

ТЕХНИЧЕСКИЕ НАУКИ

УДК:53.082.79

КАЛИБРОВКА ТЛД В ПУЧЕ ИОНОВ УГЛЕРОДА РБС У-70*Алексеев Александр Григорьевич,**старший научный сотрудник,**Васильева Алина Геннадьевна,**инженер-исследователь,**Пикалов Владимир Александрович,**начальник лаборатории**«НИЦ Курчатовский институт»-ИФВЭ, г.Протвино**Кiryuhin Олег Владимирович**Инженер**МГУ, Москва**Alexeev A.G., Vasilva A.G, Pikalov V.A.**NRC «Kurchatov Institute» – IHEP**Kiryuhin O.V. (MSU, Moscow)**DOI: 10.31618/ESU.2413-9335.2022.1.99.1672***АННОТАЦИЯ**

Представлены результаты калибровки ТЛД в пучке ядер углерода РБС У-70. Облучение выполнялось на разных глубинах водного фантома. Значение ЛПЭ в точке облучения оценивалось по результатам расчета по программе MCNPX. Диапазон ЛПЭ составил от 12 до 200 кэВ/мкм. Предложена методика введения поправки на показания ТЛД по зависимости высокотемпературного соотношения в КТВ от величины ЛПЭ.

ABSTRACT

The results of TLD calibration in the RBS U-70 carbon beam are presented. Irradiation was performed at different depths of the water phantom. The LET value at the place of irradiation was estimated from the results of calculations using the MCNPX program. The LET range was from 12 to 200 keV/μm. A method is proposed for the insertion of a correction for TLD readings according to the dependence of the high-temperature ratio in the *thermoluminescence curve* on the LET value.

Ключевые слова: ТЛД, ионы углерода, поглощенная доза, ЛПЭ

Keywords: TLD, carbon ions, absorbed dose, LET

ВВЕДЕНИЕ

В НИЦ «Курчатовский институт» - ИФВЭ создан «Центр коллективного пользования «Радиобиологический стенд на углеродном пучке У-70» (РБС У-70)[1]. В настоящее время на базе РБС У-70 в НИЦ «Курчатовский институт» – ИФВЭ согласно постановлению правительства № 287 от 16.04.2020 ведутся работы по проектированию Комплекса ионно-лучевой терапии [2]. Планируется создание экспериментально-клинического центра с пропускной способностью до 200 пациентов в год для одного модуля.

Основные работы, которые ведутся на РБС У-70:

проведение радиобиологических экспериментов на пучке ядер углерода в диапазоне энергий 450 – 180 МэВ/нуклон;

проведение исследований по дозиметрии в пучке ядер углерода в диапазоне энергий 450 – 180 МэВ/нуклон и в полях вторичного излучения, образующихся после взаимодействия ядер углерода с мишенями;

проведение исследований аппаратуры для измерения ионизирующих излучений в большом диапазоне мощностей доз и энергий;

проведение исследований по верификации расчётных программ моделирующих взаимодействие ядер углерода с веществом.

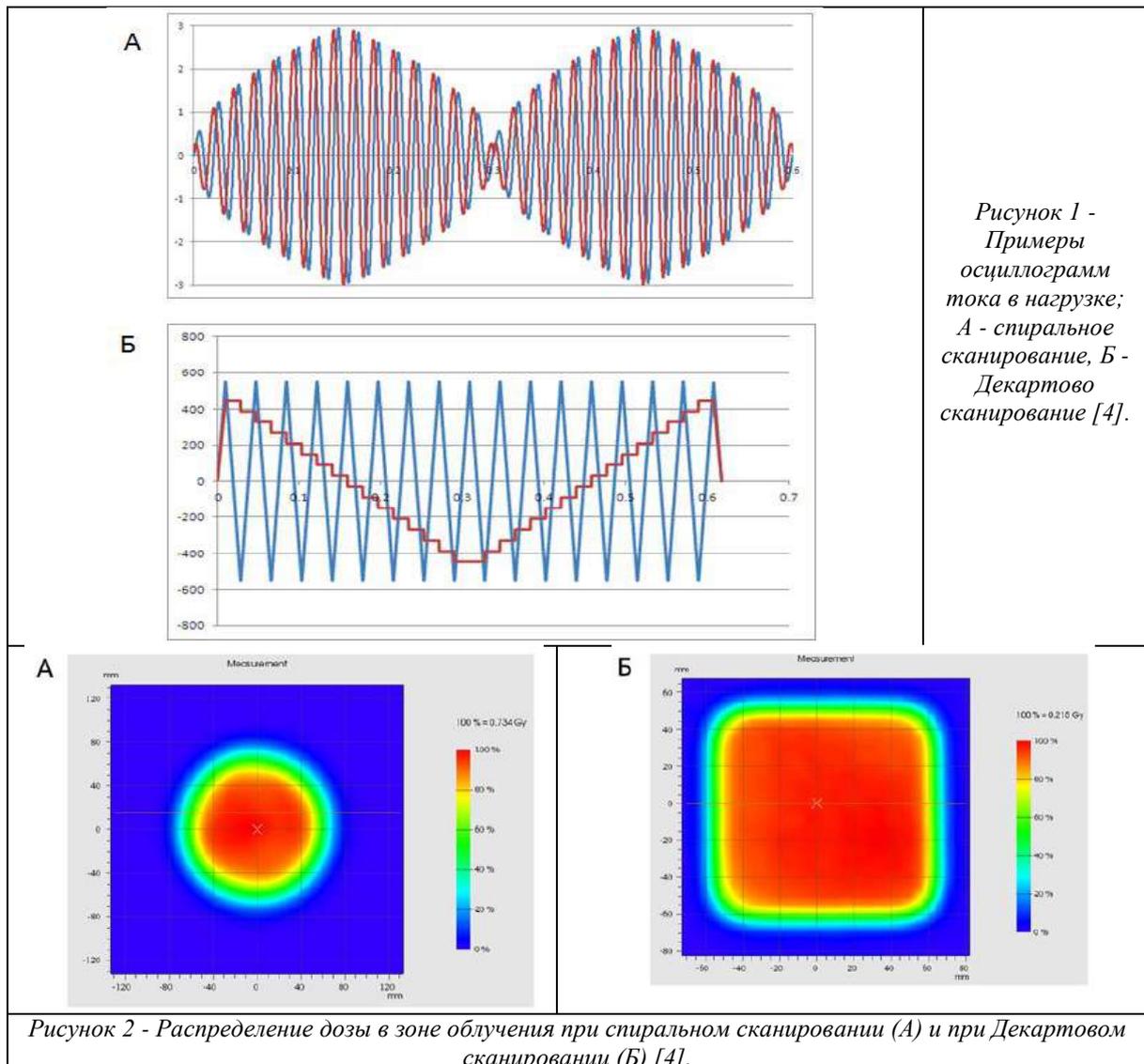
На данный момент РБС работает в каждом сеансе работы ускорителя У-70, и совместно со специалистами МРНЦ им. А.Ф. Цыба (Обнинск), ИТЭБ РАН (Пушино) и ГНЦ РФ - ИМБП РАН (Москва) проводятся радиобиологические и предклинические исследования. Для дозиметрического сопровождения радиобиологических исследований используются ионизационные камеры, термомолиментные детекторы (ТЛД), радиохромные пленки и др. Для обеспечения качества в измерении поглощенной дозы в пучке ядер углерода, необходимо учесть все факторы, влияющие на погрешность измерения. Например, в работе [3] было выполнено исследование зависимости чувствительность ТЛД от линейной передачи энергии (ЛПЭ) излучения. Цель настоящей работы – проведение калибровки ТЛД в пучке ядер углерода и возможности введения поправки на зависимость чувствительности ТЛД от ЛПЭ, используя параметры кривой термовысвечивания КТВ.

РБС У-70

На существующем в ИФВЭ ускорительном комплексе У-70 был освоен медленный вывод пучка ускоренных ионов углерода промежуточных энергий в экспериментальный зал с РБС. Энергия пучка ионов углерода C^{+6} , его интенсивность, временная структура и другие параметры на данный момент соответствуют необходимым требованиям для медицинского применения. Медленный вывод углеродного пучка из ускорителя осуществляется по схеме, предложенной О. Пиччони и Б. Т. Райтом в 1954–1955 гг. Схема основана на снижении энергии пучка, проходящего через твердую мишень. В настоящее время доступны 6 фиксированных значений энергии выведенного пучка углерода: 450, 400, 350, 300, 250 и 200 МэВ / нуклон [4].

Зона РБС имеет биологическую защиту с единой системой контроля доступа в экспериментальную и медицинскую зоны. Эти зоны также отделены друг от друга бетонной стеной с промежуточным металлическим коллиматором для регулировки размеров пучка. Апертуру коллиматора внутри стены можно изменять вручную от 50x50 мм до 150x150 мм с

использованием специальных вставок. В радиобиологической экспериментальной зоне находятся разработанная и изготовленная сотрудниками ИФВЭ электромагнитная система сканирования и формирования равномерного дозного поля на пациенте. Максимальный размер дозного поля 15x15 см, а неоднородность в месте облучения составляет не более $\pm 2,5\%$. Сама система сканирования состоит из вертикального и горизонтального дипольных воблер-магнитов и их источников питания (амплитуда выходного тока ± 700 А; частота выходного тока 20-60 Гц; нагрузочная индуктивность ≤ 0.42 мГн). Формы токов в обмотках магнитов представлены на рисунке 1. Поперечные распределения дозы для двух возможных типов сканирования представлены на рисунке 2. Для точной подстройки энергии пучка до необходимой величины используется автоматический дегрейдер, в него вставляются пластины из ПММА толщиной от 1 до 32 мм для плавного регулирования энергии пучка. Специально разработанный гребенчатый фильтр из алюминия (высота гребня – 16 мм) используется для модификации пика Брэгга по глубине [5].



В медицинской зоне находится лазерный центратор и водный фантом с 3D системой перемещения. Для будущих пациентов здесь также установлен 6-координатный стол с системой автоматизированного управления, на котором в настоящий момент располагается водный фантом. Стол полностью разработан и изготовлен сотрудниками ИФВЭ. Дека сделана из углепластика. Точность позиционирования стола в декартовых координатах не хуже $\pm 0,5$ мм. Для измерения двумерного распределения дозы была разработана и изготовлена специальная матричная плоскопараллельная ионизационная камера, а также электроника и программное обеспечение для работы с ней.

ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ СРЕДСТВА ИЗМЕРЕНИЯ

В данной работе использовались термолюминесцентные детекторы ММТ7: поликристаллические, производства RADCARD (Польша, LiF, www.radcard.pl). Разработаны специально для дозиметрии в пучках ионов с большим ЛПЭ. Для обработки ТЛД использовалась установка HARSHAW-4000. Режим измерения: быстрый преднагрев до $100\text{ }^{\circ}\text{C}$, затем нагрев со скоростью 3°/с . Обработка КТВ выполняется следующим образом: для измерения поглощенной дозы берется интеграл под основным дозиметрическим пиком (смотри рисунок 3), как правило он соответствует каналу -100 ($220\text{ }^{\circ}\text{C}$). Для расчета дозы берется интеграл между 68 ($170\text{ }^{\circ}\text{C}$) и 120 каналом $-\delta$; интеграл высокотемпературных пиков ε — между 120 и 181 каналами, что соответствует 244 и $315\text{ }^{\circ}\text{C}$.

В работе [6] было предложено использовать высокотемпературное соотношение HTR в кривых

термовысвечивания ТЛД для оценки ЛПЭ в точке облучения. HTR определяется как:

$$HTR = \frac{\varepsilon_k / \delta_k}{\varepsilon_\gamma / \delta_\gamma}$$

Где k — определяется по КТВ для «сильно» ионизирующего излучения (протоны и ионы); γ — по КТВ гамма-излучения.

Кроме того используется поправки на изменение чувствительности от времени отжига до момента облучения и на фединг (потеря информации от времени облучения до времени обсчета). Эти поправки определяются экспериментально для каждого ТЛД после обсчета после облучения.

Также в работе использовался универсальный прецизионный дозиметр UNIDOS weblines компании PTW (Германия, PTW-Freiburg, www.ptwdosimetry.com) [7, 8]. Данный дозиметр разработан специально для лучевой терапии, диагностической радиологии и медицинской физики. Дистанционное управление прибором и передача данных производится при помощи интерфейса RS-232 или Ethernet (протокол TCP/IP). Есть возможность поправки на температуру, давление и плотность воздуха. В качестве детектора дозиметра использовалась подключенная к нему водонепроницаемая цилиндрическая ионизационная камера типа Farmer 30013 компании PTW с алюминиевым электродом, материал оболочки — графит с защитным акриловым покрытием (чувствительный объем 0.6 см^3) [7].

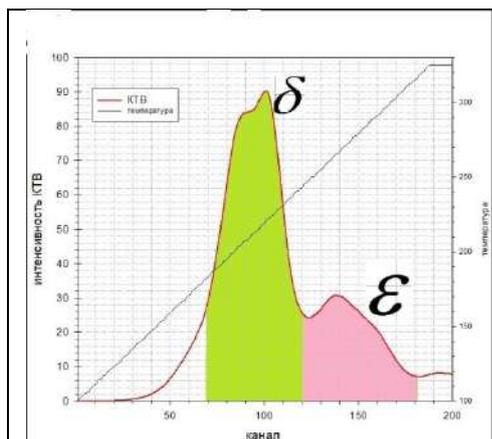


Рисунок 3 – КТВ и области для расчета высокотемпературное соотношение (зеленая заливка- δ ; розовая- ε)



Рисунок 4 – Водный фантом [4].

Используемый водный фантом (изготовление ИФВЭ) представляет собой контейнер с внешними размерами $590 \times 360 \times 375$ мм, заполненный водой (рисунок 4). Материал стенок фантома — поликарбонат. Толщина передней стенки (относительно направления пучка) составляет 30 мм, боковых — 15 мм. Внутри контейнера размещен кессон. Внешние размеры кессона

составляют $130 \times 240 \times 265$ мм, толщина передней стенки — 5 мм (полиметилметакрилат, PMMA, оргстекло), задней и боковых стенок — 15 мм (поликарбонат). Изменение координат кессона внутри фантома осуществляется с помощью высокоточной автоматизированной системы перемещения.

ОБЛУЧЕНИЕ ТЛД В ПУЧКЕ УГЛЕРОДА

Схема расположения оборудования при выполнении измерений представлена на рисунке 5.

Реальная координата точки измерения в воде вычисляется с учетом водных эквивалентов материалов стенки фантома (поликарбонат, толщина 30 мм), кессона (оргстекло, толщина 5 мм) и 12,7 мм воды до передней стенки кессона. Водные эквиваленты в данном случае берутся по плотностям материалов: расчетная плотность

оргстекла - $\rho(\text{PMMA}) = 1,126 \text{ г/см}^3$; табличная плотность монолитного поликарбоната - $\rho(\text{PC}) = 1,2 \text{ г/см}^3$. Отсюда реальная координата точки измерения в мм определяется как:

$$y_{\text{true}} = 295 - y + 5 \cdot 1,126 + 30 \cdot 1,2 + 12,7$$

Где y – программно определенная координата положения внутренней поверхности передней стенки кессона водного фантома, мм.

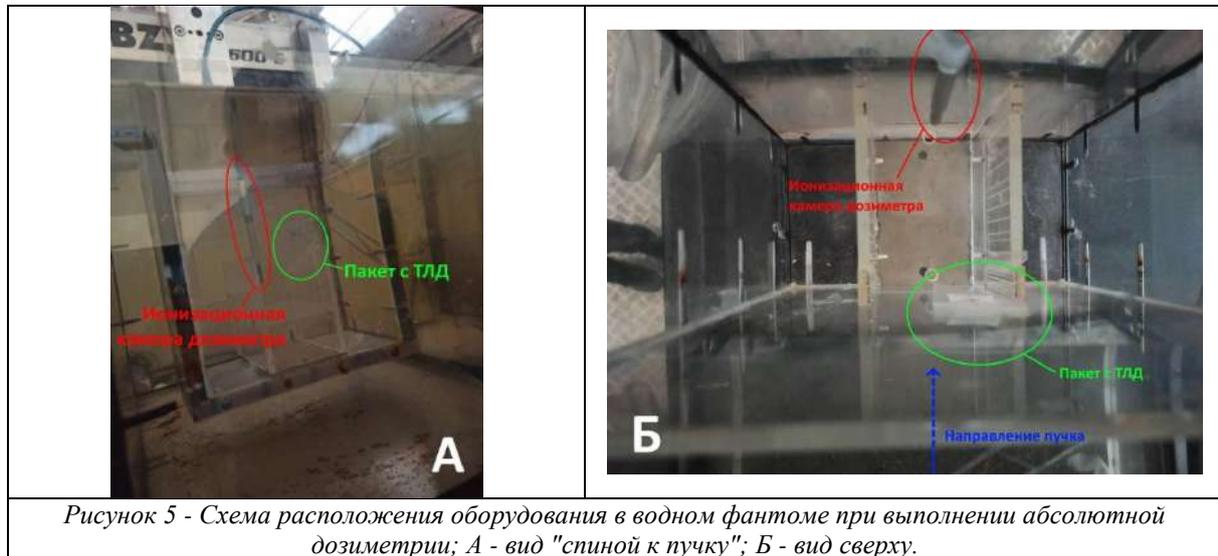


Рисунок 5 - Схема расположения оборудования в водном фантоме при выполнении абсолютной дозиметрии; А - вид "спиной к пучку"; Б - вид сверху.

РАСЧЕТ СРЕДНЕЙ ЛПЭ В ВОДНОМ ФАНТОМЕ

Расчет средней ЛПЭ в водном фантоме от ядер углерода выполнялся по программе MCNPX [9]. В качестве тестирования программы (для внесения поправок) для расчетов переноса ядер углерода в фантоме использовались экспериментальные данные из работы [10]. На рисунках 6-8 приведены результаты расчета в сравнении с

экспериментальными данными. Ослабление плотности потока первичных ядер ^{12}C в водном фантоме (рисунок 6). Плотность потока протонов (нормированная на плотность потока первичных ядер углерода) в водном фантоме (рисунок 7). Для иллюстрации вклада фрагментов в поглощенную дозу приведена поглощенная доза от ядер углерода и фрагментов в водном фантоме (рисунок 8).

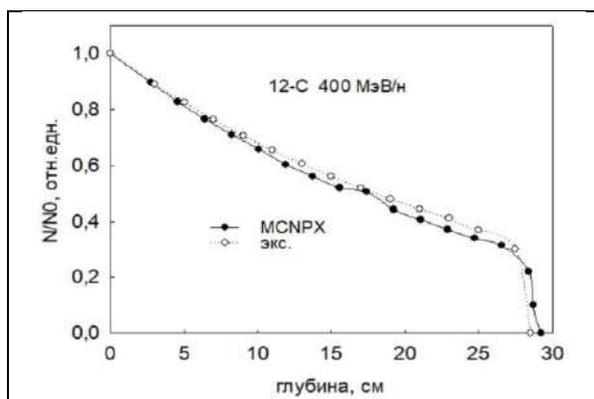


Рисунок 6 - Ослабление плотности потока первичных ядер ^{12}C в водном фантоме; расчет – MCNPX, эксперимент [9]. Энергия ядер углерода - 400 МэВ/н.

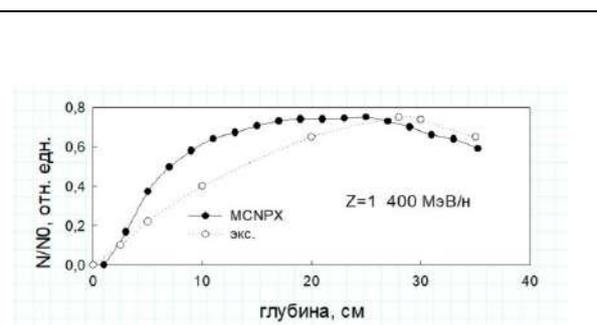


Рисунок 7 - Плотность потока протонов (нормированная на плотность потока первичных ядер углерода) в водном фантоме. Расчет – MCNPX, эксперимент [10].

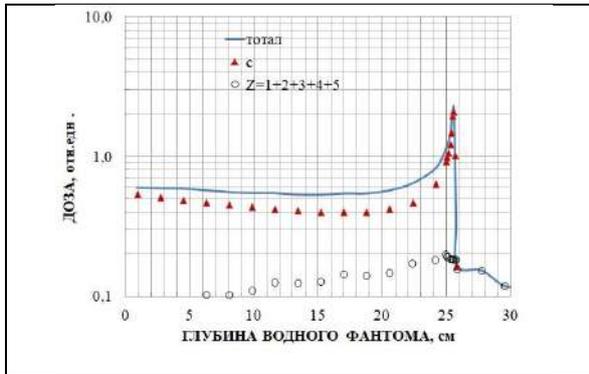


Рисунок 8 – Поглощенная доза от ядер углерода в водном фантоме (с-только от ядер углерода, O – от вторичных частиц с разными Z; тотал – суммарная величина дозы. Расчет по MCNPX. Энергия ядер углерода влетающих в водный фантом -376,4 МэВ/н.

РЕЗУЛЬТАТЫ

На рисунке 9 приведены результаты расчета дозы по глубине фантома в сравнении с результатами измерений на РБС У-70.(первичная энергия ядер углерода 400 МэВ/н, для расчета принималась энергия ядер углерода при входе в

водный фантом -376,4 МэВ/н, соответствующая пробегу в воде, зафиксированному в измерениях). На рисунке 10 приведены результаты расчета средней величины ЛПЭ (по поглощенной дозе) по глубине фантома (энергия ядер углерода -376,4 МэВ/н).

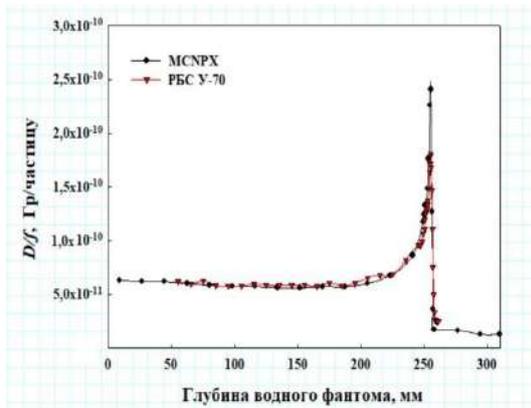


Рисунок 9 - Поглощенная доза по глубине фантома; расчет и результаты измерений.

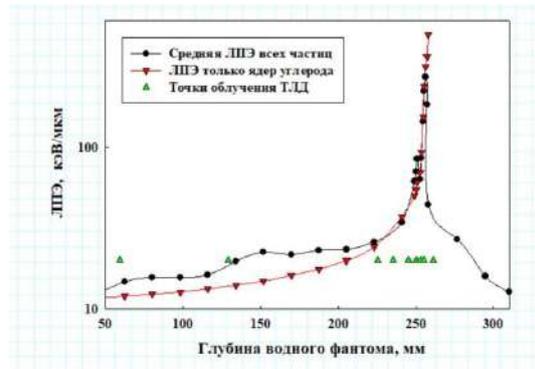


Рисунок 10 - Средняя величина ЛПЭ по глубине водного фантома. Треугольники-точки облучения ТЛД в фантоме.

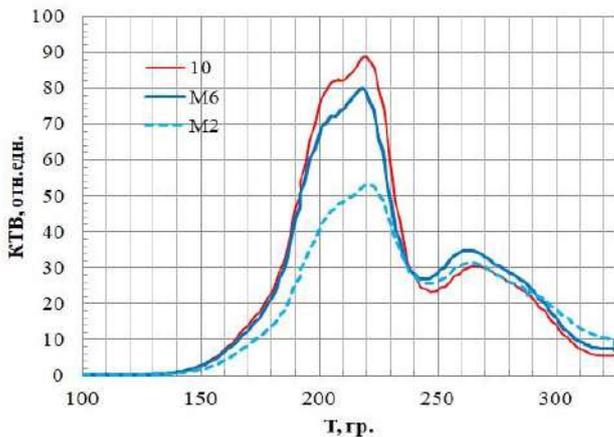


Рисунок 11 – Кривые КТВ, при облучении ТЛД на разных глубинах фантома.
10- глубина 12,9 см;
M6 -23,5 см;
M2 -25,53 см (пик Брегга). Энергия ядер углерода на входе в водный фантом --376,4 МэВ/н (энергия ускорителя-400 МэВ/н)

На рисунке 11 приведены КТВ для облученных ТЛД на разных глубинах водного фантома. Видно, что основной дозиметрический пик (220°) уменьшается с глубиной (увеличение средней ЛПЭ), в то же время высокотемпературный

пик (выше 250. С°) практически не зависит от ЛПЭ. В таблице 1 приведены результаты измерений (D – показания ТЛД по основному дозиметрическому пику относительно результатов измерений с помощью ионизационной камеры).

Таблица 1

Результаты измерений.

Точка облучения ТЛД мм	пакет	ЛПЭ, кэВ/мкм	HTR	D (относительно показаний ионизационной камеры)
59,3	11	14,8	1,90	1,02
129,	10	19,2	1,85	0,94
225,3	9	26	2,3	0,87
235,	M6	32	2,49	0,79
245,3	M5	43	2,79	0,74
250,3	M4	71	3,25	0,67
252,8	M3	90	3,25	0,65
255,3	M2	265	4,2	0,59

Надо отметить, что величина HTR зависит от величины дозы. На рисунке 12а приведены КТВ облученных ТЛД в поле излучения гамма квантов ^{137}Cs в диапазоне доз от 0,0077 до 72 Гр. Видно, что отношение высокотемпературного и основного дозиметрического пика меняется с дозой. На рисунке 12б приведена зависимость отношения основного пика и высокотемпературного при облучении гамма квантами и ядрами углерода. Видно, что чем ниже доза (ниже 1 Гр) тем сильнее различие при облучении гамма квантами и углеродом. На рисунке 13 приведены КТВ при облучении в пучке ядер углерода (ЛПЭ ~12 кэВ/мкм) при разных дозах, там же приведены КТВ при облучении гамма квантами при разных дозах. Видно для величина HTR, даже если брать КТВ при облучении одной и той же дозой ядрами углерода и гамма квантов зависит от величины дозы.

При ЛПЭ излучения менее 1 кэВ/мкм HTR практически совпадают с величиной для гамма квантов. Это иллюстрирует рисунок 14а,б, где приведены кривые КТВ при облучении протонами 30 МэВ (1,9 кэВ/мкм) и 120 МэВ (0,6 кэВ/мкм). Облучение выполнено на терапевтическом ускорителе ФТЦ ФИАН

Таким образом, для корректного учета зависимости HTR от ЛПЭ поглощенная доза от ионов желательнее не должна превышать 1 Гр. Однозначная зависимость поправки (отношение показаний ионизационной камеры и результатов измерения поглощенной дозы по основному дозиметрическому пику ТЛД) и средней по дозе ЛПЭ от HTR позволяет корректно получать значение поглощенной дозы и оценивать значение ЛПЭ в точке измерения.

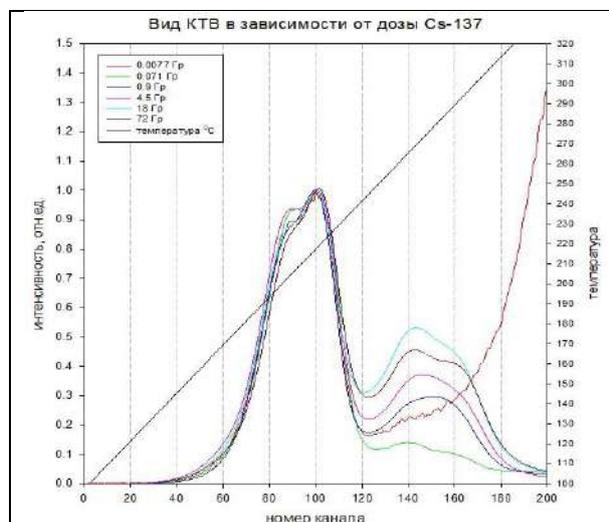


Рисунок 12а- КТВ ММТ7 облученных гамма квантами ^{137}Cs разными дозами. Нормировка на основной дозиметрический пик

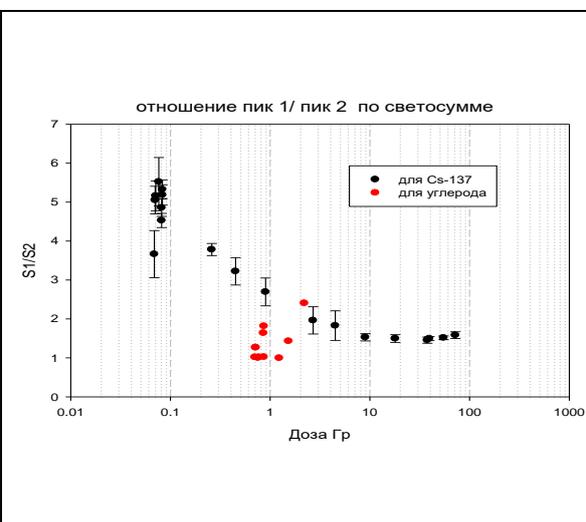


Рисунок 12б- Отношение светосумм основного пика и высокотемпературного в зависимости от дозы для гамма квантов и углерода

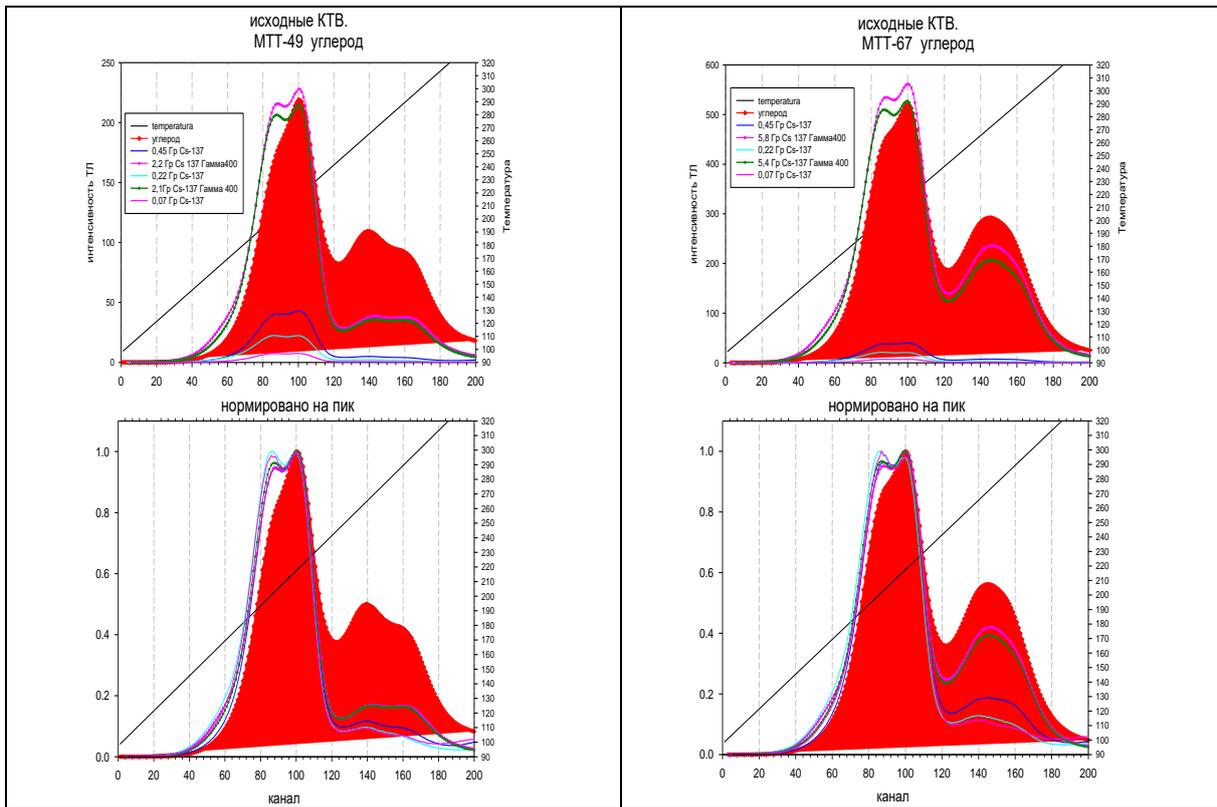


Рисунок 13а- КТВ, при облучении в пучке углерода (доза 2,1 Гр) и в гамма квантами разной дозой.

Рисунок 13а- КТВ, при облучении в пучке углерода (доза 5,4 Гр) и в гамма квантами разной дозой.

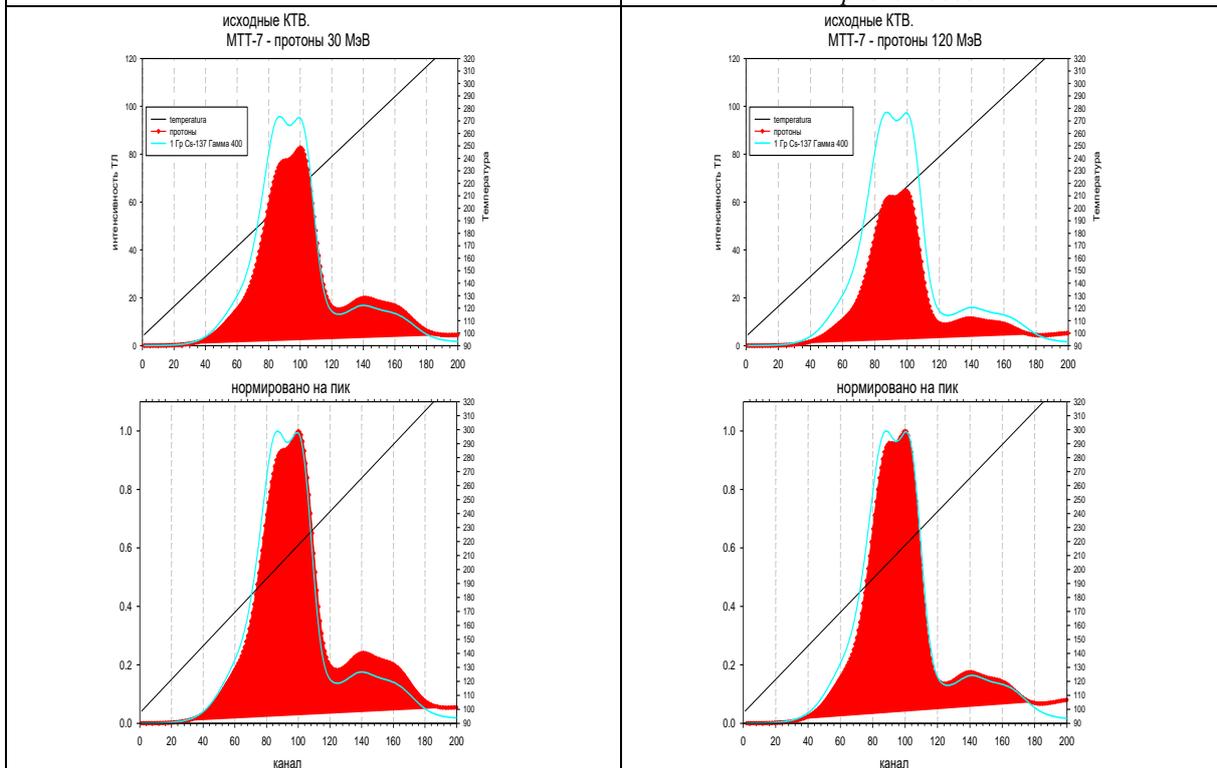


Рисунок 14а – КТВ при облучении протонами 30 МэВ.

Рисунок 14а – КТВ при облучении протонами 120 МэВ.

На рисунках 15 и 16 приведены зависимости поправки и ЛПЭ от величины НТР. Таким образом, если не использовать поправку на основе НТР, неопределенность за счет зависимости чувствительности ТЛД от ЛПЭ может составлять -

40%. При расчете величины НТР использовались данные КТВ и $\frac{\epsilon_\gamma}{\delta_\gamma}$ полученные при калибровке на стандартном радионуклидном источнике ^{137}Cs . Доза облучения гамма излучением составляла 1 Гр.

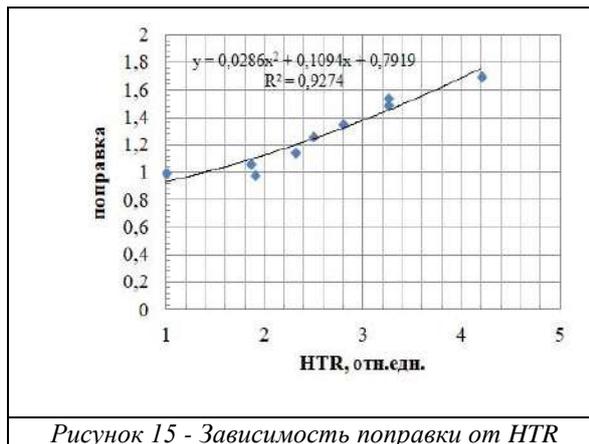


Рисунок 15 - Зависимость поправки от HTR

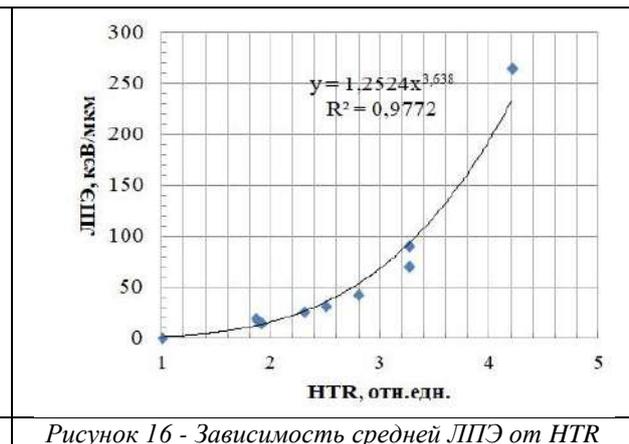


Рисунок 16 - Зависимость средней ЛПЭ от HTR

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполнена калибровка ТЛД типа ММТ7 в условиях облучения в водном фантоме при первичной энергии ядер углерода 400 МэВ/нуклон. Диапазон изменения ЛПЭ составил от 12 до 250 кэВ/мкм. При использовании данной калибровки погрешность измерения поглощенной дозы с помощью данного типа ТЛД можно существенно уменьшить до погрешности калибровки на эталоне поглощенной дозы (может составлять 2-3%).

Кроме того, планируется провести калибровку для всех энергий ядер углерода которые используются на РБС У-70, а так же для модифицированных пучков с помощью гребенчатых фильтров.

Область применения ТЛД на РБС У-70:

- дозиметрическое сопровождение радиобиологических экспериментов (позволяет получать величину дозы с приемлемой точностью и оценивать величину ЛПЭ в точке облучения;
- для верификации плана облучения; в сложной геометрии, где затруднительно использовать стандартные ионизационные камеры клинического дозиметра.

ССЫЛКИ

<http://ihp.ru/pages/main/6580/8769/index.shtml> (дата обращения -24.09.2022г.). <https://ckp-rf.ru/catalog/ckp/507813/> (дата обращения - 10.102022г.0

Постановление Правительства Российской Федерации от 16.03.2019 №287 «Об утверждении Федеральной научно-технической программы развития синхротронных и нейтронных исследований и исследовательской инфраструктуры на 2019 - 2027 годы»

Алексеев А.Г., Кирюхин О.В., Батухтина О./ Исследование зависимости характеристик термолюминесцентных детекторов от величины ЛПЭ излучения/ Журнал: Евразийский Союз Ученых (ЕСУ) # 2 (59), 2019. <https://www.doi.org/10.31618/ESU.2413->

9335.2019.1.59.43-47 <https://euroasia-science.ru/wp-content/uploads/2019/03/43-47-Alekseev-A.G.-Kiryukhin-OV-Batukhtina-OI.pdf>. (дата обращения - 24.09.2022г.).

Pikalov, V.A. et al., "Experimental Facility "Radiobiological Test Setup on Accelerator U-70" as Centers for Collective Use (CCU)", in Proc. RuPAC2021, Alushta, Russia, 2021. P. 124-126. doi:10.18429/JACoW-RuPAC2021-FRB06.

Создание специализированного гребенчатого фильтра для получения равномерной биологической дозы на пучке ионов углерода / Соловьев А.Н. [и др.] // Медицинская физика. 2021. Т. 89. № 1. С. 48.

N. Vana, W. Schöner, Y. Akatov / Absorbed Dose Measurement and LET Determination with TLDs in Space *Radiation Protection Dosimetry*, Volume 66, Issue 1-4, 1 July 1996, Pages 145–152, <https://doi.org/10.1093/oxfordjournals.rpd.a031703>

Radiation Medicine QA Solutions Edition Nov 2019 <https://www.ptwdosimetry.com/en/support/downloads/?type=3451&downloadfile=1816&cHash=fdce9ca50388aa66ba76e25663a75687> (дата обращения - 27.09.2022г)

UNIDOS weblinе High quality Reference Class Dosimeter for radiation therapy, diagnostic radiology and health physics <https://www.ptwdosimetry.com/en/support/downloads/?type=3451&downloadfile=1593&cHash=05709dfbe4293b4223df8dd3955a0b8> (дата обращения - 27.09.2022г)

<https://mcnpx.lanl.gov/>; .S. Hendricks, et al., "MCNPX 2.6.0 Extensions", LA-UR-08-2216 (2008). https://mcnpx.lanl.gov/reference_collection.html#mcnpx_refs

E Haettner Experimental Study in Carbon Ion in Water Using GSI Therapy Beams [master's thesis] https://www.kth.se/polopoly_fs/1.144271!/Menu/general/column-content/attachment/emmahaettner.pdf (дата обращения 18.02.2018г.).