

УДК 621.382.8; 615.849.12

Создание композиционной теневой защиты для цифрового детектора получения изображений и терапевтического канала на основе нейтронного генератора

© 2022 г. В. В. Сиксин¹✉

¹ *Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук,
Ленинский просп., д. 53, Москва, 119991, Российская Федерация*

✉ Автор для переписки: 11vypet_lb_salo@inbox.ru

Аннотация. Проведены теоретические расчеты для многослойной защиты цифрового детектора получения изображений. При конструировании интегрирующих электродов и сенсорных ячеек многофункциональной ионизационной камеры (МИК), были применены материалы и способы применяемые для создания микроэлектронных технологий. Рассмотрен принцип работы МИК для регистрации профилей импульсных условных спотов от нейтронного генератора. В основе принципа работы камеры МИК лежит взаимодействие интегрирующих электродов и сенсорных ячеек. Сенсорные ячейки состоят из 16 падов, сигналы с которых поступают в импульсном режиме синхронно с поступающим триггерным сигналом. 16-и канальная плата интегратора (16КПИ) обрабатывает поступающие на вход сигналы и отправляет их на схему контроля обнаружения отклонений (СКОО). При обнаружении отклонений от заданных параметров, СКОО немедленно отключает нейтронный генератор. Рассмотрена принципиальная схема 16-канального зарядочувствительного усилителя производящего обмен информацией между камерой МИК и компьютером. Приводятся временные диаграммы прохождения сигналов на примере одного канала 16КПИ. Камера МИК вместе с каналом нейтронного пучка и многослойной защитой предназначена для нейтронной терапии. Предложены варианты композиционной многослойной защиты терапевтического канала на основе источника нейтронов на базе нейтронного генератора НГ-24. Конструкция канала построена на основе расчетов Монте-Карло на примере подобранных защитных материалов — воды, тиваробора и вольфрама. Предложено использовать камеру МИК для контроля дозных профилей нейтронных пучков.

Ключевые слова: многослойная композиционная теневая защита, водный фантом, цифровой детектор получения изображения, композитный защитный материал, коэффициент ослабления, мощность амбиентного эквивалента дозы, тиваробор, нейтронный генератор

Благодарность: Автор выражает благодарность А.И. Львову за консультации по проведению испытаний электронного тракта многофункциональной ионизационной камеры на ускорителе «Пахра».

Для цитирования: Сиксин В.В. Создание композиционной теневой защиты для цифрового детектора получения изображений и терапевтического канала на основе нейтронного генератора. *Известия высших учебных заведений. Материалы электронной техники.* 2022; 25(3): 245—255. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-245-255>

© 2022 National University of Science and Technology MISiS.

This is an open access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC-BY 4.0), which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited.

Theoretical calculations and creation of a composite shadow protection for the CRD detector and a therapeutic channel for a neutron generator

V. V. Siksin¹✉

¹ *Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences,
53 Leninsky Ave., Moscow 119991, Russian Federation*

✉ *Corresponding author: 11vypet_lb_salo@inbox.ru*

Abstract. Theoretical calculations for the multilayer protection of a digital imaging detector (DDI) have been carried out. After analyzing the obtained attenuation coefficients of the calculated composite protection, its application for the formation of a neutron channel is proposed. The principle of operation of a multifunctional ionization chamber (MIC) for recording profiles of pulsed conditional spots from a neutron generator is considered. The principle of operation of the MIC chamber is based on the interaction of integrating electrodes and sensor cells. Sensor cells consist of 16 pads, the signals from which arrive in a pulsed mode synchronously with the incoming trigger signal. The 16 channel integrator board 1 board processes the input signals and sends them to the Deviation Detection Control Circuit (DDCC). If the DDCC circuit detects a deviation from the specified parameters, it immediately turns off the neutron generator (NG). A schematic diagram of a 16-channel charge-sensitive amplifier that exchanges information between the MIC camera and a computer is considered. Timing diagrams of the passage of signals are given on the example of one channel 1 board. The MIC chamber, together with the neutron beam channel and multilayer shielding, is designed for neutron therapy. Variants of composite multilayer protection of a medical channel based on a neutron source based on the NG-24 neutron generator are proposed. The channel design is built on the basis of Monte Carlo calculations on the example of selected protective materials — water, tivarobor and tungsten. A patent is considered, on the basis of which it is proposed to design a composite shadow protection of a neutron therapeutic channel. It is proposed to use the MIC chamber to control the dose profiles of neutron beams.

Keywords: multilayer composite shadow shielding, water phantom, digital imaging detector, composite shielding material, attenuation coefficient, ambient dose equivalent rate (EDR), tivarobor, neutron generator

Acknowledgments. The author is grateful to A.I. Lvov for advice on testing the electronic path of the multifunctional ionization chamber at the Pakhra Accelerator.

For citation: Siksin V.V. Theoretical calculations and creation of a composite shadow protection for the CRD detector and a therapeutic channel for a neutron generator. *Izvestiya vuzov. Materialy elektronnoy tekhniki* = *Materials of Electronics Engineering*. 2022; 25(3): 245—255. <https://doi.org/10.17073/1609-3577-2022-3-245-255>

Введение

На медицинских установках с источниками протонного и нейтронного излучения должны выполняться условия по радиационной защите и безопасности пациентов [1]. Эффективной защитой от быстрых нейтронов является полиэтилен. При столкновении с атомами водорода нейтроны замедляются и уменьшают свою способность к ионизации. Для поглощения медленных нейтронов в полиэтилен добавляют бор, однако для удовлетворительного ослабления, защитный слой полиэтилена должен быть не менее 10 см [2]. В настоящее время разработан сверхвысокомо-

лекулярный полиэтилен (СВМПЭ), представляющий собой линейный полимер с очень длинными цепями не имеющими боковых ответвлений, с молекулярной массой от 1,5 до 7,5 млн. СВМПЭ благодаря высоким значениям молекулярной массы, обладает рядом достоинств, в числе которых хорошие защитные свойства по отношению к γ -квантам и нейтронам. Одним из методов, позволяющих существенно повысить защитные характеристики СВМПЭ является дисперсное упрочнение и получение полимерных композиционных материалов с улучшенными свойствами за счет модификации его карбидом бора [3]. Основную роль играют фазовое состояние, его рас-

пределение в матрице, процессы взаимодействия на границе между частицами дисперсной фазы и полимерной средой [4]. Перспективным является способ формирования композитов на основе СВМПЭ, базирующийся на механохимическом взаимодействии СВМПЭ с соединениями модификатора (например, карбидом бора) [5, 6]. Механическая активация полимера с соединениями бора приводит к изменению как его надмолекулярной структуры с уменьшением молекулярной массы, так и изменению молекулярного строения без разрыва внутримолекулярных связей [7]. Проявляется также и структурная нестабильность карбида бора [8].

Экспериментальные измерения коэффициентов ослабления для тиваробора в работе [11], были проведены нейтронным дозиметром БДМН-96 выпускаемым НПП «Доза». Так как точность определения амбиентной дозы по нейтронам у БДМН-96

составляет 30 %, было предложено в дальнейших экспериментах по измерению коэффициентов ослабления применять многофункциональную ионизационную камеру (МИК), точность которой составляет менее 10 %.

Целям работы являлись: проведение расчета эффективности композиционной защиты от нейтронного излучения состоящей из 3 слоев: воды, тиваробора и вольфрама и определения амбиентной дозы H_{10} с защитой и без защиты; применение результатов расчета для конструирования нейтронного канала на основе НГ-24 с аналогичной защитой; демонстрация тестирования работы 16-канальной платы 1плата, с применением тестирующей платы.

Теоретические расчеты защиты для варианта ЦДПИ в виде «кувшина»

Рассмотрим конструкцию цифрового детектора получения изображений (ЦДПИ) [9, 10] в виде так называемого «кувшина» (рис. 1). Весь его корпус выполнен из нержавеющей стали и имеет размеры $410 \times 300 \times 100$ мм³. С наружной стороны, за герметично закрепленным оптическим стеклом, находится детектор ЦДПИ — специальная цифровая сверхчувствительная телевизионная камера со своим электронным трактом [10]. Камера с помощью своего интерфейса, за каждый выпуск ускорителя, содержащего определенное количество спотов сканирующего луча, передает координаты пиков Брэгга в компьютер.

Расчет программой FLUKA проводился согласно геометрии приведенной на рис. 1. На рис. 1, дан разрез фантома «кувшина», представляющего собой усеченную пирамиду. Весь объем пирамиды заполнен водой и одновременно является и фантомом и защитой. Отметим, что согласно рис. 1, композиционная защита состоит из трех слоев.

Длина фантома «кувшина» составляет 410 мм и кувшин может принять в себя пики Брэгга для энергии протонов 260 МэВ. Ось z перпендикулярна передней стенке фантома «кувшина» и привязана к системе координат x, y, z . Ось r_5 , изображенная на рис. 1, исходит из точки пересечения на оси пучка на расстоянии 205 мм от входа в кувшин на плоскости проходящей через оси x и y — эта точка находится на половинном пути пучка от его входа в фантом и его выхода. На этой оси на расстоянии около 302 мм от оси z находится детектор ЦДПИ (7), который регистрирует за каждый спот протонного пучка координаты и параметры пика Брэгга. В проведенных расчетах было применено пять энергий протонного пучка.

На рис. 2 приводятся расчет вдоль оси r_5 амбиентной дозы H_{10} на один падающий протон с шагом 1 см.

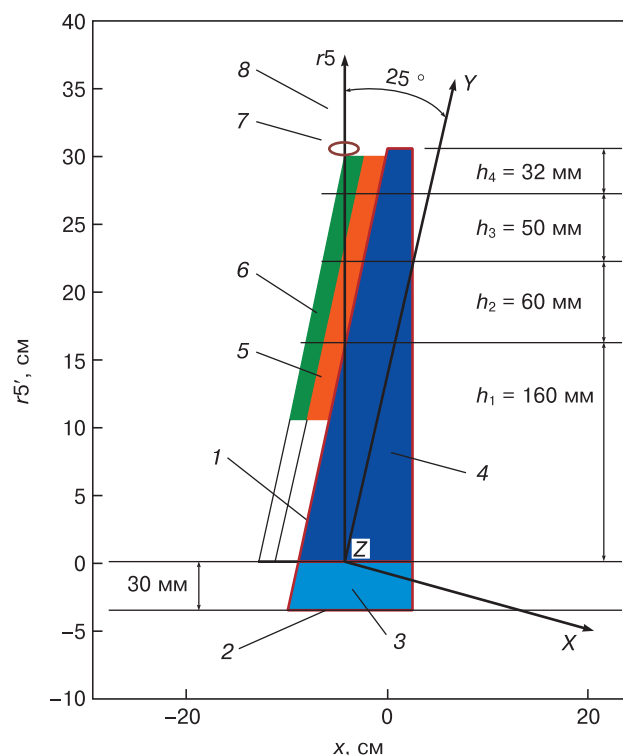
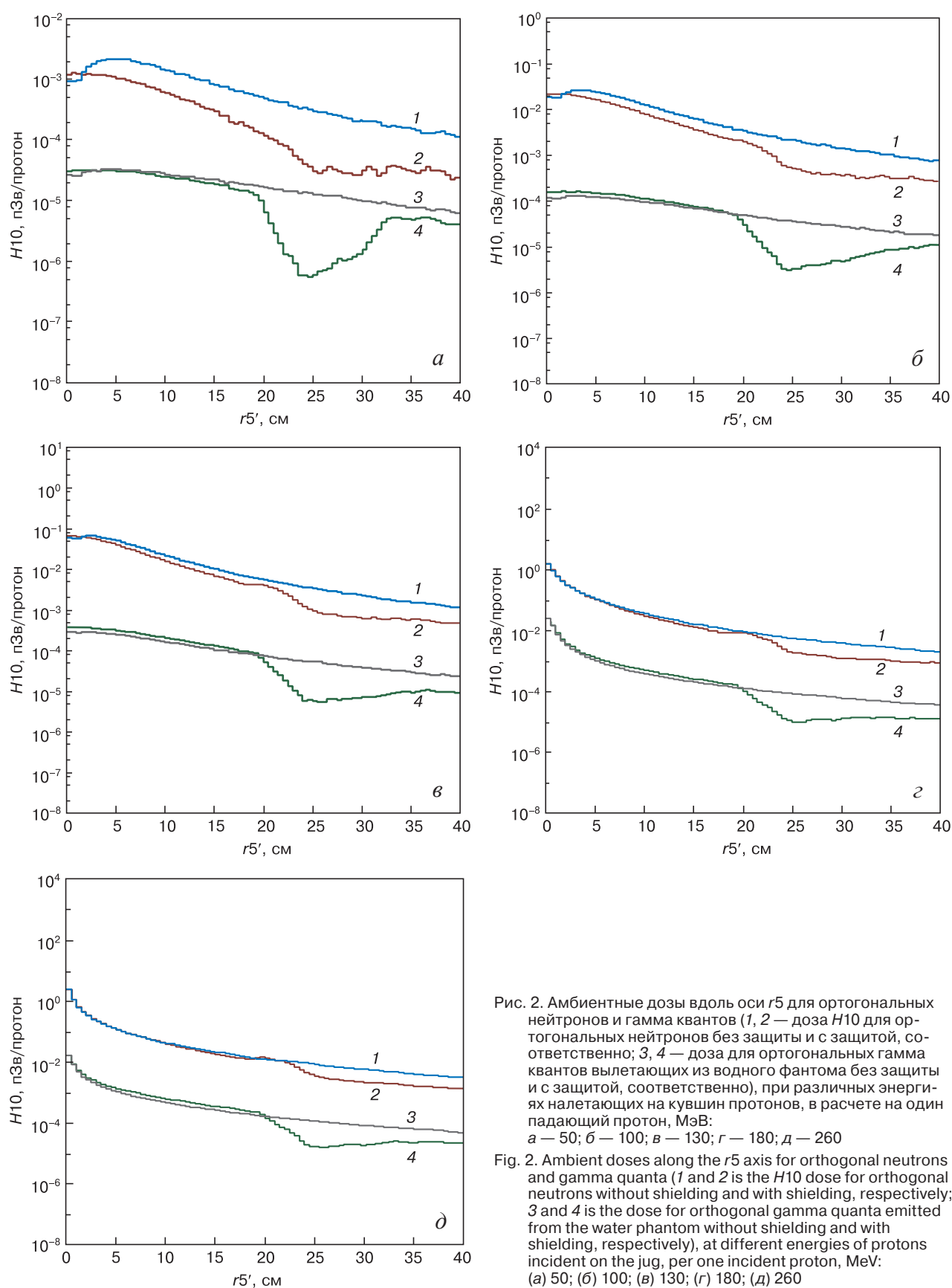


Рис. 1. Конструкция «кувшина» для расчета трехслойной защиты от нейтронов:

1 — стенки кувшина, внутри заполненного водой; 2 — дно кувшина; 3 — нижний слой воды; 4 — верхний слой воды заполняющий кувшин; 5 — материал тиваробор, с толщиной по пути нейтронов 60 мм; 6 — материал вольфрам, с толщиной по пути нейтронов 50 мм; 7 — детектор ЦДПИ находящийся за стенкой кувшина; 8 — ось r_5 , расположенная в плоскости x, y под углом 25° к оси y

Fig. 1. The design of the "jug" for the calculation of three-layer protection against neutrons:

(1) walls of the jug, inside filled with water, (2) bottom of the jug, (3) lower layer of water, (4) top layer of water filling the jug, (5) material tungsten, with a thickness along the neutron path of 60 mm, (6) material tungsten, with a thickness along the neutron path of 50 mm, (7) detector TsDPI located behind the wall of the jug, (8) axis r_5 , located in the x, y plane at an angle of 25° to the y axis



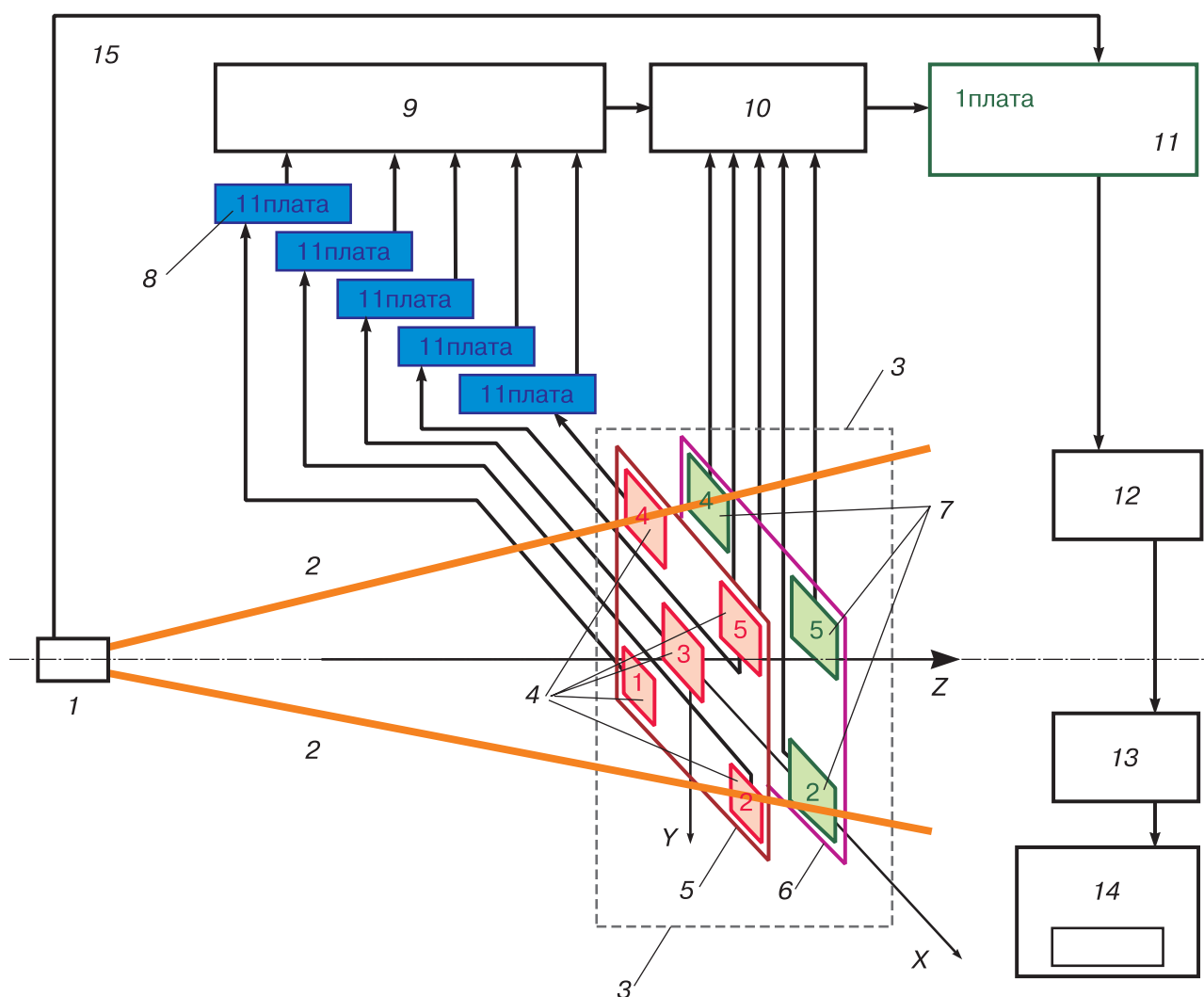


Рис. 3. Принцип работы камеры МИК:

1 — источник нейтронного пучка НГ; 2 — сканирующие споты нейтронного пучка профиль которых измеряет камера МИК; 3 — область камеры МИК; 4 — интегрирующий электрод; 5 — плоскость интегрирующих электродов; 6 — плоскость сенсорных ячеек; 7 — сенсорная ячейка; 8 — 11-плата собирающая заряд с интегрирующих электродов; 9 — анализатор определения номера сработавшего интегрирующего электрода; 10 — 16-канальный аналоговый мультиплексор собирающий сигналы с каждой сенсорной ячейки; 11 — электронная 16-канальная 1-плата собирающая сигналы с каждой сенсорной ячейки за каждый спот пучка; 12 — схема контроля обнаружения отклонений; 13 — программируемая матрица; 14 — компьютер; 15 — сигнал триггера запускающий считывающую электронику

Fig. 3. The principle of operation of the multifunctional ionization chamber (MIC):

(1) neutron beam source NG; (2) scanning spots of the neutron beam, the profile of which is measured by the MIC; (3) area of the MIC; (4) integrating electrode; (5) plane of integrating electrodes; (6) plane of sensory cells; (7) sensory cell; (8) 11 board collecting charge from integrating electrodes; (9) analyzer for determining the number of the triggered integrating electrode; (10) 16-channel analog multiplexer collecting signals from each sensor cell; (11) electronic 16-channel 1 board collecting signals from each sensor cell for each spot of the beam; (12) control circuit for detecting deviations; (13) programmable matrix; (14) computer; (15) trigger signal triggering the reading electronics

Принцип работы камеры МИК для применения на терапевтическом нейтронном канале с нейтронным генератором НГ-24

На рис. 3 рассмотрен принцип работы камеры МИК для регистрации нейтронного излучения получаемого на нейтронных генераторах. Камера МИК позволяет регистрировать высокоэнергетические нейтроны, которые имеют энергию в диапазоне 10—100 МэВ. Нейтронный генератор, средняя энергия которого равна 14 МэВ при интенсивности 10^{11} нейтронов на один сантиметр квадратный за

секунду, позволяет хорошо регистрировать нейтроны камерой МИК. Несмотря на то, что в отличие от узкого карандашного пучка протонов ускорителя «Прометеус», где под спотом пучка понималась его доля от всего выпуска пучка протонов, камера МИК, для применения на нейтронном пучке, сохранила все его основные принципы.

После выпуска импульса нейтронов из НГ направление пучка формируется специальной многослойной защитой, которая будет рассмотрена ниже. Угловые размеры пучка подбираются с учетом размеров камеры МИК. Камера состоит из двух плоскостей находящихся близко друг к дру-

гу — это плоскость интегрирующих электродов и плоскость сенсорных ячеек. Размеры интегрирующих электродов и сенсорных ячеек совпадают. Если за данный условный спот нейтронный пучок с каким то своим профилем прошел через сенсорную ячейку, например № 3, то весь этот спот пройдет, также и через интегрирующий электрод № 3. Сигнал с этого электрода № 3 будет проинтегрирован и измерен платой 11плата (11П), с выхода которой поступит на анализатор определения номера сработавшего за данный спот интегрирующего электрода. Данный номер будет передан на аналоговый мультиплексор, который считает импульсы от сенсорной ячейки. Далее эти 16 сигналов поступят на обработку на 16-канальный интегратор профиля пучка — 1плата (1П). Всего у нас в прототипе камеры МИК для нейтронного пучка применяется пять плат 11П.

Прототип камеры МИК-3 состоит из пяти интегрирующих электродов и пяти сенсорных ячеек, что видно из рис. 3. После обработки сигналов на 1П сигналы профиля пучка поступают на 12 — схему контроля обнаружения отклонений (СКОО), где профиль сравнивается с допустимыми значениями. Если профиль удовлетворяет допустимым значе-

ниям, он далее передается на программируемую матрицу (FPGA) 13, а затем поступает на компьютер 14. Триггер на запуск всей установки (15), — поступает в момент поступления импульса пучка от НГ. В работе [14] было подробно описано применение камеры МИК, состоящей из оптического датчика и многоканальной падовой камеры. В настоящей работе оптический датчик в камере МИК заменен на плоскость интегрирующих электродов, которые определяют номер сработавшей сенсорной ячейки. Совместное применение плоскости интегрирующих электродов и плоскости сенсорных ячеек падовой камеры МИК, позволит улучшить конформность нейтронной терапии за счет более точного измерения подводимой дозы нейтронов МАГАТЭ [15].

Принцип работы считывающей электроники камеры МИК

На рис. 4 приведена схема устройства 16-канального зарядочувствительного усилителя обозначенного как 1П. Усилитель 1П, по заданному алгоритму, обслуживает сенсорные ячейки камеры МИК, которых в прототипе прибора (см. рис. 3) все-

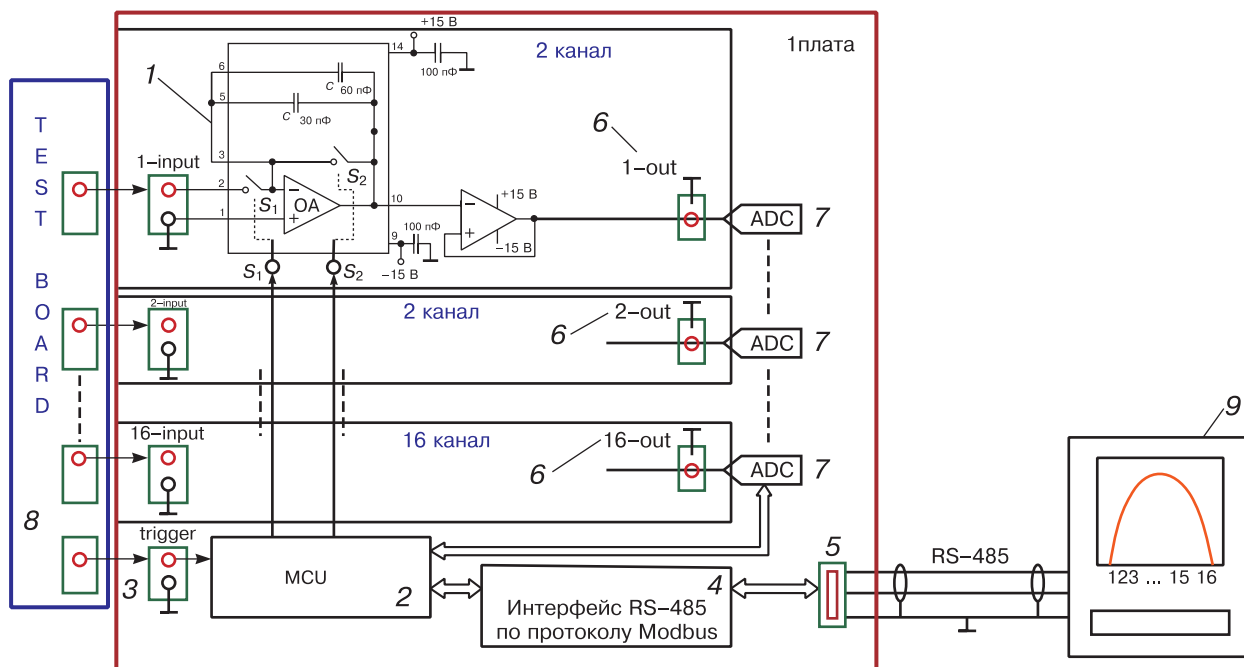


Рис. 4. Схема устройства платы 16-канального зарядочувствительного усилителя:

1 — принципиальная схема одного канала; 2 — микроконтроллер задающий с помощью сигналов S_1 и S_2 время интегрирования поступающих на вход сигналов; 3 — триггер запускающий плату на интегрирование и считывание обработанной информации в компьютер; 4 — интерфейс для передачи сигналов с 1плата на компьютер; 5 — разъем RS-485 для передачи данных в компьютер; 6 — аналоговые выходы с каждого канала на плате; 7 — ADC-микросхемы на каждом канале оцифровывающие аналоговый сигнал с каждого канала и передающие информацию на компьютер; 8 — тестовая плата имитирующая работу электродов камеры МИК; 9 — компьютер

Fig. 4. Diagram of the device board of a 16-channel charge-sensitive amplifier:

(1) schematic diagram of one channel; (2) microcontroller that sets the integration time of the signals arriving at the input using the signals S_1 and S_2 ; (3) trigger launching the board for integrating and reading the processed information into the computer; (4) interface for transmitting signals from 1 board to a computer; (5) RS-485 connector for data transfer to a computer; (6) analog outputs from each channel on the board; (7) ADC microcircuits on each channel digitizing the analog signal from each channel and transmitting information to the computer; (8) test board simulating the operation of the electrodes of the MIC; (9) computer

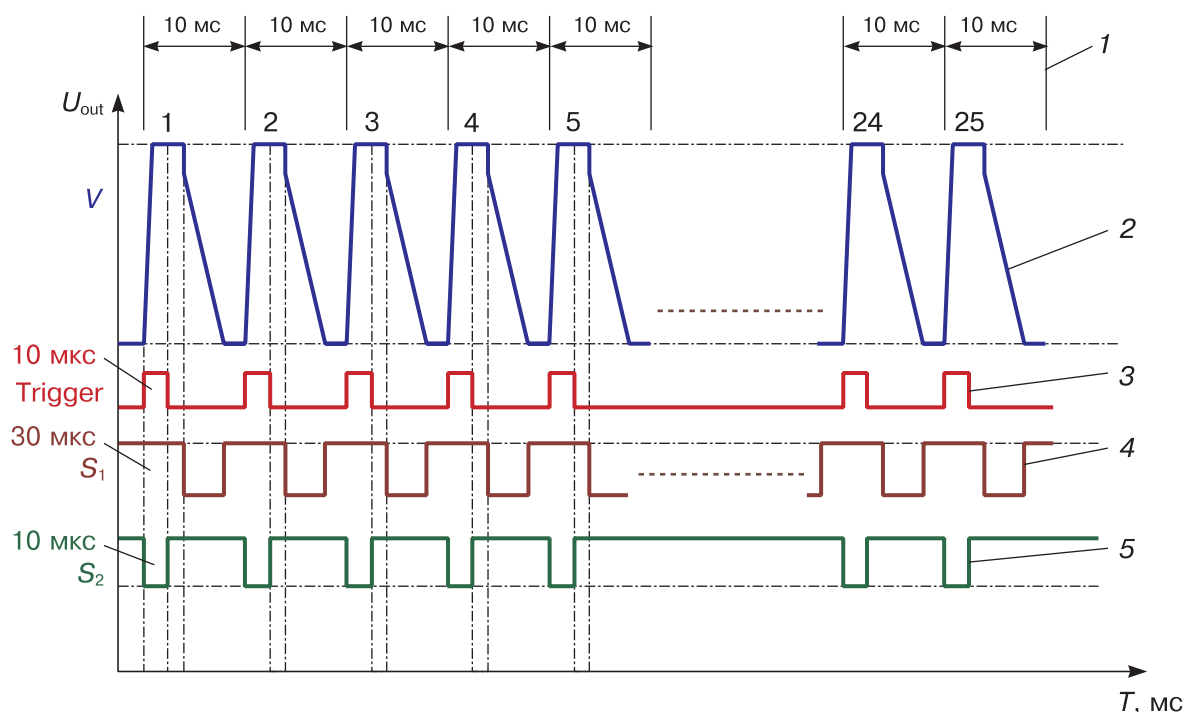


Рис. 5. Временная циклограмма работы 1плата для случая работы с камерой МИК:

1 — время интегрирования каждого канала 1плата составляла 10 мс; 2 — напряжение выходного аналогового сигнала во время интегрирования; 3 — триггерный сигнал длительностью 10 мкс и амплитудой +4 В; 4 — положительный сигнал S_1 длительностью 30 мкс подаваемый на интегрирующий операционный усилитель; 5 — отрицательный сигнал S_2 подаваемый на интегрирующий операционный усилитель

Fig. 5. Temporary cyclogram of work 1 board for the case of working with the MIC:

(1) integration time of each channel 1 board was 10 ms; (2) voltage of the output analog signal during integration; (3) trigger signal with a duration of 10 μ s and an amplitude of +4 V; (4) positive signal S_1 with a duration of 30 μ s applied to the integrating operational amplifier; (5) negative signal S_2 applied to the integrating operational amplifier

го 5 штук. Из рис. 4 видно, что в основе каждого канала лежит прецизионный зарядочувствительный усилитель с формирователем, динамический диапазон которого на входе составляет по току от 5 до 500 пА. Время интегрирования на 1П для всех каналов задается программой в микроконтроллере — MCU (2), и для работы со сканирующим пучком в прототипе камеры МИК составляет 10 мс.

Считывание с каждого канала профиля пучка происходит по протоколу Modbus по интерфейсу RS-485. На 1П применяются 12-разрядные ADC-преобразователи, преобразующие аналоговые сигналы поступающие с выхода каждого канала на схему ADC.

На рис. 5 приводится временная циклограмма поясняющая характеристики работы 1П для случая работы с камерой МИК (см. рис. 3).

Установка на рис. 5 работает со сканирующим пучком, при котором время сканирования одной сенсорной ячейки составляет 10 мс. Далее следует последовательный переход к облучению следующей сенсорной ячейки. Для случая работы нашей установки на рис. 5, мы проинтегрируем всего 5 импульсов 2 выходного напряжения изображенных на рис. 5. Каждый импульс напряжения 2 на рис. 5 это проинтегрированные сигналы с одного из интегрирующих электродов камеры МИК, за условный спот нейтронного пучка за время 10 мс.

На рис. 6 приведены результаты тестирования 1П, при которых со специальной тестовой платы подавались ослабленные сигналы на 16 входов 1П и измерялись аналоговые сигналы на выходе платы 1П. При этих испытаниях частота подачи триггерного сигнала и условия тестирования не совпадали параметрам работы установки на рис. 3 и параметрам циклограммы на рис. 5.

Применение камеры МИК с кольцевыми датчиками в нейтронной терапии на пучках быстрых нейтронов

Выше был представлен расчет, распределения дозы при прохождении высокоэнергетических нейтронов через трехслойную композиционную защиту на основе трех компонент — воды, титана и вольфрама. Данную защиту предполагается использовать при конструировании нейтронного канала на основе НГ-24. За аналог защиты взят патент [16] и работа [17].

Основной целью расчетов было максимальное возможное уменьшение габаритов расстояния источник—пациент (РИП). В процессе расчетов РИП получился равен 31 см. Для дистанционной терапии обычно используются нейтроны с энергией 10—30 МэВ. Интенсивность которых составляет около $(2-5) \cdot 10^{12}$ нейтрон/(см² · с).



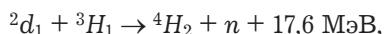
Рис. 6. Изображение выходного аналогового сигнала с одного из каналов 16-канальной 1плата:

1 — цикл подачи триггерного сигнала на 1плата составлял около 35 мкс; 2 — форма аналогового выходного сигнала; 3 — длительность по основанию выходного сигнала; 4 — частота подачи триггерного сигнала на 1плата 28,4 кГц

Fig. 6. Image of the output analog signal from one of the channels of the 16-channel 1 board:

(1) cycle of applying a trigger signal to 1 board was about 35 μs; (2) form of the analog output signal; (3) duration on the basis of the output signal; (4) frequency of the trigger signal on 1 board 28.4 kHz

В D—T-генераторах в реакции:



получают поток моноэнергетических нейтронов с энергией 14—15 МэВ.

Глубинное распределение поглощенной дозы в ткани для этих энергий быстрых нейтронов аналогично высоковольтному рентгеновскому излучению, половинная доза расположена в диапазоне 8—15 см, при расстоянии от РИП 1—1,5 м. Использование таких источников позволяет лечить глубокозалегающие опухоли.

В ВНИИА им. Н.Л. Духова (Москва) был разработан портативный генератор НГ-24 — источник нейтронов с энергией 14,1 МэВ с использованием ядерной реакции $^3T(d,n)^4He$ интенсивностью $\sim 10^{11}$ нейтрон/с для лучевой терапии. Известные крупногабаритные (стационарные) источники нейтронов с энергией 14 МэВ имеют выход нейтронов из мишени больше, чем у генератора НГ-24 в 15 раз.

Для удовлетворения терапевтических требований с источником нейтронов НГ-24 к мощности дозы на объект 8 сГр/мин необходимо расстояние РИП максимально уменьшать. Это требование было выполнено за счет принятия нового технического решения по применению защиты описанной выше. Предлагается заменить дорогостоящие материалы, формирующие нейтронный канал — материалы А, Б и В из работы [16, 17], на наши материалы, — воду, тиваробор [2] и вольфрам. Для работы на узком сканирующем протонном пучке ускорителя «Прометеус» удобно применять пря-

моугольную систему координат и прямоугольные интегральные электроды и сенсорные ячейки (см. рис. 3). При переходе к формированию нейтронного канала (рис. 7), где пучок симметричен относительно оси z и достаточно широкий (чуть менее на полувысоте выходного отверстия канала — 4 см), удобно перейти к цилиндрической системе координат. Амбиентная доза H_{10} на выходе канала спадает симметрично с удалением от оси z. Кроме того предлагается конструкцию интегрирующих электродов и сенсорных ячеек выполнить в виде колец, симметричных относительно оси z.

Как видно из рис. 7 защита состоит из основной защиты 2 и дополнительной 3. Дополнительная защита состоит из тиваробора и вольфрама. Она служит для выравнивания (уменьшения) дозы в районе колец камеры МИК с номерами от 6 до 11. Чтобы уменьшить дозу в направлении здоровых органов в пациента, лучи исходящие от источника проходят через защиту перед выходом к мишени пациента или детектора ЦДПИ. Таким образом, происходит плавный переход от 100 % дозы в канале к области колец, где доза проходит через клиническое значение d_{80} и далее идет спад дозы до клинического значения 20 %.

Проведенные расчеты программой FLUKA [12, 13] показали хорошее ослабление для высокоэнергетических нейтронов и гамма-квантов в диапазоне энергий 14 МэВ. Расчеты показали, что при длине РИП равным 31 см канал на рис. 7 обеспечивает дозу в районе мишени равную 8 сГр/мин, при интенсивности от НГ-24 равным $1,5 \cdot 10^{11}$ нейтрон/с, что является удовлетвори-

ным согласно рекомендациям МАГАТЭ [15]. Новое техническое решение конструкции, где камера МИК располагается вплотную после дополнительной защиты в виде трех конусов из материалов 5 и 6 позволяет сформировать малогабаритный нейтронный канал от нейтронного генератора НГ-24.

Камера МИК для нейтронного канала выполнена в виде диска, диаметр которого перекрывает выход из канала и всю защиту на выходе из него. Внутренняя часть МИК совпадающая с выходным отверстием канала имеет на поверхности колец сенсорные ячейки выполненные в виде стрипов расположенных симметрично на кольцах. Пучок нейтронов проходящий через выходное отверстие канала диаметром 4 см ориентирован на пациента или детектор ЦДПИ [12]. Основная техническая суть данной конструкции, это совместная работа канала и камеры МИК, в которую полностью помещается весь поток условных спотов нейтронного пучка. Камера МИК за весь так называемый условный выпуск (импульс из НГ-24) позволяет контролировать профиль пучка нейтронов падающий на мишень 10 (см. рис. 7). Для исследования распределения дозных полей может быть исполь-

зован детектор ЦДПИ с водным фантом 10 размерами $30 \times 30 \times 30 \text{ см}^3$ [11]. Для защиты пациента от рассеянного излучения генератор сверху окружен борированным полиэтиленом 13. Камера МИК в предложенном варианте исполнения с сенсорными ячейками, заполняющими кольцевые электроды, может работать также на сканирующем «карандашном» пучке ускорителя «Прометеус».

Заключение

Проведены теоретические расчеты трехслойной защиты от вторичного ортогонального нейтронного излучения для защиты детектора ЦДПИ, в виде так называемого «кувшина».

Предложен вариант многослойной композиционной теневой защиты для терапевтического канала на нейтронном генераторе НГ-24, на основе варианта рассчитанного для детектора ЦДПИ.

Приведен вариант прототипа конструкции камеры МИК для дозиметрии на медицинских источниках нейтронного излучения.

Приведены результаты испытания электронного тракта камеры МИК. Интегральные электро-

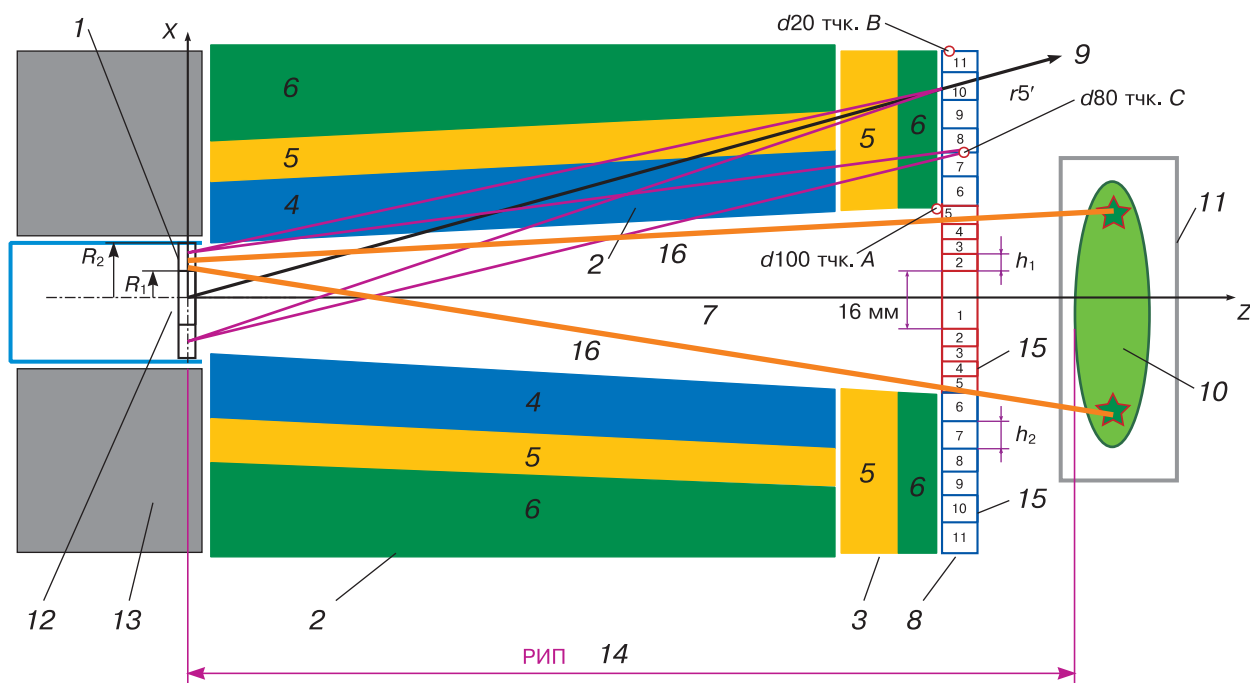


Рис. 7. Конструкция нейтронного канала для расчета трехслойной защиты от нейтронов:

1 — источник нейтронов НГ-24; 2 — основная защита из материалов 4, 5 и 6; 3 — дополнительная защита из материалов 5 и 6; 4 — вода; 5 — тиваробор; 6 — вольфрам; 7 — нейтронный канал; 8 — нейтронный детектор в применении камеры МИК с сенсорными ячейками в виде диска 1 и колец 2—5 с высотой кольца $h_1 = 4 \text{ мм}$, кольца 6—11 имеют высоту $h_2 = 12 \text{ мм}$; 9 — ось r_5' расположенная в плоскости xz , относительно которой проводился расчет программой FLUKA; 10 — облучаемая нейтронным пучком мишень (или водный фантом в детекторе ЦДПИ); 11 — детектор ЦДПИ; 12 — источник нейтронов с радиусом R_1 и R_2 ; 13 — борированный полиэтилен; 14 — расстояние источник пациент РИП; 15 — кольцевые электроды с сенсорными ячейками камеры МИК; 16 — условные споты нейтронного пучка направленные на мишень

Fig. 7. Design of the neutron channel for calculating three-layer neutron protection:

(1) source of neutrons NG-24; (2) main protection of material 4 (H_2O), 5 (tivarobor) and 6 (W); (3) additional protection of material 5 and 6; (7) neutron channel; (8) neutron detector in the use of a MIC with sensor cells in the form of a disk 1 and rings 2—5 with a ring height $h_1 = 4 \text{ mm}$, rings 6—11 have a height $h_2 = 12 \text{ mm}$; (9) axis r_5' located in the xz plane, relative to which the FLUKA program was calculated; (10) target irradiated by a neutron beam (or a water phantom in CDPI detector); (11) CDPI detector; (12) neutron source with radius R_1 and R_2 ; (13) borinated polyethylene; (14) distance source patient RIP; (15) ring electrodes with sensor cells of the MIC; (16) conditional neutron beam spots aimed at the target

ды камеры МИК и ее сенсорные ячейки выполнены по новой технологии с конструкцией в виде дисков с расположенными на них сенсорными ячейками. Переход на эту цилиндрическую конструкцию существенно упростит конструкцию для съема информации с сенсорных ячеек, как для нейтронной, так и для протонной терапии.

Применение новой многослойной композиционной защиты от нейтронов и камеры МИК позволит

улучшить конформность контроля дозиметрической обстановки на медицинских источниках нейтронного излучения, за счет более точного измерения вторичного потока нейтронов и подводимой дозы к мишени во время сеанса нейтронной терапии с точностью рекомендуемой МАГАТЭ [15]. В случае превышения допустимой дозы пучка нейтронов во время сеанса нейтронной терапии, схема СКОО будет мгновенно отключать источник нейтронов.

Библиографический список

1. Ястребинская А.В., Черкашина Н.И., Матюхин П.В. Радиационно-защитные нанонаполненные полимеры для космических систем. *Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований*. 2015; (12-7): 1191—1194.
2. Малютин Е.В., Сиксин В.В., Щеголев И.Ю. Исследование полимерных материалов модифицированных с использованием карбида бора В₄С, для радиационной защиты. *Авиакосмическая и экологическая медицина*. 2022; 56(1): 86—92. <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2022-56-1-86-92>
3. Tcherdyntsev V.V., Kaloshkin S.D., Lunkova A.A., Musalitin A.M., Danilov V.D., Borisova Yu.V., Boykov A.A., Sudarchikov V.A. Structure, mechanical and tribological properties of radiation cross-linked ultrahigh molecular weight polyethylene and composite materials based on it. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014; 586(1): S443—S445. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2013.05.150>
4. Охлопкова А.А., Петрова П.Н., Попов С.Н., Слепцова С.А. Полимерные композиционные материалы триботехнического назначения на основе политетрафторэтилена. *Российский химический журнал*. 2008; 52(3): 147—152.
5. Патент (РФ) № 2561989С1. Калошкин С.Д., Горшенков М.В., Чердынцев В.В., Гульбин В.Н., Бойков А.А. Радиационно-защитный материал на полимерной основе с повышенными рентгенозащитными и нейтронозащитными свойствами. Заявл. 10.09.2015; опублик. 10.09.2015. <https://patents.google.com/patent/RU2561989C1/ru>
6. Патент (РФ) № 2563650С1. Калошкин С.Д., Горшенков М.В., Чердынцев В.В., Гульбин В.Н., Бойков А.А. Способ получения радиационно-защитного материала на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена с повышенными радиационнозащитными свойствами. Заявл. 20.09.2015; опублик. 20.09.2015. <https://patents.google.com/patent/RU2563650C1/ru>
7. Wannasri S., Panina S.V., Ivanova L.R., Kornienko L.A., Piriyaon S. Increasing wear resistance of UHMWPE by mechanical activation and chemical modification combined with addition of nanofibers. *Procedia Engineering*. 2009; 1(1): 67—70. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2009.06.018>
8. Domnich V., Reynaud S., Haber R.A., Chhowalla M. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011; 94(11): 3605—3628. <https://doi.org/10.1111/J.1551-2916.2011.04865.X>
9. Сиксин В.В. Особенности контроля пучка падающими камерами на «теплой жидкости» на ускорителе «Прометейс». *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2021; 48(1): 16—23.
10. Милинчук В.К. Радиационная химия. *Соросовский образовательный журнал*. 2000; (4): 24—29.
11. Siksins V.V., Ryabov V.A., Shemyakov A.E. Bragg peak recording in the target scanning mode by a low-intensity proton beam. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2021; 48(12): 16—21. <https://doi.org/10.3103/S106833562112006X>
12. The official site: FLUKA home. <http://www.fluka.org>
13. Fasso A., Ferrari A., Ranft J., Sala P.R. FLUKA: a multi-particle transport code. 12 October 2005. <https://doi.org/10.2172/877507>
14. Сиксин В.В. Оптический датчик для измерения профиля сканирующего пучка протонов на терапевтическом ускорителе «Прометейс». *Краткие сообщения по физике ФИАН*. 2022; 49(5): 10—21.
15. Определение поглощенной дозы при дистанционной лучевой терапии: Международные практические рекомендации по дозиметрии, основанные на эталонах единицы поглощенной дозы в воде. При поддержке IAEA, WHO, PAHO и ESTRO. МАГАТЭ. *Серия технических докладов № 398. Вена, июнь 2004*. https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/trs398r_web.pdf
16. Патент (РФ) № 2442620С2. Литяев В.М., Ульяненко С.Е., Горбушин Н.Г. Устройство для лучевой терапии быстрыми нейтронами. Заявл. 20.02.2012; опублик. 20.02.2012. <https://patents.google.com/patent/RU2442620C2/en>
17. Литяев В.М., Фёдоров В.В., Соловьёв А.Н., Ульяненко С.Е. Устройство для формирования терапевтических нейтронных полей на базе генератора НГ-24. *Медицинская физика*. 2016; 2(70): 94—100.

References

1. Yastrebinskaya A.V., Cherkashina N.I., Matiukhin P.V. The radiation and protective nanofilled polymers for space systems. *Mezhdunarodnyi Zhurnal Prikladnykh i Fundamental'nykh Issledovaniy*. 2015; (12-7): 1191—1194. (In Russ.)
2. Malyutin E.V., Siksins V.V., Schegolev I.Yu. Testing polymer materials modified with the use of boron carbide B₄C for radiation protection. *Aerospace and Environmental Medicine*. 2022; 56(1): 86—92. (In Russ.). <https://doi.org/10.21687/0233-528X-2022-56-1-86-92>
3. Tcherdyntsev V.V., Kaloshkin S.D., Lunkova A.A., Musalitin A.M., Danilov V.D., Borisova Yu.V., Boykov A.A., Sudarchikov V.A. Structure, mechanical and tribological properties of radiation cross-linked ultrahigh molecular

- weight polyethylene and composite materials based on it. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014; 586(1): S443—S445. <https://doi.org/10.1016/J.JALLCOM.2013.05.150>
4. Okhlopko A.A., Petrova P.N., Popov S.N., Sleptsova S.A. Tribotechnical polymer composite materials based on polytetrafluoroethylene. *Russian Chemistry Journal*. 2008; 52(3): 147—152. (In Russ.)
5. Patent (RU) No. 2561989C1. Kaloshkin S.D., Gorchshenkov M.V., Cherdyn'tsev V.V., Gulbin V.N., Boikov A.A. Polymer-based radiation-proof material with high resistance to X-ray and neutron radiation. Appl. 10.09.2015; publ. 10.09.2015. (In Russ.). <https://patents.google.com/patent/RU2561989C1/ru>
6. Patent (RU) No. 2563650C1. Kaloshkin S.D., Gorchshenkov M.V., Cherdyn'tsev V.V., Gulbin V.N., Boikov A.A. Method of producing radiation-protective material based on ultra-high-molecular-weight polyethylene with improved radiation-protective properties. Appl. 20.09.2015; publ. 20.09.2015. (In Russ.). <https://patents.google.com/patent/RU2563650C1/ru>
7. Wannasri S., Panina S.V., Ivanova L.R., Kornienko L.A., Piriyaon S. Increasing wear resistance of UHMWPE by mechanical activation and chemical modification combined with addition of nanofibers. *Procedia Engineering*. 2009; 1(1): 67—70. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2009.06.018>
8. Domnich V., Reynaud S., Haber R.A., Chhowalla M. Boron carbide: structure, properties, and stability under stress. *Journal of the American Ceramic Society*. 2011; 94(11): 3605—3628. <https://doi.org/10.1111/J.1551-2916.2011.04865.X>
9. Siksin V.V. Features of beam monitoring by “warm-liquid” pad chambers at the “Prometheus” accelerator. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2021; 48(1): 16—23. (In Russ.)
10. Milinchuk V.K. Radiation chemistry. *International Soros Science Education Program*. 2000; (4): 24—29. (In Russ.)
11. Siksin V.V., Ryabov V.A., Shemyakov A.E. Bragg peak recording in the target scanning mode by a low-intensity proton beam. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2021; 48(12): 16—21. <https://doi.org/10.3103/S106833562112006X>
12. The official site: FLUKA home. <http://www.fluka.org> <http://www.fluka.org>
13. Fasso A., Ferrari A., Ranft J., Sala P.R. FLUKA: a multi-particle transport code. October 12, 2005. <https://doi.org/10.2172/877507>
14. Siksin V.V. Optical sensor for measuring the profile of a scanning proton beam at the “Prometheus” therapeutic accelerator. *Bulletin of the Lebedev Physics Institute*. 2022; 49(5): 10—21. (In Russ.)
15. Absorbed dose determination in external beam therapy: international practice guidelines for dosimetry based on standards for the unit of absorbed dose in water. *Supported by IAEA, WHO, PAHO and ESTRO. IAEA. Technical paper series No. 398. Vienna, June 2004*. (In Russ.). <https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/trs398rweb.pdf>
16. Patent (RU) No. 2442620C2. Lityaev V.M., Ulyanenko S.E., Gorbushin N.G. Device for fast neutrons radiation cancer therapy. Appl. 20.02.2020; publ. 20.02.2020. (In Russ.). <https://patents.google.com/patent/RU2442620C2/en>
17. Lityaev V.M., Fedorov V.V., Solovyev A.N., Ulyanenko S.E. Beam shaper hardware for therapeutic facility based on NG-24 neutron generator. *Medical Physics*. 2016; 2(70): 94—100. (In Russ.)

Информация об авторе / Information about the author

Сиксин Виктор Валентинович — канд. физ.-мат. наук, старший научный сотрудник, Физический институт имени П.Н. Лебедева Российской академии наук, Ленинский просп., д. 53, Москва, 119991, Российская Федерация; e-mail: 11wvpet_lb_salo@inbox.ru

Viktor V. Siksin — Cand. Sci. (Phys.-Math.), Senior Researcher, Lebedev Physical Institute of the Russian Academy of Sciences, 53 Leninsky Ave., Moscow 119991, Russian Federation; e-mail: 11wvpet_lb_salo@inbox.ru

Поступила в редакцию 01.09.2022; поступила после доработки 20.09.2022; принята к публикации 22.09.2022
Received 01 September 2022; Revised 20 September 2022; Accepted 22 September 2022

* * *