме в области S.

Детекторы Ch и RF устанавливались в воздушном зазоре по центру протонного пучка перед фантомом. В лучевой терапии каждый отдельный этап облучения, в течение которого к опухоли подводится заданная врачом разовая доза, принято называть фракцией облучения. Фракция облучения определяется режимом работы ускорителя, в котором задается энергия ускоренных протонов, средний импульсный ток и длительность импульса, число протонных импульсов.

Детектор RF измеряет суммарную дозу во фракции от всех импульсов протонов и откалиброван в единицах Грэй. Детекторы Ch и ID измеряют импульс тока во времени для каждого импульса протонов. Интегрирование импульса тока по времени дает заряд, пропорциональный числу протонов для каждого импульса. Форма сигнала с детекторов Ch и ID измерялась с помощью четырехканального 12-битового преобразователя CAEN DT5720 waveform digitizer [12], работающего на частоте 250 МГц. Оцифровка сигналов проводилась после прихода стартового сигнала от ускорителя в 65536 точках каждые 4 нс. Временной интервал измерения составлял

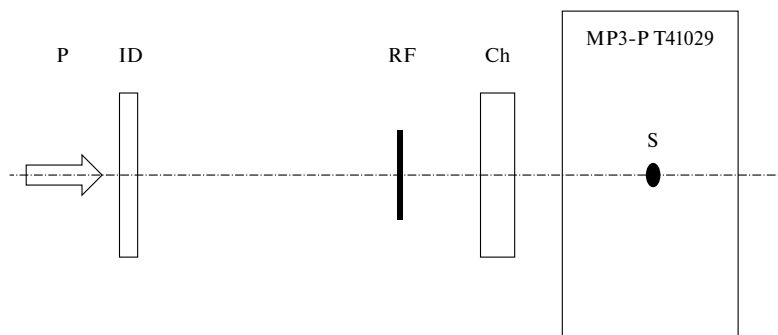


Рис. 3. Схема расположения детекторов (ID, RF, Ch) на пучке протонов (P) с энергией 160 МэВ, протоны останавливаются в водном фантоме MP3-P в области S.

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. Измерения нулевой линии (пьедестал) преобразователя САЕН проводилось в интервале от 0 до 100 мкс, что исключало появления сигналов от протонов. Интегрирование протонного импульса тока осуществлялось в интервале от 130 до 230 мкс. Для каждого протонного импульса определялись среднее и среднеквадратическое отклонение (δ_p) пьедестала на основании $N_p = 2.5 \cdot 10^4$ измерений в интервале 100 мкс. Таким образом, можно оценить вклад в ошибку при измерении “нулевого” заряда вследствие флуктуаций шума, величиной равной $\sqrt{N_p \cdot \delta_p}$. Среднее и среднеквадратическое отклонение при измерении “нулевого” заряда составляет величину 0 ± 0.003 отн. ед. Суммарный заряд Q в одном событии можно выразить в упрощенной форме, как произведение двух случайных величин N и усредненное усиление G_{avr} SiPM. 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 $\delta G_1 / G_{avr}$ SiPM 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. Оценка числа фотоэлектронов, регистрируемых SiPM в интервале времени около 20 мкс для импульсного тока протонного пучка равного 1 мА, составляет величину порядка $2 \cdot 10^4$ [2]. Таким образом, можно оценить вклад в ошибку при измерении заряда вследствие флуктуаций числа фотоэлектронов величиной, равной $\delta Q / Q \sim 10^{-2}$.

Результаты измерений поглощенной дозы детекторами Ch, ID и RF для двух режимов (F1, F2) работы ускорителя со средним импульсным током 1 мА представлены в табл. 1. Относительная точность измерения детекторами RF и ID составляет величину около 1–2%. Суммарные значения заряда детекторов Ch и ID для всей фракции облучения, состоящей из 20 импульсов, измеряются в относительных единицах, T – длительность протонного импульса.

Измеренная детекторами Ch и ID доза пропорциональна заряду, который получается путем интегрирования импульса тока детектора для каждого протонного импульса. На рис. 4а показан график зависимости измерений суммарной дозы индукционного датчика тока от дозы, измеренной калиброванным пленочным детектором RF для двух фракций, в которых менялась длительность импульса протонов. Результат аппроксимации измерений линейной зависимостью показан прямой линией. Ошибки измерений не превышают размеров экспериментальных точек на графике.

Отклонение этой зависимости от прямой линии характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0.998$, что подтверждает пропорциональность показаний RF и ID.

Коэффициент детерминации $R^2 = 1 - \sum (y_i - \bar{y})^2 / \sum (y_i - y_a)^2$ показывает степень отклонения измерений от линейной зависимости $\{f_i\}$, где y_a – среднее значение измерений $\{y_i\}$.

График зависимости измерений суммарной дозы в мониторе Ch от индукционного датчика тока ID показан на рис. 4б. Результат аппроксимации измерений линейной зависимостью

Таблица 1. Результаты измерений поглощенной суммарной дозы ионизирующего излучения детекторами (Ch, ID и RF) в двух режимах работы ускорителя

Фракция	RF, доза, Гр	ID, заряд, отн. ед.	Ch, заряд, отн. ед.	T , мкс	N , число импульсов
F1	3.7	4.7	5.3	15	20
F2	9.0	10.5	12.6	30	20

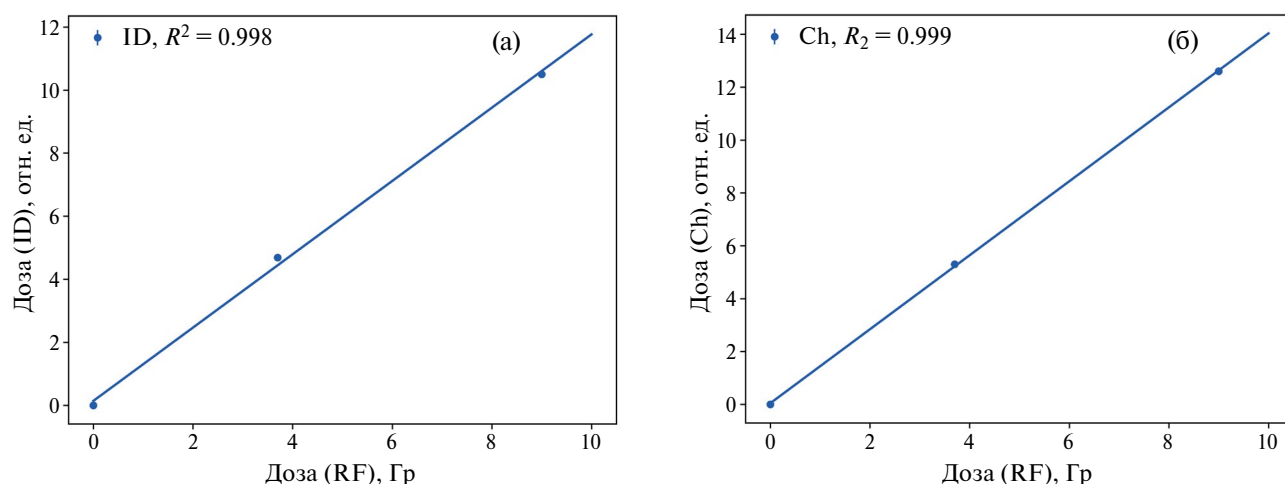


Рис. 4. а – График зависимости измерений суммарной дозы импульсным датчиком тока ID от дозы пленочного детектора RF; б – график зависимости измерений суммарной дозы в мониторе Ch от дозы пленочного детектора RF. Результаты аппроксимации измерений линейной зависимостью показаны прямой линией.

показан прямой линией. Отклонение измерений суммарной дозы в мониторе Ch от прямой линии характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0.999$. Линейная зависимость суммарной дозы в черенковском мониторе Ch от показаний пленочного детектора RF говорит о том, что эти детекторы хорошо согласуются между собой. Это подтверждает линейность показаний черенковского монитора и его применимость для расчета поглощенной дозы при высоких значениях импульсного тока протонов. Тем самым получена калибровка показаний индукционного датчика тока и монитора в единицах Грэй.

На рис. 5 показан график зависимости показаний черенковского монитора Ch от дозы, измеренной индукционным датчиком тока ID за каждый импульс ускорителя. Результат аппроксимации измерений линейной зависимостью показан прямой линией. Ошибки измерений не превышают размеров экспериментальных точек на графике. Отклонение показаний монитора Ch от линейной зависимости характеризуется коэффициентом детерминации $R^2 = 0.9996$. Это говорит о строгом линейном соответствии показаний черенковского монитора и ID.

Показания быстрых электронных мониторов ID и Ch хорошо согласуются между собой. Черенковский монитор протонов может быть использован для онлайн-контроля поглощенной

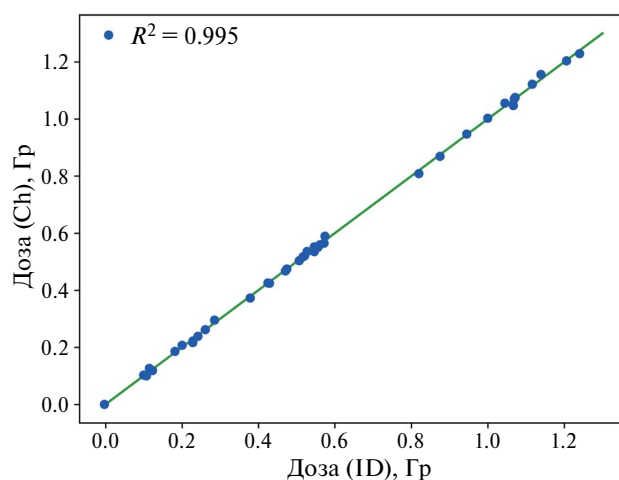


Рис. 5. График зависимости дозы в мониторе Ch от показаний индукционного датчика тока ID для каждого протонного импульса. Результат аппроксимации измерений линейной зависимостью показан прямой линией.

дозы и положения пучка в протонной флэш-терапии.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представлены результаты исследования позиционно-чувствительного черенковского монитора протонного пучка с высокой импульсной мощностью дозы. Получено хорошее согласие измерений монитора на протонном пучке со средним импульсным током 1 мА с по-

казаниями пленочного детектора и индукционного датчика тока. Проведены стендовые измерения координаты положения светового пучка, имитирующего световой образ протонного пучка в радиаторе двухкоординатного монитора. Представлен сравнительный анализ алгоритмов восстановления координаты положения светового пучка с результатами моделирования монитора.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы считают своим приятным долгом выразить благодарность И.И. Ткачеву, Д.А. Коконцеву, И.А. Яковлеву, А.Б. Неганову и О.В. Минееву 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 Федерации в рамках Соглашения о предоставлении субсидии (№ 14.621.21.0014 28.08.2017), уникальный идентификатор RFMEFI62117X0014. Работа поддержана также Российским научным фондом (грант № 22-25-00211 “Исследование реакции клеток на воздействие рекордно мощных сверхкоротких импульсов протонов”).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Favaudon V., Caplier L., Monceau V. et al. // Sci. Transl. Med. 2014. V. 6. № 245. P. 245ra93. <https://doi.org/10.1126/scitranslmed.3008973>
2. Джилкибаев Р.М. // ПТЭ. 2021. № 4. С. 10. <https://doi.org/10.31857/S0032816221040145>
3. Акулиничев С.В., Гаврилов Ю.К., Джилкибаев Р.М. // ПТЭ. 2023. № 3. С. 5. <https://doi.org/10.31857/S0032816223020131>
4. GAFchromic radiology, radiotherapy. <http://www.gafchromic.com/>
5. Boag J.W. Ionization chamber in radiation dosimetry. New York: Press Academic, 1968.
6. McDonald J., Velissaris C., B. Viren B. et al. // Nucl. Instrum. Methods. Phys. Res. A. 2003. V. 496. P. 293. [https://doi.org/10.1016/S0168-9002\(02\)01768-0](https://doi.org/10.1016/S0168-9002(02)01768-0)
7. Абрамов А.И., Казанский Ю.А., Матусевич Е.С. Основы экспериментальных методов ядерной физики. Москва: Атомиздат, 1970.
8. Reinhardt-Nikoulin P., Gaidash V., wMenshov A. et al. // Problems of Atomic Science and Technology. Series: Nuclear Physics Investigations. 2006. № 2 (46). P. 113.
9. Дьяченко А.Ф. // Вестник Харьковского университета, серия физика. 2010. № 887. Вып. 1(45). С. 118.
10. Hamamatsu Photonics <https://www.hamamatsu.com>
11. Akopjanov G.A., Inyakin A.V., Kachanov V.A., Krasnokutsky R.N. et al. // Nucl. Instrum. Methods. 1977. V. 140. P. 441.
12. CAEN DT5720. 4-channel 12 bit waveform digitizer. <http://www.caen.it>