ПРИБОРЫ И ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА, 2024, № 2

ТЕХНИКА ЯДЕРНОГО

ЭКСПЕРИМЕНТА

УДК 621.382.8, 615.849.12

ФОРМИРОВАНИЕ ИСТОЧНИКА ЭПИТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНОВ НА УСКОРИТЕЛЕ “ПРОМЕТЕУС” ДЛЯ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИХ РАБОТ ПО СОЗДАНИЮ НОВЫХ РАДИОФАРМПРЕПАРАТОВ

©2024 г. В. В. Сиксин[a,*], И. Ю. Щеголев[b]

[a]*Физический институт им. П.Н. Лебедева Российской академии наук*

Россия, 119991, Москва, Ленинский проспект, 53

[b]*АО “Авангард”*

Россия, 215500, г. Сафоново, Смоленская обл., ул. Октябрьская, 78

**e-mail: antktech@inbox.ru*

Поступила в редакцию 28.06. 2023 г.

После доработки 21.01. 2024 г.

Принята к публикации 29.01. 2024 г.

На медицинском ускорителе “Прометеус“ при энергии 200 МэВ был сконструирован источник быстрых и эпитепловых нейтронов и проведены измерения выхода быстрых и эпитепловых нейтронов детектором БДМН-100. Применялась тяжелая мишень NaI для получения быстрых нейтронов. На основе разработанных пяти различных защитных материалов от нейтронов был сформирован канал быстрых и эпитепловых нейтронов. С помощью нейтронного детектора БДМН-100 были измерены угловые зависимости мощности эквивалентной дозы на выходе нейтронного канала. Нейтронный источник имеет возможное применение для проведения исследовательских работ по созданию новых радиофармпрепаратов. Быстрые нейтроны можно применять для дистанционной терапии и контроля надежности электронных плат и микросхем. Также нейтронный пучок можно применять для исследования биологических объектов и клеток.

1. ВВЕДЕНИЕ

Конструирование канала было реализовано на основе патента на устройство [1]. В последние годы эпитепловые нейтроны, применяющиеся в борзахватной нейтронной терапии (БНЗТ) [2], привлекают большое внимание медицинских физиков, занимающихся лечением определенных видов опухолей. В данной работе БНЗТ с применением ядерной реакции ^{10}B (n, α)^{7}Li не рассматривалась. Предлагается применение созданной установки для исследования возможности применения радиосенсибилизаторов с высоким атомным номером, например, наночастиц золота [3–6]. Для создания нейтронного канал была проведена большая работа по разработке новых нейтроноостанавливающих материалов для создания нейтронных источников. Материал из композии полиэтилена и ферробора (ПОВ-40) был подвергнут испытаниям [7] и измерялся повторно в 2023 году. Сравнение проводится также с синтезированными керамическими материалами на основе карбида бора и борида вольфрама из работы [8]. Новый защитный материал от нейтронов на основе сферопластиков “wikineutron”, разработанный и испытанный на ускорителях “Прометеус” и “Пахра”, хорошо подходит для формирования нейтронного канала на протонных и фотонных ускорителях. На базе разработанных пяти вариантов композиционных защитных материалов от нейтронов была сконструирована многослойная теневая защита, формирующая нейтронный канал. Для разработки нейтронного канала была применена мишень из кристалла NaI, энергия падающего на нее пучка протонов на ускорителе “Прометеус” равнялась 200 МэВ. Ниже показаны возможные каналы реакции для ядер кристалла NaI:

$$^{23}Na + p \rightarrow 2n + ^{21}Na \rightarrow ^{21}Ne + \beta,$$

$$^{127}I + p \rightarrow 2n + ^{125}I \rightarrow ^{125}Te + \beta.$$

Блок детектирования нейтронов основан на регистрации вторичных частиц, образующихся в результате взаимодействия нейтронов с атомными ядрами [9]. Для регистрации медленных нейтронов используются реакции расщепления легких ядер под действием нейтронов с регистрацией α-частиц и протонов. Регистрация нейтронов в детекторе БДМН-100 осуществляется по реакции

$$n + ^{6}Li \rightarrow ^{3}H + \alpha + 4.78 \text{ МэВ}. \quad (1)$$

Для регистрации нейтронов применялся детектор БДМН-100, разработанный на НПП “Доза”. Для сохранения возможности сравнивать параметры новых материалов с испытаниями за 2019 год в статье приводятся результаты измерений коэффициента ослабления нейтронов $K_{осл}$ при энергии пучка протонов 100 МэВ. Целью работы было экспериментальное получение

характеристик ускорительного источника нейтронов в предлагаемом авторами варианте конструкции его канала для новых разработанных авторами защитных материалов в зависимости от нейтронного излучения. Также целью работы был контроль состава смешанного пучка на выходе из канала с помощью падовой камеры [1] для исследования возможности применения радиосенсибилизаторов с высоким атомным номером, например, наночастиц золота [3–6].

2. БОРСОДЕРЖАЩИЕ СФЕРОПЛАСТИКИ НА ОСНОВЕ ЭПОКСИУРЕТАНОВОГО СВЯЗУЮЩЕГО “WIKINEUTRON”

В исследовательской лаборатории ЦЗЛ АО “Авангард” были разработаны связующие на основе эпоксидных смол горячего отверждения с повышенными эксплуатационными характеристиками по термостойкости [10]. Были разработаны и запатентованы связующие [10], а на их основе совместно с ФИАН изготовлены композиционные сферопластики “wikineutron”. Наполненные сферопластики “wikineutron” были изготовлены на основе бромсодержащего эпоксиуретанового связующего № 32, ТУ 20.59-041-075211831; стеклянной микросферы МС-ВП-А 9 гр. 3, ТУ 6-48-91; карбида бора, ГОСТ 5744-85. Радиационная стойкость полимерных материалов также зависит от их химического строения. Большей стойкостью обладают полимеры с двойными связями и ароматическими циклами [11]. Изменяя соотношения бора и микросферы, удалось получить пресс-порошки с длительным сроком хранения при температуре +5°С, а на их основе методом горячего прессования при температуре плюс (170–180) °С получить пластины различной толщины и конфигурации. Полученные при испытании материалов результаты приведены в табл. 1.

Табл. 1

Согласно литературным данным [12] радиационную стойкость органических материалов принято определять величиной радиационно-химического выхода продуктов радиолиза, образующихся при поглощении ионизирующего излучения с энергией 100 эВ. Взаимодействие ионизирующего излучения с органическими соединениями сопровождается образованием активных частиц, а также деструкцией, окислением, сшиванием, газообразованием, деполимеризацией и т. д. Наличие в молекуле двойных и сопряженных связей, ароматических колец и гетероциклов увеличивает радиационную стойкость.

Выбор в качестве основы бромсодержащего эпоксиуретанового связующего № 32, кроме высокой тепло-, термостойкости и огнестойкости, обусловлен наличием в нем после

отверждения высокого содержания ароматических колец и гетероциклов, что увеличивает его радиационную стойкость. Наличие в полимере стеклянного наполнителя также приводит к увеличению его стойкости к ионизирующему излучению. Поэтому в качестве наполнителя применилась стеклянная микросфера марки МС-ВЛ-А 9 гр. 3, что позволило получить материалы с низкой плотностью и теплопроводностью. Для испытаний на ускорителе были изготовлены пластины размеров 250×250×40 мм^3 двух видов wiki-1 (содержащий 10% бора) и wiki-2 (содержащий 20% бора). Применяемый у нас для создания канала (обечайка) материал ПОВ-40 состоит из полиэтилена (20 объемных %), изобутилена (80 объемных %) и добавок ферробора [7].

3. ОПИСАНИЕ ДЕТЕКТОРА ЦДПИ, КОТОРЫЙ ПРИМЕНЯЛСЯ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЙ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОСЛАБЛЕНИЯ РАЗРАБОТАННЫХ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Цифровой детектор получения изображений (ЦДПИ) [13,14] применялся для измерения коэффициентов ослабления разработанных защитных материалов. Детектор ЦДПИ использовался для правильного наведения пучка протонов на водный фантом. Для сохранения совместимости с предыдущими измерениями [7], начиная с 2019 года все измерения коэффициентов ослабления проводились с применением детектора ЦДПИ и его водного фантома длиной 300 мм. В сеансах 2023 года применялась энергия протонов 100 МэВ для сравнения с результатами [7]. Пример точного наведения пучка протонов на центральную ось детектора ЦДПИ приведен на рис.1. Измерения геометрических размеров пика Брэгга (область энерговыделения) проводилось с помощью программы OSC-16 [13, 14] при энергии Рис. 1, 2 пучка 100 МэВ.

В эксперименте по измерению $K_{осл}$ ЦДПИ [13, 14] и детектор БДМН-100 работали совместно. Схема эксперимента приведена на рис. 2. Цифровой детектор ЦДПИ размещен внутри светозащитного кожуха *9* и содержит цифровую телевизионную камеру *11* на ПЗС-матрице. Объектив оптической системы *10* обращен на водный фантом *3* перпендикулярно его продольной оси. В качестве вычислителя *14* использовался персональный компьютер. Вычислительное средство *14* осуществляет вычисление геометрических размеров светящейся области *7*, регистрируемой телевизионной камерой *11* и появляющейся в фантоме *3* при его облучении пучком *2* протонов. Интенсивность пучка протонов составляла 10^9 протонов за импульс и длительность импульса составляла 300 мс при энергии 100 МэВ.

При прохождении пучка протонов через водный фантом возможно возникновение фотонов света в видимой и ультрафиолетовой областях спектра в результате двух основных

явлений: свечения Вавилова–Черенкова и радиолюминесценции [15] вследствие образования электронно-возбужденных частиц. ЦДПИ, описанный в статьях [13, 14], позволяет попиксельно измерять область энерговыделения при прохождении протонного пучка через водный фантом. Разработанный детектор ЦДПИ [13, 14] имел чувствительность канала детектора телевизионного типа на уровне порядка (1–3) $\cdot 10^{-5}$ лк.

4. РЕЗУЛЬТАТЫ ПО ИЗМЕРЕНИЮ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОСЛАБЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ T+, T, WIKI-1, WIKI-2 И ПОВ НА УСКОРИТЕЛЯХ “ПРОМЕТЕУС” И “ПАХРА”

Коэффициент ослабления $K_{осл}$ равен отношению измеренной мощности эквивалентной дозы (МЭД) детекторным блоком БДМН-100 без установки защитного экрана к МЭД с защитным экраном. Схема установки, на которой проводились измерения коэффициентов ослабления нейтронного излучения на ускорителе “Прометеус” в сеансе в 2023 году, приведена на рис. 2. Новые защитные материалы условно обозначались, как T+, T, wiki-2, wiki-1 и ПОВ. Ортогонально пучку протонов из водного фантома вылетали “мгновенные” нейтроны, которые регистрировались устанавленным вплотную (через защитный материал), нейтронным детектор БДМН-100 (рис. 2). На ускорителе “Пахра” (см. рис. 2) водный фантом ЦДПИ облучался фотонным пучком, и из водного фантома вылетали ортоганальные фотонейтроны, которые регистрировались БДМН-100. Пучок γ-квантов тормозного излучения на электронном синхротроне “Пахра” был получен при взаимодействии ускоренного пучка электронов с внутренней вольфрамовой мишенью толщиной $0.22X_0$ (X_0 – радиационная длина), помещенной внутрь вакуумной камеры ускорителя [16].

5. СРАВНЕНИЕ ИЗМЕРЕННЫХ КОЭФФИЦИЕНТОВ ОСЛАБЛЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ T+, T, WIKI-1, WIKI-2 И ПОВ-40 НА УСКОРИТЕЛЯХ “ПРОМЕТЕУС” И “ПАХРА” С ДРУГИМИ ИЗВЕСТНЫМИ МАТЕРИАЛАМИ

Табл. 2

В табл. 2 кроме новых материалов, представленных в этой статье, приводятся известные результаты из работ [7, 8]. В работе [7] приводятся наши предыдущие измерения для известного материала ПОВ-40. В работе [8] авторы методом синтеза изготовили новые керамические материалы на основе борида вольфрама (WB) и карбида бора (B_4C). В работе [8] определялась зависимость коэффициента ослабления потоков быстрых нейтронов от геометрической и массовой толщины исследуемых борсодержащих материалов на основе B_4C, WB и графита.

На рис. 3 экспериментальные точки на зависимостях *1, 2* и *3* взяты из работы [8], и на этот рисунок нанесены наши экспериментальные результаты из табл. 2. На рис. 3 приведен коэффициент ослабления нейтронного пучка в зависимости от массовой толщины исследуемых материалов. В работе [8] были введены обозначения: N_0 – поток нейтронов измеренный без защитного материала и N – поток нейтронов за защитным материалом после его введения.

Рис. 3

Эксперименты показали, что использование борсодержащих сферопластиков “wikineutron” при защите от потоков быстрых нейтронов дает выигрыш по массогабаритным показателям. Это иллюстрируется зависимостями, приведенными на рис. 3.

Кривые *4–8* на рис. 3, построенные через экспериментальные точки, это теретические оценочные кривые зависимости $K_{осл}$ от массовой толщины исследуемых материалов. Так, например, на рис. 3 видно, что в диапазоне массовой толщины от 2 до 6 г/см, все новые защитные материала разработанные в этой статье, превосходят по коэффициенту ослабления все известные материалы из работ [7, 8]. Кроме этого, ввиду малого веса борсодержащих сферопластиков “wikineutron” его можно применять на терапевтических установках и это существенно повысит безопасность проведения сеансов протонной и БНЗТ-терапии. Также “wikineutron” безопасен для персонала, обслуживающего канал в момент проведения сеансов нейтронной терапии, и позволяет проводить конформное лечение пациентов. По результатам работы видно, что оптимальным по массогабаритным показателям материалом при защите от быстрых нейтронов является материал wiki-2: это сферопластик, содержащий 20 об.% бора, на основе связующего №32 [10]. Материал wiki-2 будет применяться для защиты детектора ЦДПИ [13, 14].

6. КОНСТРУИРОВАНИЕ НЕЙТРОННОГО КАНАЛА И СХЕМА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА НА УСКОРИТЕЛЕ “ПРОМЕТЕУС”

Канал конструировался (на основе патента [1], опубликованного в 2023 году) как ускорительное устройство для получения нейтронного источника эпитепловых нейтронов, в частности из материалов, описанных в предыдущих разделах. Он состоит из 4 усеченных, вложенных друг в друга конусов, сформированных из 4 различных защитных материалов и обечайки с выходным отверстием. Для формирования нейтронного канала были применены защитные материалы:

А – СВМПЭ содержащий карбид бора и компоненты W;

B – СВМПЭ с добавлением карбида бора;

C – Материал wiki-2 (“wikineutron” с добавлением компонентов ^{10}B 20%);

D – Материал wiki-1 (“wikineutron” с добавлением компонентов ^{10}B 10%);

E – ПОВ-40, исследованный нами в предыдущих работах (обечайка) [7].

Рис. 4

На рис. 4 приведена установка по формированию нейтронного канала, состоящая из 5 защитных материалов, условно обозначенных как A, B, C, D, E, а также схема проведения эксперимента, где были измерены мощности эквивалентной дозы нейтронного излучения на выходе из канала. Измерения были проведены на ускорителе “Прометеус” на протонном пучке с энергией 200 МэВ, который взаимодействовал с мишенью NaI. В направлении “вперед” вылетали “мгновенные” нейтроны, которые регистрировались установленным на выходе из канала нейтронным детектор БДМН-100. Оператор задавал экспозицию набора дозы за 180 с (3 мин), после чего значение дозы от детектора выводилось на компьютер в пультовую комнату. Интенсивность пучка протонов за импульс ускорителя составляла $8.5 \cdot 10^8$ протонов за импульс. Время между импульсами составляло 2 с. Импульс ускорителя равен 150 мс.

Согласно варианту применения канала на КПТ “Прометеус”, после канала изображенного на

Рис. 5

рис. 4, устанавливается [1] падовая камера *5* на “теплой жидкости” (см. рис. 5) и система для измерения профиля дозы, включающая в себя блок выработки номера сработавшего спота *6*, аналоговый мультиплексор *7*, триггер *8*, обеспечивающий запуск считывания профиля дозы, блок считывающей электроники *9*, блок контроля и обнаружения отклонений *10*, программируемую матрицу *11*, персональный компьютер *12*, размещенный, например, в комнате оператора.

Блок контроля и обнаружения отклонений *10* в случае превышения дозы в месте изучаемого объекта отключает ускоритель. За один выпуск протонного ускорителя считывается информация со всех падов *15* активной поверхности *14* падовой камеры *5*, которые облучаются нейтронным пучком, прошедшим через диафрагму F (например, от позиции “-1” до позиции “+1” на оси *x*, как показано на рис. 4), которая передается с помощью токовых выводов *16* на аналоговый мультиплексор *7*.

На ускорителе “Прометеус” при энергии 200 МэВ были измерены профили МЭД нейтронов, вылетающих из “левой” части установки (рис. 5), см. рис. 6, 7. Нейтронный

Рис. 6, 7

детектор передвигался по оси *x* и устанавливался в определенное положение (“позицию”). Для каждой позиции набиралась статистика за 180 с, для определения мощности

эквивалентной дозы в данной точке измерений. Для каждой позиции набиралась статистика, достаточная для измерения МЭД с точностью 10%. В сеансе, проведенном на ускорителе “Прометеус” в 2023, были измерены угловые зависимости МЭД эпитепловых нейтронов при перемещении детектора вдоль оси *x* в позициях от “-7” до +7” (см. рис. 7). Затем водный фантом *9*, который присутствовал на схеме рис. 4, удалялся, и измерялся профиль быстрых нейтронов (см. рис. 6). Позиция детектора “0” на оси *x* совпадает с осью *z* и направлением пучка протонов на мишень NaI, каждая точка на рисунке соответствует определенной позиции центра нейтронного детектора на оси *x*, для которой проводились измерения. Расстояние между позициями детектора при измерениях на “левой” части установки (рис. 4), составляло 40 мм. Из измерений на рис. 6 следует, что ширина пучка быстрых нейтронов составляет около 20 см. На рис. 6 и 7 видно, что данные защитные материалы разного состава – A, B, C, D, E – довольно хорошо формируют пучок быстрых и эпитепловых нейтронов на выходе из канала. По нашей оценке, вклад фотонов в измеряемую детектором МЭД от нейтронов не превышает 10%. Замедленные нейтроны по энергетическому спектру соответствуют эпитепловым нейтронам [17]: точки на рис.7. Точки на рис. 6 представляют результат, когда, согласно схеме на рис. 5, замедлитель *9* был выдвинут из пучка и детектор регистрировал только быстрые нейтроны.

7. ВЫВОДЫ

В работе экспериментально исследованы возможности получения пучка быстрых нейтронов на канале протонов ускорителя “Прометеус” и измерены мощности дозы быстрого нейтронного излучения в месте возможного размещения изучаемого биологического объекта. Измерено угловое распределение мощности эквивалентной дозы быстрых и эпитепловых нейтронов на выходе из канала, сформированного на основе вложенных друг в друга четырех усеченных конусов из защитных материалов A, B, C, D и обечайки E (рис. 4, 5). Результаты работы показывают, что канал обладает биологической эффективностью и безопасен для работы персонала. Также показана возможность применения новых защитных материалов, в том числе и “wikineutron”, для создания канала на ускорителе “Прометеус” для терапии быстрыми и надэпитепловыми нейтронами и возможному проведению исследовательских работ по созданию новых радиофармпрепаратов [3-6] с помощью смешанного пучка на выходе из канала.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарности: В.А. Рябову и И.Н. Завестовской за обсуждение аспектов технического решения по проектированию исследовательского канала на нейтронах для возможностей применения на КПП “Прометеус”; В.Е. Балакину за обсуждение аспектов проектирования исследовательского канала на нейтронах для биологических экспериментов на ускорителе “Прометеус”; А.И. Львову за обсуждение испытания детектора нейтронов камеры МИК на ускорителе “Пахра” в 2023 г.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках Соглашения № 075-15-202.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Сиксин В.В., Рябов В.А., Завестовская И.Н.* Патент на изобретение №2808930 Устройство для формирования пучка нейтронов на протонном ускорителе комплекса "Прометеус". Опубликовано 05.12.2023 Бюл.34.

2. *Заиди Л., Кашаева Е.А., Лежнин С.И. и др.* // Ядерная физика. 2017. Т. 80(1). С. 63. DOI: 10.7868/S0044002717010160

3. *Butterworth K.T, McMahon S.J, Currell F.J, Prise K.M.* // Nanoscale. 2012. V. 4. P. 4830.

4. *Hubbell J.H., Seltzer S.M.* Tables of X-ray mass attenuation coefficients and mass energy-absorption coefficients. 1996. http:// www.nist.gov/pml/data/xraycoef/.

5. *Cui L., Her S., Borst G.R. et al.* // Radiother Oncol. 2017. V.124. P. 344.

6. *Gerosa C. Crisponi G, Nurchi V.M. et al.* // Pharmaceuticals. 2020. V.13. P. 192.

7. *Малютин Е.В., Сиксин В.В., Шемяков А.Е., Щеголев И.Ю.* // Медицинская физика. 2019. №4. С. 75.

8. *Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю.,* и др. // Известия Томского политехнического университета. 2005. Т. 308. № 5. С. 77.

9. *Широков М., Юдин Н.П.,* Ядерная физика. Москва: Наука. 1980.

10. *Щеголев И.Ю., Емельянов В.М.,* Эпоксиуретановое связующее с увеличенной огнестойкостью, тепло- и термостойкостью. Патент № 2712044, АО Авангард, Российская Федерация. 2020. Бюл. № 3.
11. *Бормотов А.Н., Прошин А.П., Баженов Ю.М., Данилов А.М., Соколова Ю.А.,* Полимерные композиционные материалы для защиты от радиации. Москва: Палеотип, 2006. С. 26.
12. *Милинчук В.К.* Радиационная химия // Соросовский Образовательный Журнал. 2000. №4. С.26.
13. *Siksin V.V.* // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2019. V. 46. P. 19. https://doi.org/10.3103/S1068335619010068
14. *Siksin V.V.* // Bull. Lebedev Phys. Inst. 2019. V. 46. P. 70. https://doi.org/10.3103/S1068335619020076
15. *Казаков В.П., Шарипов Г.Л.* Радиолюминесценцияводных растворов. Москва: Наука, 1986. https://search.rsl.ru/ru/record/01001295055
16. *Алексеев В.И., Басков В.А., Дронов В.А., Львов А.И. и др.* // Приборы и техника эксперимента. 2019. Т.2. С. 5. DOI: 10.1134/S0032816219020162
17. *Bayanov B.F., Bokhovko M.V., Kononov V.N., Kononov O.E. et al.* // Nucl. Instr.& Meth. 1998. V. A413. P. 397.

СПИСОК РИСУНКОВ

Рис. 1. Рабочий кадр процесса точного наведения траектории пучка протонов с энергией 100 МэВ в водном фантоме детектора ЦДПИ, во время сеанса в 2023 году, при котором проходили измерения $K_{осл}$. Окно программы OSC-16 с энергией пучка 100 МэВ.

Рис. 2. Схема эксперимента по измерению коэффициентов ослабления защитных материалов от нейтронного излучения в сеансах 2023 года: *1* – ускоритель протонов, *2* – пучок протонов, *3* – водный фантом детектора ЦДПИ, *4* – исследуемый образец защитного материала(защитный экран), *5* – шар замедлитель нейтронов детектора БДМН-100 , *6* – детекторный блок БДМН-100, *7* – пик Брэгга регистрируемый детектором ЦДПИ, *8* – ортогональные “мгновенные” нейтроны, *9* – светозащитный кожух детектора ЦДПИ, *10* – объектив ЦДПИ, *11* – телевизионная камера ЦДПИ, *12* - интерфейс видеоввода между ЦДПИ и вычислителем, *13* – соединительные кабели, *14* – вычислитель.

Рис. 3. Коэффициент ослабления нейтронного пучка в зависимости от массовой толщины исследуемых материалов: N_0 – скорость счета в отсутствие защитного экрана; N – за защитным экраном; *1* – графит [8]; *2* – карбид бора [8]; *3* – борид вольфрама [8]; *4* – результаты нашего эксперимента для ПОВ; *5,6,7,8* – результаты настоящего эксперимента, для новых разработанных материалов: *5* – Т=СВМПЭ с добавлением 5% аморфного бора; *6* – Т+ (это Т с добавление W); *7* – сферопластик wiki-1; *8* – сферопластик wiki-2.

Рис. 4. Схема проведения эксперимента на “левой” части установки: *1* – ускоритель “Прометеус”; *2* – пучок протонов, выведенный из ускорителя; *3* – расстояние между источником и пациентом (РИП); *4* – система координат для привязки пучка к оси *x*, вдоль которой происходят измерение дозы детектором нейтронов; *5* – мишень из кристалла NaI для образования потока быстрых нейтронов; *6* – направление вылета нейтронов из мишени NaI под разными углами к направлению пучка протонов; *7* – рама экспериментальной установки, на которой устанавливалась мишень *5* и детектор нейтронов *8*; *9* – позиции детектора по отношению к направлению пучка протонов, которые были определены разметкой, нанесенной на раму; A, B, C, D, E – защитные материалы различного состава, создающие теневую защиту и формирующие нейтронный пучок в канале; *10* – точки остановки быстрых нейтронов в водном фантоме-замедлителе и далее их замедление до эпитепловых; *11* – водный фантом для замедления быстрых нейтронов до эпитепловых нейтронов.

Рис. 5. Схема проведенияия эксперимента [1] на “правой” части установки: F – регулируемая диафрагма из материала ПОВ-40, которая “вырезает” нужную часть пучка нейтронов.

Рис. 6. МЭД быстрых нейтронов вдоль оси *x*, когда водный фантом *9* отсутствует.

Рис. 7. МЭД эпитепловых нейтронов вдоль оси *x*, когда внутри канала находился водный фантом *9*.

Таблица 1. Результаты испытания материалов

Наименование показателя	Сферопластик на основе связующего № 32			
	без бора	с 10% бора	с 15% бора	с 20% бора
Плотность, г/см^3, ГОСТ 409 (не более)	0.45	0.5	0.55	0.60
Содержание бора в 100 см^3 сферопластика, г (не менее)	0	6.3	10.3	14.8
Разрушающее напряжение при сжатии, МПа, ГОСТ 92-1460 (не менее)	15	16	26	24
Теплопроводность λ, Вт/м·К ГОСТ 7076	0.10	0.12	0.14	0.15
Тепловое сопротивление *R*, м^{2}К°/Вт ГОСТ 7076	0.14	0.11	0.10	0.08
Энергия активации, кДж/моль ГОСТ Р 56722	215	224	228	242
Температура стеклования, °С (метод ДМА), определенная по ASTM E 1640, ГОСТ Р 56753	294 309	294 306	294 306	293 305
Средний коэффициент линейного теплового расширения до и после перехода области стеклования, 1/К ГОСТ 32618.2		$27.46 \cdot 10^{-6}$ $2.16 \cdot 10^{-6}$	$27.70 \cdot 10^{-6}$ $10.08 \cdot 10^{-6}$	$27.5 \cdot 10^{-6}$ $12.0 \cdot 10^{-6}$
Категория стойкости к горению ГОСТ 28157-89	ПВ-0	ПВ-0	ПВ-0	ПВ-0

Таблица 2. Коэффициенты ослабления нейтронного излучения для пяти защитных материалов при измерениях на ускорителях “Прометеус” и “Пахра”, проведенных в 2023 году, и результаты других авторов [8]

Название Материала	Дата Эксперимента	$K_{осл}$ “Прометеус	$K_{осл}$ “Пахра”	$K_{осл}$ среднее	Размеры образца, мм^3	Плотность, г/см^3 ГОСТ 409 (не более)	Массовая толщина образца, г/см^2	Геометрическая толщина образца, см
A=T+	17.03.2023, 28.02.2023	1.55	1.67	1.61	340×340×30 a=30	2.018	6.054	3
B=T	17.03.2023, 28.02.2023	1.4	1.44	1.42 1.42	340×340×30 a=30	0.98	2.94	3
C= wiki-2	17.03.2023, 5.02.2023	1.76	1.54	1.65 1.65	250×250×40 a=40	0.6	2.4	4
D= wiki-1	17.03.2023, 15.02.23	1.5	1.36	1.43	250×250×40 a=40	0.5	2.0	4
E= ПОВ-40	17.03 2023.15.02.23	1.26	1.3	1.28	250×250×40	1.0	4.0	4
ПОВ-40 B_4C WB C	[7] [8] [8] [8]			1.26 1.35 1.1 1.15	250×250×40 30×30×40 30×30×40 30×30× 40	1.0 1.32 5.2 2.23	4.0 5.28 20.8 8.92	4 4 4 4

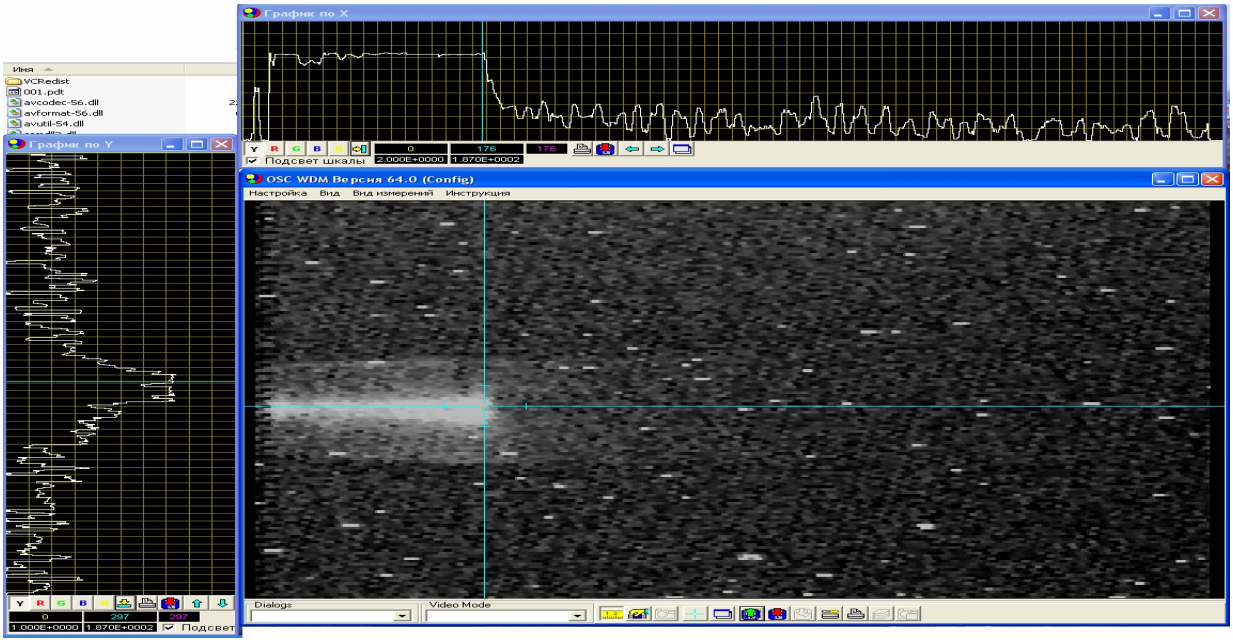
Имя
VCRedist
001.pdt
avcodec-56.dll
avformat-56.dll
avutil-54.dll
График по X
Подсвет шкалы
OSC WDM Версия 64.0 (Config)
Настройка
Вид
Вид измерений
Инструкция
Dialogs
Video Mode
График по Y

Рис.1

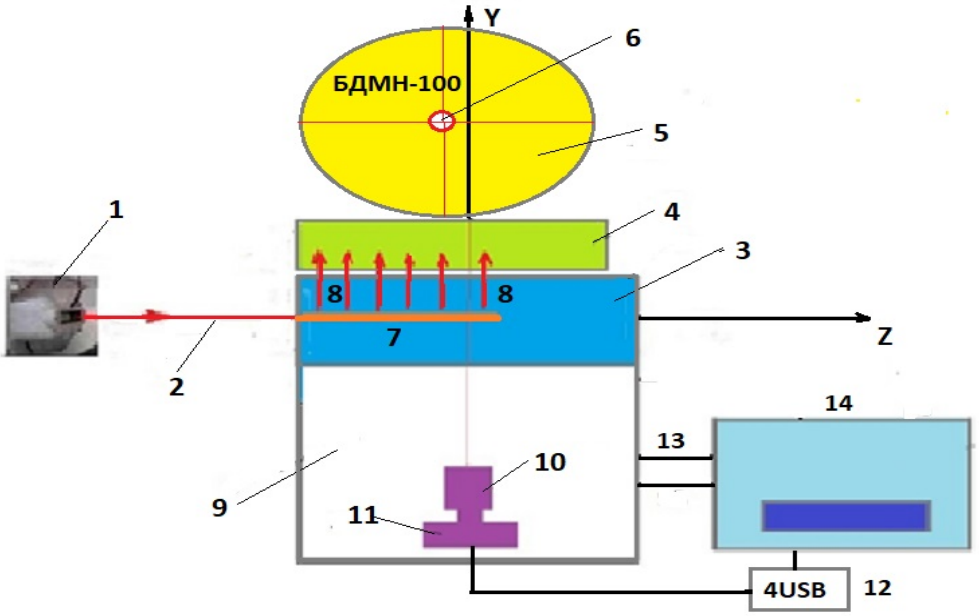

Рис. 2.

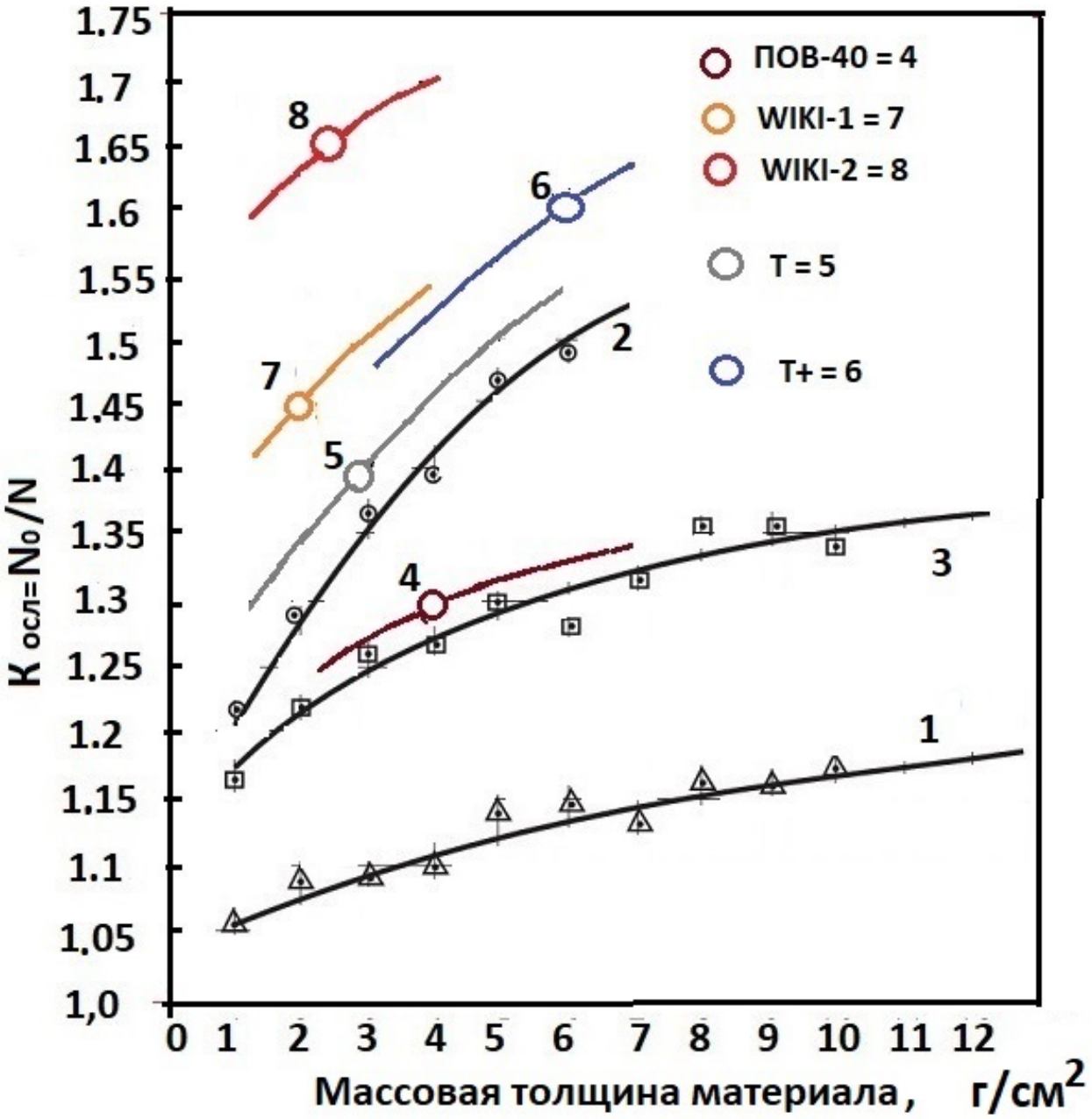
ПОВ-40 = 4
WIKI-1 = 7
WIKI-2 = 8
T = 5
T+ = 6
K осл= N0 /N
Массовая толщина материала, г/см2
1,0
1,05
1.1
1,15
1.2
1.25
1.3
1.35
1.4
1.45
1.5
1.55
1.6
1.65
1.7
1.75
0 1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12
1
2
3
4
5
6
7
8

Рис. 3.

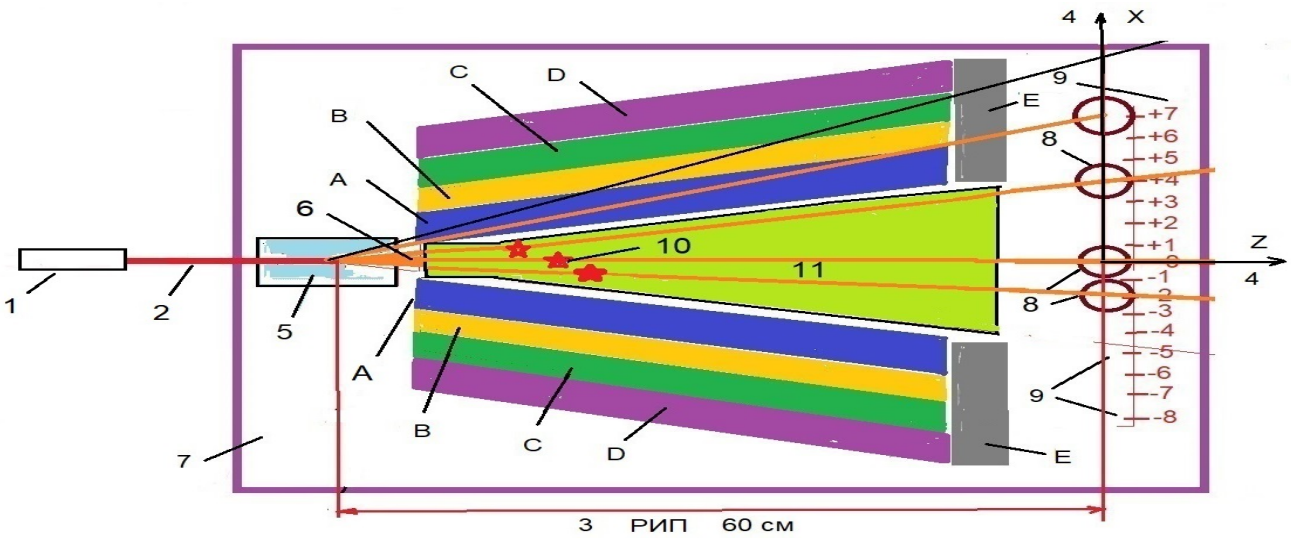
4
X
C
D
B
A
6
E
9
8
+7
+6
+5
+4
+3
+2
+1
0
-1
-2
-3
-4
-5
-6
-7
-8
Z
4
10
11
1
2
5
A
B
C
D
E
7
9
8
3 РИП 60 см

Рис. 4

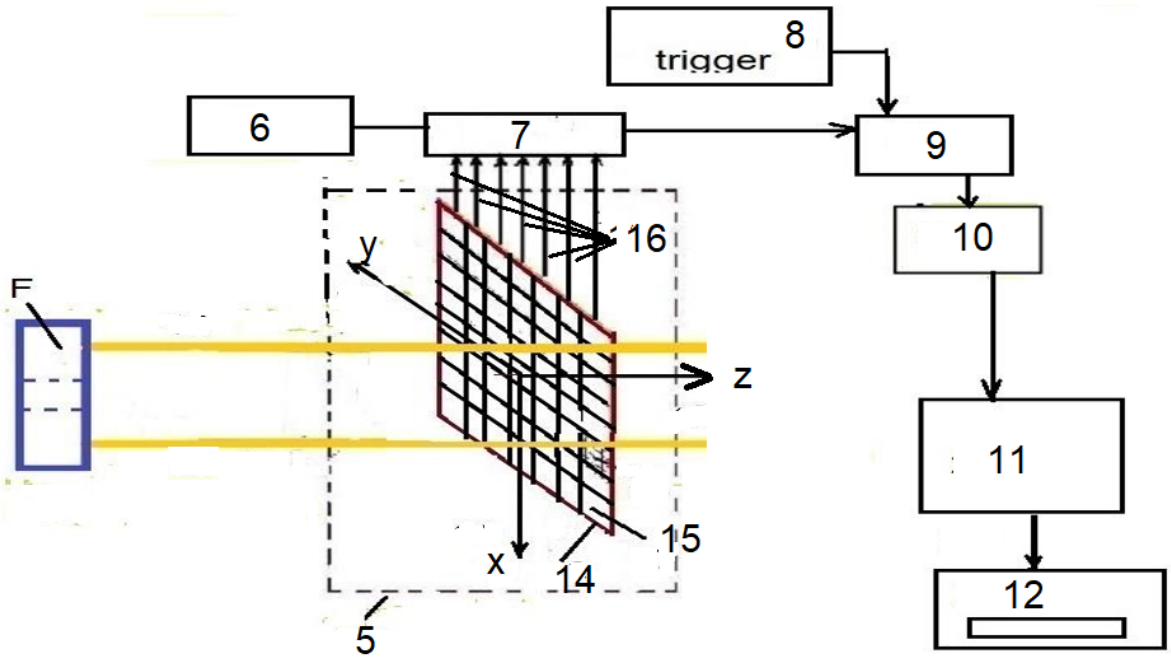

Рис. 5.

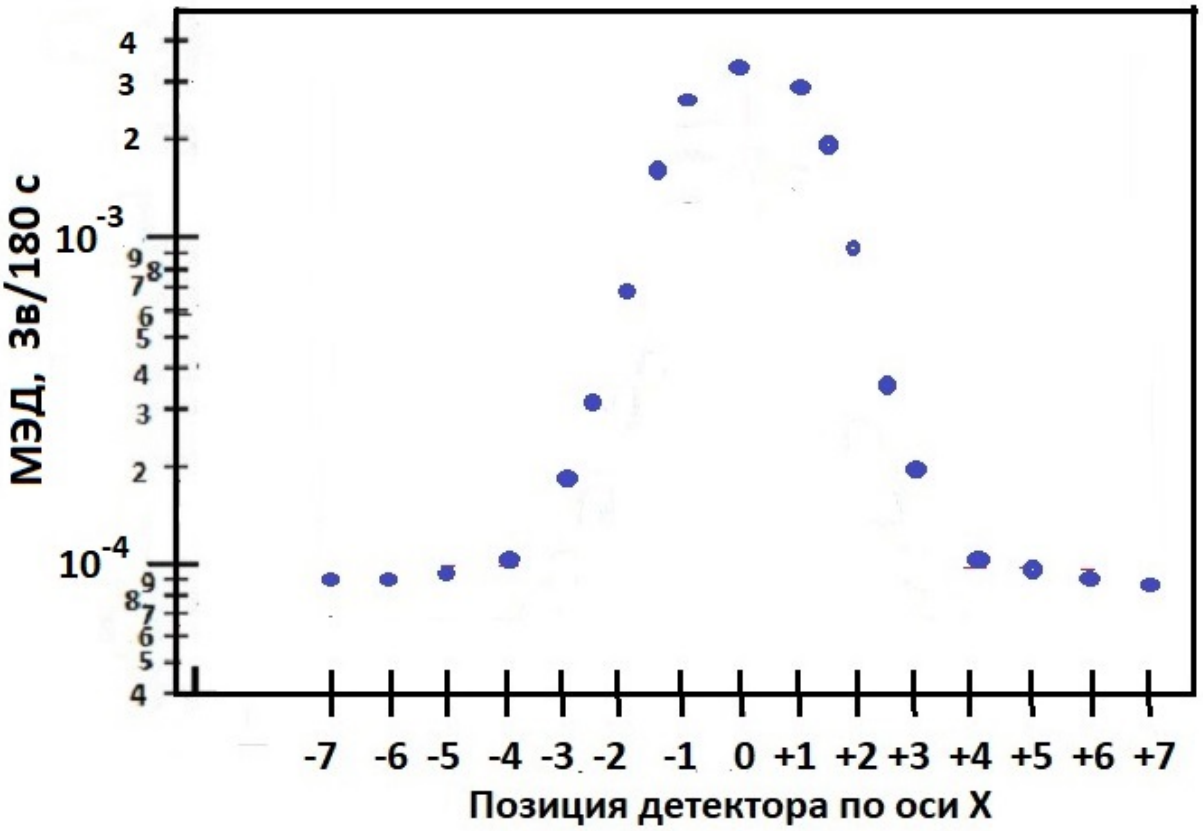
МЭД, Зв/180 с
4
3
2
10-3
9
8
7
6
5
4
3
2
10-4
9
8
7
6
5
4
-7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2 +3 +4 +5 +6 +7
Позиция детектора по оси X

Рис. 6.

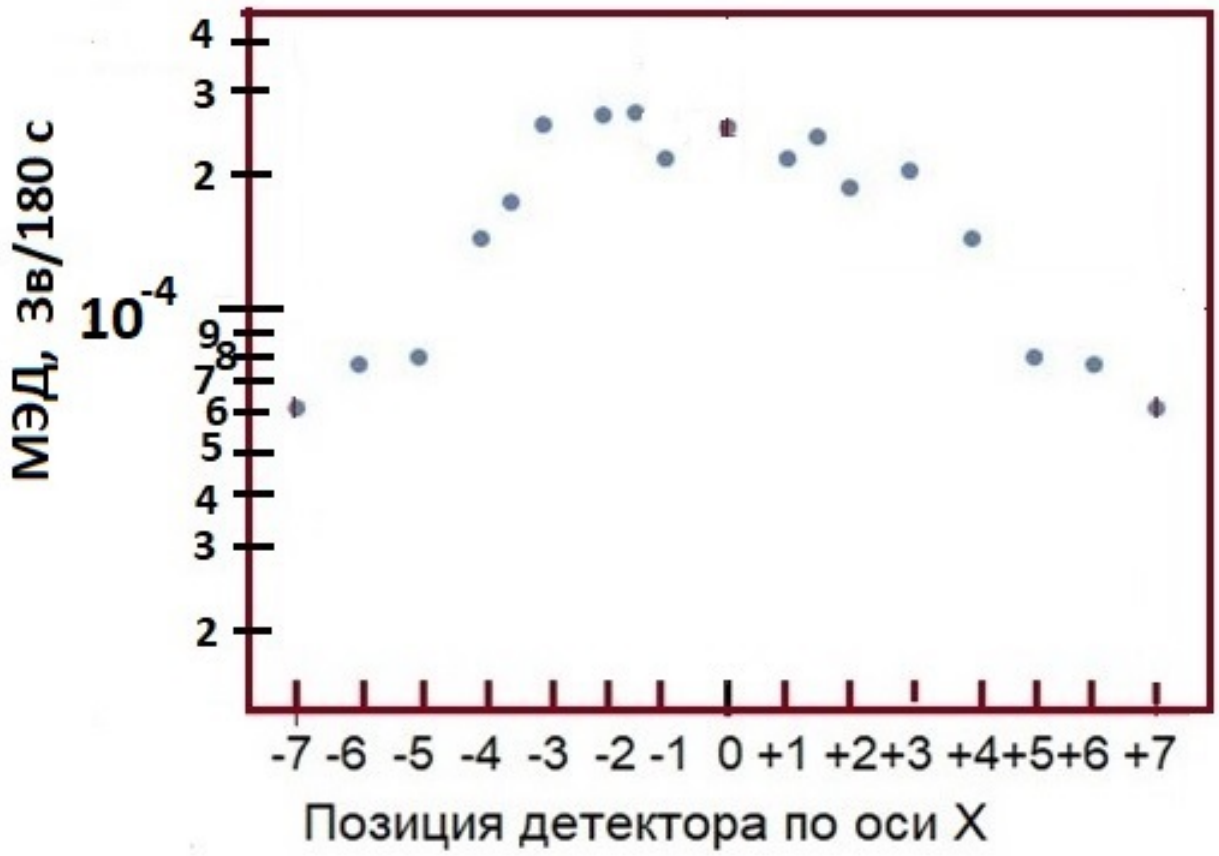
МЭД, Зв/180 с
4
3
2
10-4
9
8
7
6
5
4
3
2
-7 -6 -5 -4 -3 -2 -1 0 +1 +2+3 +4+5+6 +7
Позиция детектора по оси X

Рис. 7.

Для связи с автором:

Сиксин Виктор Валентинович

Телефон: 8-915-330-03-16 (моб.)

E-mail: antktech@inbox.ru

Для переводчика:

Formation of a source of epithermal neutrons at the Prometeus accelerator for research work on the creation of new radiopharmaceuticals

Аннотация:

On the medical accelerator "Prometheus". at an energy of 200 MeV, a source of fast and epithermal neutrons was constructed and measurements of the yield of fast and epithermal neutrons were made using the BDMN-100 detector. A heavy NaI target was used to obtain fast neutrons. Based on the developed 5 different protective materials from neutrons, a channel of fast and epithermal neutrons was formed. Using the BDMN-100 neutron detector, the dose profiles at the exit of the neutron channel were measured. The neutron source has a possible application for research work on the creation of new radiopharmaceuticals. Fast neutrons can be used for remote therapy and reliability control of electronic boards and microcircuits. The neutron beam can also be used to study biological objects and cells.