

Научная статья

УДК 621.039.83

DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-25-37

Сопровождение облучений ионами углерода при проведении радиобиологических экспериментов на установке РБС*

**Дмитрий Анатольевич Васильев¹, Андрей Валериевич Кошелев²
Владимир Иванович Ковальцов³, Александр Вениаминович Лутчев⁴
Сергей Васильевич Маконин⁵, Владимир Александрович Пикалов⁶
Михаил Константинович Полковников⁷**

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

¹Dmitry.Vasiliev@ihep.ru

²Andrey.Koshelev@ihep.ru

³Vladimir.Kovaltsov@ihep.ru

⁴Alexander.Lutchev@ihep.ru

⁵mc_conins@rambler.ru

⁶Vladimir.Pikalov@ihep.ru

⁷Mikhail.Polkovnikov@ihep.ru

Аннотация

Установка РБС с 2015 г. работает в каждом сеансе ускорительного комплекса У-70. Основными пользователями являются радиобиологи и медики. Направление исследований – радиобиологические эксперименты на выведенных пучках ускоренных ионов углерода и предклинические исследования, направленные на разработку отечественных методик ионно-лучевой терапии. Требования, предъявляемые к сопровождению облучений образцов ионами углерода, очень высокие: равномерность облучения не хуже 95 %, точность позиционирования не хуже 0,1 мм, точность отпуска дозы не хуже $\pm 2,5$ %. В статье описаны приборы и устройства, которые используются при сопровождении радиобиологических экспериментов на установке РБС: плоскопараллельная ионизационная камера, мозаичная ионизационная камера, водный фантом с 3D-системой перемещения, 6-координатный стол, дегрейдер, лазерная система позиционирования, клинические дозиметры. Описаны программы для работы с этим оборудованием и архивирования полученных результатов.

Ключевые слова

ионы углерода, пучок, ионизационная камера, дегрейдер, коллиматор, радиобиология, программное обеспечение

Для цитирования

Васильев Д. А., Кошелев А. В., Ковальцов В. И., Лутчев А. В., Маконин С. В., Пикалов В. А., Полковников М. К. Сопровождение облучений ионами углерода при проведении радиобиологических экспериментов на установке РБС // Сибирский физический журнал. 2024. Т. 19, № 3. С. 25–37. DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-25-37

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

Monitoring and Control of Irradiation with Carbon Ions During Radiobiological Experiments at the RBS Experimental Set-Up

Dmitry A. Vasiliev¹, Andrey V. Koshelev², Vladimir I. Kovaltsov³
Alexander V. Lutchev⁴, Sergey V. Makonin⁵, Vladimir A. Pikalov⁶
Mikhail K. Polkovnikov⁷

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

Protvino, Russian Federation

¹Dmitry.Vasiliev@ihep.ru

²Andrey.Koshelev@ihep.ru

³Vladimir.Kovaltsov@ihep.ru

⁴Alexander.Lutchev@ihep.ru

⁵mc_conins@rambler.ru

⁶Vladimir.Pikalov@ihep.ru

⁷Mikhail.Polkovnikov@ihep.ru

Abstract

The RBS experimental set-up has been working in every accelerator session of the U-70 accelerator complex since 2015. The main users of the set-up are radiobiologists and physicians. The direction of research is radiobiological experiments with extracted beams of accelerated carbon ions and preclinical studies aimed at the development of domestic methods of ion therapy. The requirements for irradiation of samples with carbon ions are very high: irradiation uniformity is no worse than 95%, positioning accuracy is no worse than 0.1 mm, dose delivery accuracy is no worse than $\pm 2.5\%$. The article describes the instruments and devices that are used to support radiobiological experiments at the RBS installation: a plane-parallel ionization chamber, a mosaic ionization chamber, a water phantom with a 3D movement system, a 6-axis table, a degrader, a laser positioning system, clinical dosimeters. Programs for working with this equipment and archiving the data obtained are described.

Keywords

carbon ions, beam, ionization chamber, degrader, collimator, radiobiology, software

For citation

Vasiliev D. A., Koshelev A. V., Kovaltsov V. I., Lutchev A. V., Makonin S. V., Pikalov V. A., Polkovnikov M. K. Monitoring and control of irradiation with carbon ions during radiobiological experiments at the RBS experimental set-up. *Siberian Journal of Physics*, 2024, vol. 19, no. 3, pp. 25–37 (in Russ.). DOI 10.25205/2541-9447-2024-19-3-25-37

Введение

Экспериментальная установка «Радиобиологический стенд (РБС) на ускорителе У-70» создана на базе НИЦ «Курчатовский институт» ИФВЭ, Протвино для проведения радиобиологических и физических экспериментов на выведенном пучке ядер углерода с энергией до 450 МэВ/нуклон. Установка оформлена как центр коллективного пользования. Специалисты из пяти российских институтов участвуют в радиобиологических исследованиях на клеточных структурах и лабораторных животных, а также в экспериментах по ядерной физике и дозиметрии. Изучение влияния ускоренных ядер углерода на опухолевые и здоровые клетки для целей адронной терапии, а также оценки влияния облучения высокоэнергетическими ионами на когнитивные функции человека являются основными целями этих радиобиологических экспериментов [1]. Ниже будут описаны возможности установки РБС по обеспечению точности облучения и позиционирования образцов во время проведения экспериментов.

1. Мозаичная ионизационная камера

Предназначена для измерения профиля поля облучения в каждом цикле вывода пучка ионов углерода.

Сигнальный электрод камеры представляет собой печатную плату, выполненную из фольгированного стеклотекстолита толщиной 200 мкм размером 230×230 мм. Апертура камеры 160×160 мм. Камера представляет собой матрицу из 256 маленьких ионизационных камер

размерами 1×1 см, собранных в матрицу 160×160 мм (рис. 1). Высоковольтный электрод выполнен из полиимидной пленки толщиной 12 мкм с алюминиевым напылением толщиной в десятки ангстрем. Воздушный зазор составляет 3 мм. Камера помещена в алюминиевый корпус, который имеет входное и выходное окна, закрытые полиимидной пленкой с напылением, что обеспечивает защиту от пыли и внешних воздействий. В этом же корпусе расположена ионизационная камера полного потока апертурой 160×160 мм, позволяющая измерить интенсивность пучка. Рабочее вещество – воздух при атмосферном давлении.

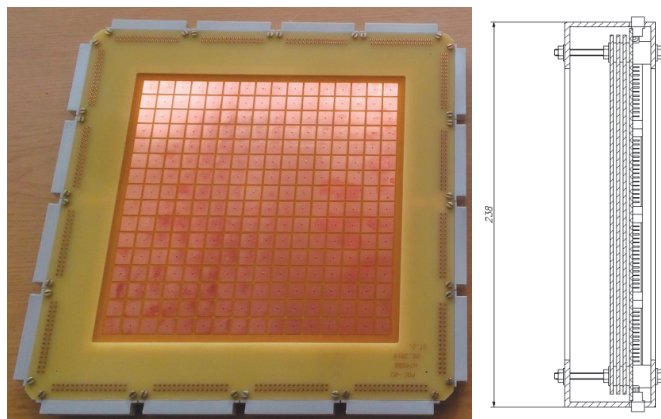


Рис. 1. Сигнальный электрод матричной ионизационной камеры и камера в разрезе
Fig.1. Signal electrode of the matrix ionization chamber and sectional view of the chamber

В качестве электроники нижнего уровня используются разработанные и изготовленные в ИФВЭ модули интеграторов на основе микросхем ACF2101 с контроллером каркаса в непосредственной близости от камеры.

Для обеспечения измерения 256 каналов используются две корзины по 8 интегрирующих модулей в каждой, соединенные последовательно по интерфейсу RS-485.

2. Плоскопараллельная ионизационная камера

Для оценки дозы при облучении объектов изготовлена четырехззорная воздушная плоскопараллельная ионизационная камера с апертурой $\varnothing 50$ мм. Конструктивно камера представляет собой набор из четырех пар электродов с воздушным зазором 2 мм, набранных в единую сборку (рис. 2).

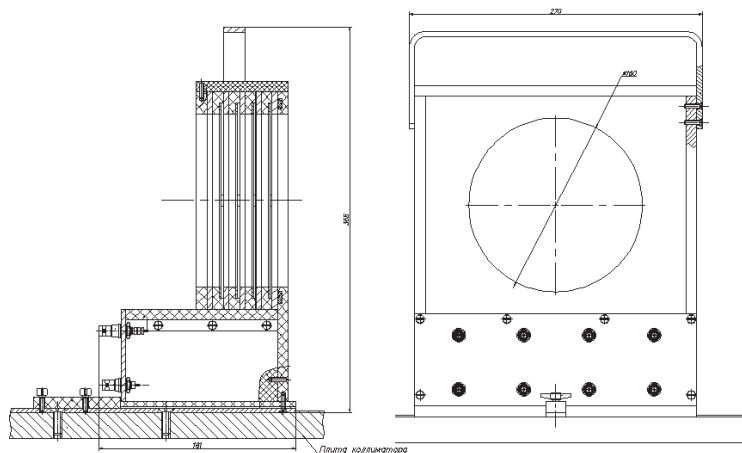


Рис. 2. Плоскопараллельная ионизационная камера
Fig. 2. Plane-parallel ionization chamber

Электроды выполнены методом вакуумного напыления меди на полиимидную пленку. Корпус камеры выполнен из капролона и имеет в основании продольный паз для однозначного крепления в коллиматоре, где она устанавливается. Центр камеры находится строго по оси пучка.

3. Контроллер ионизационных (дозных) камер

Контроллер предназначен для обработки токовых сигналов с зазоров ионизационных камер. Токовый сигнал с ионизационной камеры преобразуется в число импульсов с использованием микросхемы AD652 (ПТЧ). Один импульс соответствует определенному кванту заряда. Измерение числа импульсов в режиме реального времени позволяет измерить дозу и остановить вывод пучка по накоплению заданной величины дозы.

Контроллер выполнен в конструктиве Евромеханика.

Контроллер имеет:

- 4 входных канала измерения тока с ионизационных камер;
- вход сигнала начала вывода пучка;
- релейный выход (сухой контакт, нормально разомкнутый) разрешения вывода пучка. При включении контроллера или при отсутствии питания релейный выход разомкнут.
- интерфейс цифровой связи USB;
- гальванически развязанный интерфейс RS-232/RS-485;
- гальванически развязанный интерфейс CAN;
- светодиодную индикацию работы цифровых интерфейсов и микросхем ПТЧ.

Принцип работы контроллера ПТЧ представлен на рис. 3. По входному сигналу начала вывода пучка (синхроимпульс системы вывода) осуществляется измерение дозы в течение заданного времени t_1 (чуть большего, чем реальное время вывода). В момент времени t_2 начинается измерение шумов измерительного канала в течение времени, равного времени измерения дозы. Следующий цикл измерения начинается по входному сигналу начала вывода пучка (момент времени t_4).

Реальная доза за сброс определяется вычитанием результата измерения шумов из результата измерения дозы.



Рис. 3. Принцип работы контроллера ПТЧ
Fig.3. Operating principle of the controller of the CFC

В режиме вывода заданной дозы с периодом в 1 мс происходит вычисление суммарной дозы и выдача запрета вывода пучка при достижении заданной величины с учетом времени реакции системы вывода.

В среде NI LabView разработано ПО для работы с контроллером.

4. Обработка, хранение и предоставление информации

Обработка информации происходит на компьютере верхнего уровня под управлением операционной системы LinuxFedora 14 в программе PANEL25, написанной для этих целей. Интерфейс программы (рис. 4) имеет необходимый набор инструментов для оценки и отображения результатов измерений и архивации данных.

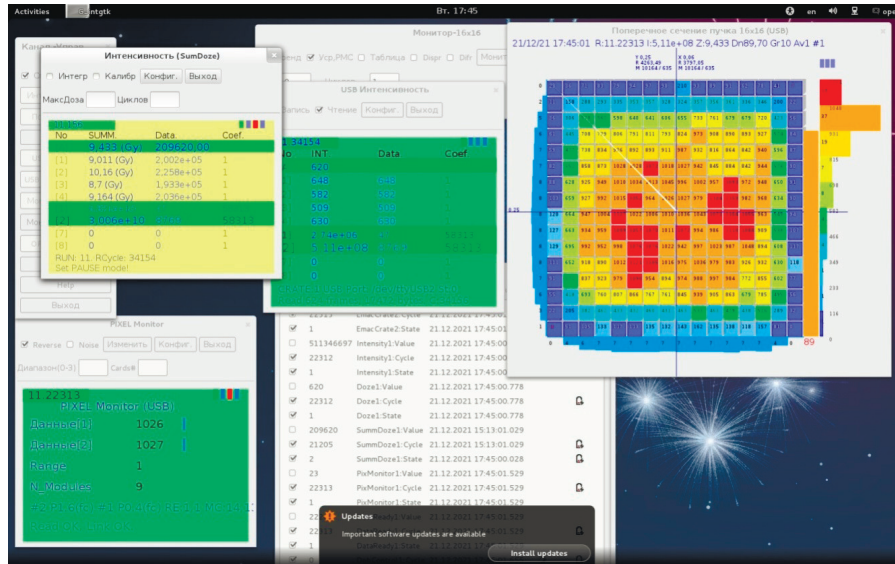


Рис. 4. Внешний вид интерфейса программы мониторинга углеродного пучка
Fig. 4. External view of the interface of the carbon beam monitoring program

Программное обеспечение сбора данных и визуализации состоит из набора сервисов, обменивающихся данными посредством механизма общей памяти процессов ОС Linux, а также общей базы данных. Сервисы в системе:

- сервис приема и архивации измерений интенсивности пучка;
- сервис приема и архивации данных профиля пучка;
- сервис передачи измерений на верхний уровень по стандарту OPC UA (Unified Architecture) [2];
- сервисы визуализации измерений интенсивности, дозы и профиля пучка.

Сервисы сбора данных взаимодействуют с соответствующими модулями связи, входящими в состав электроники измерительной системы. Используются протоколы обмена данными, обеспечивающие надежную передачу и прием данных в формате кадров сообщений. Кадр содержит уникальную сигнатуру данных, адресную информацию источника данных, код типа данных в кадре, длину сообщения, собственно данные измерений, а также контрольную сумму кадра. В случае искажения данных при передаче сообщения, что обнаруживается по величине его контрольной суммы, производится запрос на повторную передачу кадра (до трех попыток). Корректно принятые данные записываются в общую память процессов и в несколько таблиц базы данных: таблица для записей интенсивности, таблица для записей профиля, таблица циклов ускорителя, диагностическая таблица.

Используется БД sqlite-3 [3], доступ к таблицам БД на чтение и запись реализуется с помощью открытой двоичной библиотеки sqlite.lib. В каждом рабочем сеансе ускорителя ИФВЭ создается новая БД при сохранении БД всех предшествующих сеансов.

Данные, полученные в каждом цикле ускорителя, передаются на верхний уровень системы контроля и управления ускорителем по стандарту OPC UA. Сюда входят измерения

интенсивности и профиля пучка (все 256 точек). Сервис передачи данных является сервером OPC UA.

Сервис визуализации данных представляет измерения, полученные в каждом цикле ускорителя, в виде нескольких графических окон (рис. 4). Таким же образом можно просматривать исторические (ранее полученные) данные на любую глубину.

Профиль пучка отображается в матричной форме, каждый элемент которой имеет цветность, зависящую от величины заряда в нем. Центр тяжести профиля отображается пересечением двух линий – центров по горизонтали и вертикали. В правой части располагается гистограмма распределения интенсивности. В верхней части окна показаны текущая интенсивность, отклонение центра тяжести от геометрического центра матрицы, среднеквадратичное отклонение по распределению интенсивности в профиле, суммарный и средний заряд по 256 точкам. Слева и снизу окна показаны профили пучка по оси X и Y соответственно.

5. Водный фантом с 3D-системой перемещения

Водный фантом с 3D-системой перемещения кессона предназначен для проведения радиобиологических экспериментов и измерения параметров пучка ионов углерода. 3D-система перемещения кессона в водном фантоме реализована на основе настольного фрезерного станка с ЧПУ BZT-PF600. Перемещение осуществляется тремя шаговыми двигателями с разрешением 2,5 мкм и максимальной скоростью позиционирования 8000 мм/мин. Система оборудована концевыми выключателями начального положения, кнопкой аварийного останова и блокировки перемещения. Управляющая электроника станка ЧПУ заменена специально разработанным контроллером с интерфейсами и протоколом, позволяющими интегрировать данную подсистему в общую информационную систему РБС.

Блок-схема устройства представлена на рис. 5.

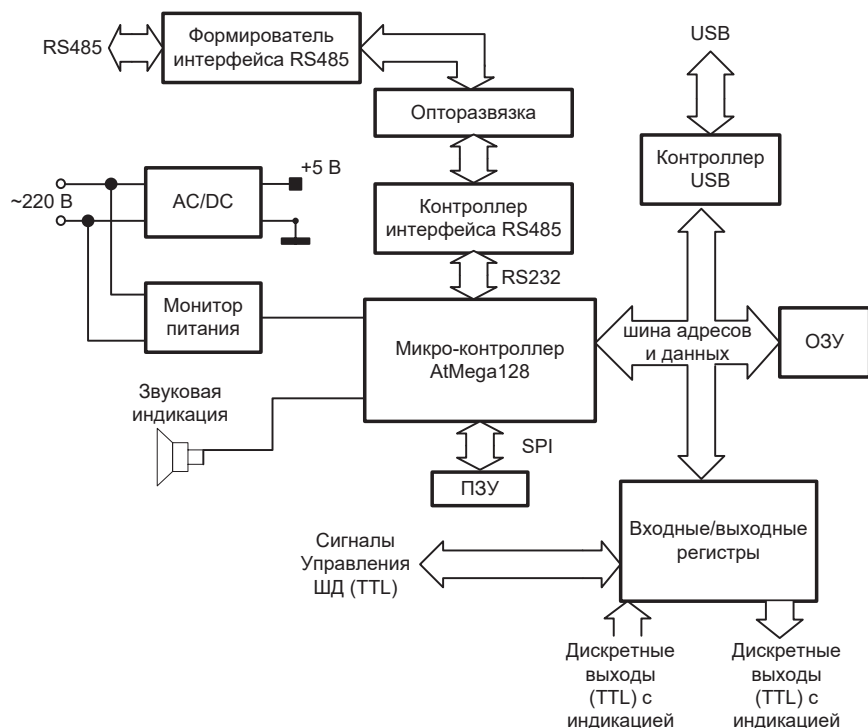


Рис. 5. Блок-схема прибора ШД-РБС
Fig. 5. Block diagram of the SM-RBS device

Основными функциями блока управления являются:

- выдача дискретных сигналов на управление тремя шаговыми двигателями согласно загруженному профилю движения (ось перемещения, направление, начальная и максимальная скорости, ускорение, целевая позиция);
- чтение и обработка концевых выключателей на каждой оси;
- чтение и обработка нажатия кнопки аварийного останова;
- контроль питающего напряжения 220 В;
- вычисление текущей координаты по каждой оси;
- останов движения по команде;
- останов движения и сохранение текущих координат при пропадании питающего напряжения;
- организация связи с ПК верхнего уровня по интерфейсам USB и RS485.

В среде NI Labview разработано программное обеспечение для ПК, позволяющее управлять работой блока как локально (по интерфейсу USB), так и удаленно (по интерфейсу RS-485).

6. Клинические дозиметры ДКС-АТ и UNIDOS PTW

Клинические дозиметры ДКС-АТ 5350/1 и UNIDOS имеют последовательные интерфейсы RS-232 для подключения типа точка-точка к персональному компьютеру. Протоколы обмена данными для каждого из дозиметров свои. Оба протокола позволяют не только вычитывать величину накопленной дозы с прибора, но и осуществлять запуск и останов режима накопления. В среде NI Labview 2012 разработано программное обеспечение для ПК, позволяющее дистанционно управлять работой дозиметров этих типов.

На основе водного фантома, клинических дозиметров и плоскопараллельных ионизационных камер создан программно-аппаратный комплекс для поиска пика Брэгга в автоматическом режиме.

Для этого использованы следующие подпрограммы:

- управление перемещением кессона в заданную точку водного фантома;
- чтение и контроль суммарной интенсивности, измеренной ионизационной камерой перед водным фантомом;
- запуск режима накопления клинического дозиметра, чтение накопленной дозы, сброс дозиметра.

При синхронизации запуска измерений с циклом работы ускорительного комплекса не запрещается вывод пучка. Синхронизация измерений с циклом работы ускорительного комплекса также осуществляется через OPC UA-сервер: после окончания вывода пучка данные с ионизационной камеры обновляются, это сопровождается меткой времени. Циклический полинг метки времени позволяет определить момент окончания вывода пучка с задержкой не более 1 с.

В среде NI Labview разработана общая управляющая программа, запускающая и синхронизирующая работу вышеописанных программ. Алгоритм работы программы следующий:

- формирование задания: указание начальной координаты, конечной, величины шага, суммарной величины интенсивности. Результатом выполнения является массив координат по продольной оси пучка, в которых необходимо провести измерения;
- запуск процедуры автоматического поиска пика Брэгга;
- позиционирование в каждой координате; запуск режима накопления дозиметра ДКС-АТ (PTW UNIDOS), набор заданного числа событий по данным с ионизационной камеры перед водным фантомом, расчет величины удельной дозы, передача величины накопленной дозы в OPC UA-сервер информационной системы РБС;
- построение графика зависимости величины удельной дозы от координаты;
- архивация измеренных и вычисленных данных;
- после выполнения задания возможно формирования следующего.

Предусмотрена возможность управления положением кессона в водном фантоме в поперечном и вертикальном направлении. Это требуется для корректировки положения облучаемого объекта.

Также разработана программа, позволяющая считывать сохраненные архивные данные, отображать на едином графике данные нескольких измерений, вычислять суммарную интенсивность с ионизационной камеры перед водным фантомом для набора заданной величины дозы без дальнейшего использования клинического дозиметра.

Программы используются при проведении радиобиологических экспериментов.

7. Пластинчатый дегрейдер

Пластинчатый дегрейдер предназначен для изменения энергии пучка углерода путем введения в пучок поглотителей из оргстекла и представляет собой несущую металлическую конструкцию, на которой установлены пластиковые пластины, элементы привода, управляющая электроника и источник питания.

Несущая конструкция (шасси) выполнена из алюминия. Все внутренние элементы, установленные на шасси (приводы, электроника и т. д.), закрыты алюминиевыми кожухами и крышками на винтах.

Поглотитель представляет набор из листов органического стекла необходимой толщины. На каждом из листов закреплены нажимные пластины для взаимодействия с концевыми выключателями.

Привод блоков поглотителя состоит из шаговых электродвигателей, компенсирующих муфт, ходовых винтов и направляющих. Ходовые винты и направляющие расположены в шахматном порядке.

В нижней части шасси на кронштейнах установлены концевые выключатели.

На рис. 6 показан пластинчатый дегрейдер без кожуха.

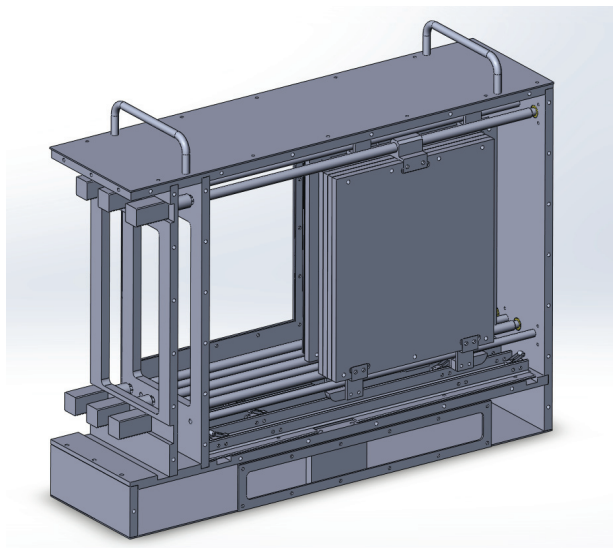


Рис. 6. Пластинчатый дегрейдер без кожуха

Fig. 6. Plate degrader without casing

Для управления перемещением пластинами поглотителя используется встроенный контроллер с последовательным интерфейсом RS-232C. Все данные передаются в виде текстовых сообщений.

Пластины расположены на шести перемещающихся каретках, и каждая каретка перемещается независимо от другой. Толщины пластин в соответствии с номерами кареток показаны в таблице.

Толщины пластин дегрейдера с номерами кареток

Thicknesses of degrader plates with carriage numbers

№ каретки	Толщина пластины (мм)
1	32,4
2	16,15
3	8,15
4	3,68
5	1,66
6	0,98

ПО управления дегрейдером разработано в среде Ni Labview.

8. Программное обеспечение реализации процедуры послойного облучения объекта

Программное обеспечение (ПО) предназначено для послойного облучения объектов пучком ускоренных ядер углерода узким пиком Брэгга заданной энергии. Послойное облучение объектов реализуется пластинчатым дегрейдером путем введения в пучок пластин заданной толщины (кратно ~ 1 мм водного эквивалента). ПО для данного вида облучения разработано и опробовано в осеннем сеансе 2022 г.

Послойное облучение объектов в кессоне водного фантома может также осуществляться перемещением кессона в фантоме.

Доза на каждый слой вычисляется при разработке плана облучения.

Объекты системы управления, реализующие процедуру послойного облучения, следующие:

- пластинчатый дегрейдер, интерфейс подключения – RS-232;
- система перемещения кессона в водном фантоме. Интерфейс подключения контроллера – USB;
- подсистема диагностики пучка (измерение интенсивности), интерфейс подключения – Ethernet, OPC UA;
- контроллер ионизационных (дозных) камер, интерфейс подключения – USB, RS-485. Задействованы два измерительных канала, реализующих измерение сигналов с двух ионизационных камер (определение интенсивности и дозы). В режиме накопления вывод пучка запрещается при достижении заданной величины для каждого слоя.

В среде Ni LabView разработано ПО для реализации послойного облучения объектов с совместным использованием водного фантома и пластинчатого дегрейдера.

Задание формируется нажатием кнопки «Сформировать Задание» в главном окне программы. После этого вручную заносятся величины доз и номера пластин дегрейдера для каждого слоя. Предусмотрена возможность удаления ошибочно введенного слоя и добавление нового слоя на любое место. Выполняется сформированное задание нажатием кнопки «Исполнить Задание». Для контроля сигнала разрешения вывода пучка предусмотрен индикатор. Состояние каждого устройства, используемого при реализации процедуры, отражается под соответствующими столбцами таблицы.

По окончании процедуры в окне программы появляется соответствующее сообщение и возможно задание нового плана облучения.

В весеннем сеансе 2023 г. было проведено послойное облучение заданного объема в водном фантоме с использованием пластинчатого дегрейдера, реальная доза в каждом слое измерялась клиническим дозиметром.

9. 6-координатный стол

В НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ спроектирован и изготовлен 6-координатный стол с рентгено-прозрачной декой. Стол предназначен для точного позиционирования пациента при лучевой терапии относительно фиксированного пучка.

Для обеспечения надежного и безопасного функционирования стола требуемой точности позиционирования и возможности дистанционного и местного управления с включением в общую информационную систему разработана автоматизированная система управления.

Состав оборудования системы управления 6-координатным столом:

- персональный (промышленный) компьютер (PC);
- устройства формирования шины CAN: преобразователи USB-CAN, повторители (шлюзы) шины CAN;
- сервоприводы СПШ – 5 шт.;
- контроллер управления шаговым приводом KUMB-203 с энкодером Kubler Sendix F5668;
- местный ручной пульт управления (манипулятор);

Управление элементами оборудования осуществляется через PC. Блок-схема обмена данным представлена на рис. 7.

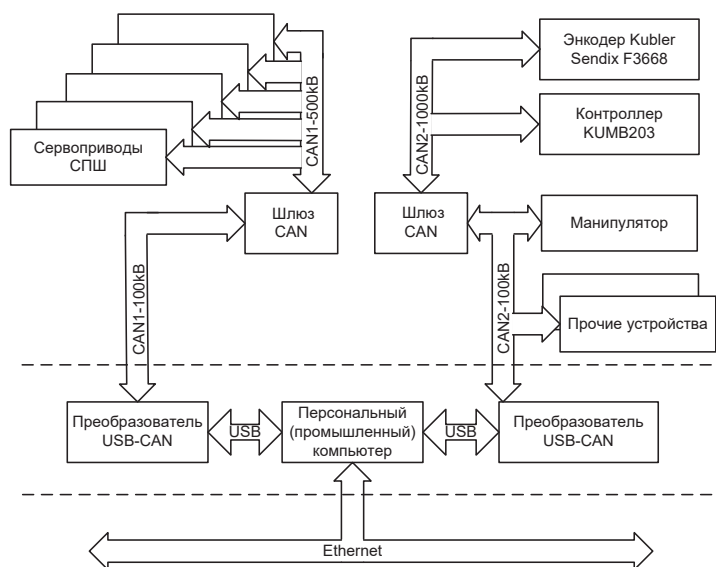


Рис. 7. Блок-схема обмена данными в системе управления столом
Fig. 7. Data exchange flowchart in the table control system

Сервоприводы СПШ обеспечивают следующие перемещения:

- | | |
|---|-----------------|
| • горизонтальное продольное | 1000 мм |
| • горизонтальное поперечное | ± 200 мм |
| • вертикальное | 650 мм |
| • вращение деки относительно горизонтальной оси | $\pm 15^\circ$ |
| • вращение деки относительно вертикальной оси | $\pm 15^\circ$ |
| • круговое движение | $\pm 185^\circ$ |

Для управления элементами оборудования в медицинской зоне РБС в непосредственной близости от стола при первичной укладке пациента разработан ручной пульт управления (манипулятор) со следующими характеристиками:

- наличие CAN-интерфейса для обмена данными с системой управления;
- наличие тактильного устройства при взятии манипулятора в руку;
- наличие интуитивно понятной символьной маркировки функций кнопок;
- предусмотрена возможность работы в условиях частичного затемнения;
- наличие звуковой сигнализации;
- наличие кнопки аварийного останова всех механизмов стола-кресла;
- питание устройства от 15 В постоянного тока.

В среде NI Labview разработана программа управления столом и оборудованием в медицинской зоне РБС. Управление всеми приводами осуществляется через единую таблицу.

Для расчета и визуализации положения пациента на пучке была реализована программа, являющаяся модулем к программе медицинской визуализации и расчетов 3D Slicer. За основу иерархии системы координат элементов был взят стандарт ГОСТ Р МЭК 61217-2013 «Аппараты дистанционные для лучевой терапии. Координаты, перемещения и шкалы», который является переводом стандарта IEC 61217:2011. Данный ГОСТ для аппаратов со штативом, к которому, помимо электронного или фотонного источника, монтируется ряд элементов (многолепестковый коллиматор, выходное окно, рентгеновский детектор). Установка РБС отличается несколькими аспектами:

- фиксированный пучок, параллельный поверхности земли;
- отсутствие МЛК и рентгеновских источников в системе координат пучка.

Учитывая, что требуемая ориентация пучка для пациента в большинстве случаев отлична от горизонтальной, программой позиционирования выполняется перерасчет из ориентации неподвижного пучка в требуемый для пациента путем наклона деки стола и поворота опоры стола.

Реализованная иерархия систем координат представлена на рис. 8. Ось вращения системы опоры стола s пересекается с осью неподвижного пучка g . Переход из материнской системы координат в дочернюю и наоборот осуществляется через матрицу аффинных преобразований и вектора переноса начала системы координат. В качестве данных пациента и координат области облучения и изоцентра программа использует данные формата DICOM модальности СТ и данные оконтуривания RTSTRUCT. Данные ориентации пучков облучения могут быть получены из DICOM файлов RTPlan или RTIonPlan либо введены вручную.



Рис. 8. Иерархическая структура систем координат ГОСТ Р МЭК 61217-2013 в приложении к РБС

Fig. 8. Hierarchical structure of coordinate systems IEC 61217:2011 in the RBS

Для совмещения точки изоцентра, полученной из данных системы планирования, и оси пучка первоначально выполняется расчет и отработка углов деки стола в соответствии с ее кинематической схемой. Поступательные движения опоры стола и деки стола определяются и выполняются после угловых перемещений.

Взаимодействие между программой расчета положения пациента и системой управления элементами перемещения осуществляется по стандарту OPC-UA.

10. Программное обеспечение управления оборудованием в установке РБС

ПО разработано в среде Ni Labview. Внешний вид основного окна программы представлен на рис. 9.

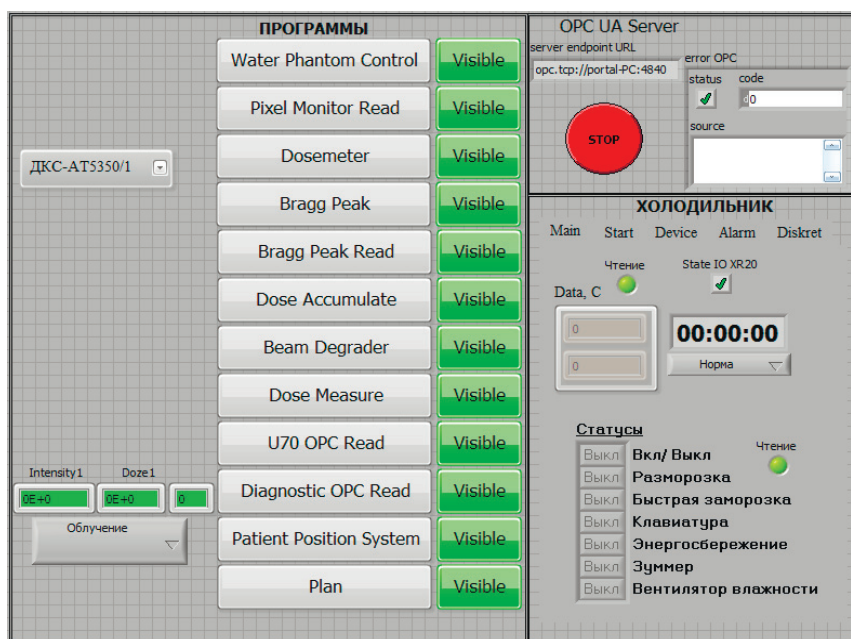


Рис. 9. Внешний вид основного окна программы управления оборудованием установки РБС

Fig. 9. The main window of the RBS set-up equipment control program

Подпрограммы запускаются (закрываются) нажатием соответствующей кнопки на панели управления. При корректной работе соответствующая кнопка окрашивается в зеленый цвет. При наличии ошибок (отсутствие данных, получаемых по сети Ethernet, отсутствие оборудования или выявление неисправностей в его работе) соответствующая кнопка окрашивается в красный цвет. Существует возможность реализации звуковой сигнализации с указанием возникающих неисправностей в процессе работы. Для удобства работы показания величин ионизационных камер (интенсивность и доза) выведены на главный экран.

Список литературы

1. **Pikalov V. A. et al.** Experimental facility “radiobiological test setup on accelerator U-70” as centers for collective use (CCU) // Proceedings of 26th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2018, Ptovino, Russia, 2018. P. 253–255. DOI: 10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUPSA50.
2. **Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M.** OPC Unified Architecture. Berlin: Springer, 2009.
3. **Sinhsankar Haldar.** SQLite Database System. Design and Implementation. Self-Publishing, 2015.

References

1. **Pikalov V. A. et al.** Experimental facility “radiobiological test setup on accelerator U-70” as centers for collective use (CCU). *Proceedings of 26th Russian Particle Acc. Conf. RuPAC2018*, Ptovino, Russia, 2018, pp. 253–255. DOI: 10.18429/JACoW-RUPAC2018-TUPSA50.
2. **Mahnke W., Leitner S.-H., Damm M.** OPC Unified Architecture. Berlin: Springer, 2009.
3. **Sinbsankar Haldar.** SQLite Database System. Design and Implementation. Self-Publishing, 2015.

Сведения об авторах

Васильев Дмитрий Анатольевич, старший научный сотрудник

Кошелев Андрей Валериевич, старший научный сотрудник

Ковальцов Владимир Иванович, инженер-программист

Лутчев Александр Вениаминович, старший научный сотрудник

Маконин Сергей Васильевич, инженер

Пикалов Владимир Александрович, начальник лаборатории

Полковников Михаил Константинович, старший научный сотрудник

Information about the Authors

Dmitry A. Vasiliev, Senior Researcher

Andrey V. Koshelev, Senior Researcher

Vladimir I. Kovaltsov, Software Engineer

Alexander V. Lutchev, Senior Researcher

Sergey V. Makonin, Engineer

Vladimir A. Pikalov, Head of Laboratory

Mikhail K. Polkovnikov, Senior Researcher

*Статья поступила в редакцию 11.09.2023; одобрена после рецензирования 02.10.2023;
принята к публикации 05.03.2024*

*The article was submitted 11.09.2023; approved after reviewing 02.10.2023;
accepted for publication 05.03.2024*