А.Г. Цовьянов¹, А.Ю. Комаров¹, П.П. Ганцовский¹, А.Г. Алексеев², М.Р. Попченко¹, В.Е. Журавлева¹, Н.А. Богданенко¹

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ДОЗИМЕТРИИ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО НЕЙТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА ПРОТОННЫХ УСКОРИТЕЛЯХ

¹Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна ФМБА России, Москва. ² Институт физики высоких энергий РАН, Московская обл. Протвино

Контактное лицо: Артём Юрьевич Комаров: komarov artiom@mail.ru

СОДЕРЖАНИЕ

Основные средства и методы дозиметрии нейтронного излучения.

Рассмотрение различных средств и методов регистрации высокоэнергетического нейтронного излучения:

- Активационный
- Трековый
- Пузырьковые детекторы

• Тканеэквивалентная пропорциональная камера

• Замедлитель+конвертор

Сравнение приведенных методов и средств измерений доз высокоэнергетического нейтронного излучения.

Ключевые слова: дозиметрия вторичные нейроны, протонные ускорители, радиационная безопасность

Для цитирования: Цовьянов А.Г., Комаров А.Ю., Ганцовский П.П., Алексеев А.Г., Попченко М.Р., Журавлева В.Е., Богданенко Н.А. Средства и методы дозиметрии высокоэнергетического нейтронного излучения на протонных ускорителях // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2021. Т. 66. № 4. С.77–85.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-77-85

Введение

Источниками ионизирующего излучения высоких энергий (ИИВЭ) являются ускорители, основанные на различных физических принципах разгона первичных излучаемых частиц. Различные ускорители характеризуются типом ускоряемых частиц, физическими параметрами пучка (энергией, интенсивностью и др.), а также конструкцией.

Развитие ускорительной физики и техники является важнейшим условием развития ядерной физики и физики элементарных частиц [1]. Исследовательские протонные ускорители продолжают расти по энергии и интенсивности, являясь базой для огромного класса экспериментов, в том числе и со встречными пучками. Энергии первичных пучков ускоряемых протонов варьируют в широких пределах, позволяя решать широкий круг задач. Из табл. 1 видно, что на современных протонных ускорителях достигаются огромные энергии. Проведение различных экспериментов с перестройкой или разрушением внутренней структуры ядра требует большой энергии ускоряемого пучка — сотни ГэВ и даже единицы ТэВ.

В медицине используются коллимированные протонные пучки с более низкой энергией, позволяющие подавлять жизнедеятельность злокачественных клеток при минимальном повреждении здоровых тканей. Из табл. 2 видно, что энергии первичного протонного пучка в таких ускорителях обычно варьируются в пределах от нескольких МэВ до 1 ГэВ. Протонная лучевая терапия во всем мире признана одним из самых перспективных

Таблица 1

Сравнительные характеристики некоторых известных протонных ускорителей Comparative characteristics of some known proton accelerators

Ускоритель	Энергия пучка, ГэВ
KEK, Tokyo	12
SLAC, Stanford	25
ИФВЭ, Серпухов, Россия	76
SPS, CERN	
LHC (Large Hadron Collider),	450
CERN	
Tevatron, Fermilab	1000

направлений лучевого лечения онкологических заболеваний. Благодаря свойству протонов создавать в конце своего пробега в веществе максимальное выделение энергии становится возможным прецизионно формировать выделение дозы излучения в глубоко расположенной опухоли при минимальном облучении здоровых тканей, окружающих опухоль. [http://sites.lebedev.ru/ru/PhTC/]. В физико-техническом Центре ФИАН создан дешевый, малогабаритный, с низким электропотреблением комплекс протонный терапии «ПРОМЕТЕУС», не требующий больших эксплуатационных расходов, позволяющий решить проблему массовости лечения онкологических больных (рис. 1). Комплекс выполнен на основе самых современных научно-технических достижений. Протонная лучевая терапия продолжает развиваться в ИТЭФ (Москва), ОИЯИ (Дубна), ПИЯФ (Гатчина), МИБС (Санкт-Петербург), в протонном центре в Дмитровграде.

При поглощении первичного пучка ускоренных протонов в материалах мишени и защиты генерируется вторичное излучение. Сложность состава и спектра, а также импульсный характер излучения создают большие трудности при определении степени радиационной опасности *Таблица 2*

Энергии и область применения различных ускорителей				
в медицине [2]				
Energy and scope of various accelerators in medicine [2]				

Тип ускорителя	Частицы	Энергия, МэВ	Применения
Линейный	e, p	От 4 до 800	е-терапия π-терапия n-терапия X -терапия Диагностика
Циклотрон	p, d	От 10 до 600	Диагностика π-терапия p-терапия n-терапия
Синхротрон	р, ионы	От 70 до 670	р-терапия і-терапия



Рис. 1. Комплекс протонной терапии «ПРОМЕТЕУС» Fig. 1. Complex of proton therapy "PROMETEUS"

вторичного излучения [3]. В работах [4–6] показано, что на ускорителях протонов за биологической защитой преобладает нейтронное излучение с энергий более 20 МэВ – высокоэнергетическое нейтронное излучение, обладающее наибольшей проникающей способностью из образующихся вторичных излучений и, как следствие, представляющее наибольшую опасность для обслуживающего персонала за защитой при нормальной эксплуатации установок (рис. 2).

Целью данной работы является обзор и сравнение различных существующих методов дозиметрии высокоэнергетического нейтронного излучения, экспериментального и серийно выпускаемого оборудования, предназначенного для регистрации нейтронного излучения с энергией свыше 20 МэВ.

Основные средства и методы дозиметрии нейтронного излучения

При определении эквивалентных доз внешнего нейтронного облучения персонала проводятся:

- индивидуальный дозиметрический контроль (ИДК) внешнего облучения с применением индивидуальных дозиметров нейтронов;
- ИДК по результатам дозиметрического контроля рабочих мест (ДКРМ), включающим: измерение мощности дозы внешнего облучения или плотности потока нейтронов носимыми приборами, а также времени пребывания работника на рабочем месте [7].

При определении дозы аварийного нейтронного облучения сопоставляют результаты, полученные в результате проведения дозиметрического контроля с использованием индивидуальных дозиметров и контроля радиационной обстановки стационарными средствами измерения [8]. Стационарными средствами измерения являются радиационноые мониторы и автоматизированные системы непрерывного радиационного контроля (АСРК).

Так как нейтроны не обладают электрическим зарядом, то их детектирование возможно только посредством упругого и неупругого взаимодействия с ядрами. При упругом рассеянии нейтронов регистрируются ядра отдачи, а в случае детектирования посредством ядерных реакций регистрируются образующиеся вторичные частицы, ядерные фрагменты и гамма-кванты [9]. Рассмотрим приборы, внесенные в государственный реестр средств измерений (СИ), в том числе наиболее распространенные средства и методы детектирования нейтронного излучения.

Большое распространение при дозиметрии нейтронного излучения получили приборы, основанные на использовании детекторов тепловых нейтронов, помещенные в замедлители различной конфигурации и размеров. Такие



Рис. 2. Усредненный процентный вклад в суммарную дозу от каждой компоненты вторичного излучения в помещениях протонного ускорителя на 7 ГэВ, оцененный с помощью активационных детекторов [3] Fig. 2. Average percentage contribution to the total dose from each component of the secondary radiation in the premises of the 7 GeV proton accelerator, estimated using activation detectors [3]

приборы могут использоваться при ДКРМ, а также входить в состав стационарных средств измерений. В целях дозиметрического контроля на ускорителях протонов возможно применение спектрометрических методов детектирования нейтронного излучения. Восстановление спектров нейтронов по показаниям многосферного спектрометра относится к классу обратных задач, а именно, к отысканию неизвестной причины по ряду известных следствий, и сводится к решению системы алгебраизированных уравнений [10]. Энергетические зависимости чувствительности (ЭЗЧ) таких устройств определяются толщиной замедляющего слоя и наличием поглотителя тепловых нейтронов внутри него. К приборам, основанном на таком методе, относятся как многошаровые спектрометры Боннера, так и приборы на основе одного замедлителя. К таким приборам относятся дозиметр ДКС-96Н и основанный на нем дозиметрспектрометр нейтронов ДСН-01, дозиметр-радиометр МКС-АТ 1117 с блоками детектирования БДКН-01 и БДКН-03 и БДКН-06 (в спектрометрическом исполнении), многошаровой спектрометр Боннера СБ-РСУ-01 на основе детектора тепловых нейтронов серийного прибора РСУ-01 [11] и другие.

Правильность и точность получаемой с помощью таких средств измерений дозиметрической информации во многом обусловливается достоверным знанием ЭЗЧ детекторов тепловых нейтронов в замедлителях соответствующих размеров. Для детекторов тепловых нейтронов, помещенных в замедлители большого размера, характерны пики чувствительности к быстрым нейтронам до 10 МэВ. С увеличением диаметра (размера) замедляющего слоя, без специальных технических дополнений конструкции таких приборов, ЭЗЧ начинает резко спадать (пример: рис. 3).

В качестве средства измерения в оценке доз при аварийной нейтронной дозиметрии применяют комплексы Кордон-А", предназначенные для измерения поглощенной дозы (кермы) нейтронного излучения. В дозиметре используются мишени на основе ²³⁵U (для регистрации нейтронов с энергией более 0,4 эВ) и ²³²Th (для регистрации нейтронов с энергией более 1,2 МэВ). Мишени с детекторами помещены в кадмиевый контейнер, а вся сборка в пластмассовый корпус. Образованные нейтронами осколки деления от каждой мишени регистрируются двумя трековыми детекторами – тонкими (толщиной около 6 мкм) полиэтилентерефталатными (ПЭТФ) пленками, при этом первый детектор размещается вплотную к мишеням, а второй детектор за поглотителем из ПЭТФ толщиной около 5 мкм. Диапазон энергий нейтронного излучения составляет 4×10⁻⁷ – 20 МэВ [12]. Индивидуальные аварийные дозиметры ГНЕЙС позволяют определять отдельные компоненты дозы гамма- и бета-излучений, тепловых и медленных нейтронов, а также промежуточных и быст-



Рис. 3. Матрица чувствительности ³Не спектрометра Боннера GSF для шаров различного диаметра (в дюймах) [11] Fig. 3. Matrix of sensitivity of 3He spectrometer Bonner GSF for balls of different diameters (in inches) [11]

рых нейтронов. Аварийными дозиметрами ГНЕЙС дополнительно оснащают персонал в условиях, когда помимо бета- и гамма-излучения возможно воздействие нейтронного излучения [13]. Для измерения дозы гамма-излучения и её распределения по телу дозиметры размещают на груди и на спине. Для этого в кассете ГНЕЙС содержится 8 дозиметров. Для гамма-излучения в ней имеются два одинаковых дозиметра ИКС.

Для проведения индивидуального дозиметрического контроля (ИДК) в смешанных гамма-нейтронных полях применяются индивидуальные дозиметры, основанные на термолюминесцентном методе регистрации ионизирующего излучения и фотографическом методе с использованием ядерных эмульсий, реже используют электрон-B ные полупроводниковые дозиметры (ППЛ) термолюминесцентных дозиметрах (ТЛД) используется эффект отражения и замедления падающих на тело человека нейтронов с последующей их регистрацией – так называемый альбедный эффект. На основе альбедного эффекта с парой ТЛД на основе лития-6 и лития-7 созданы дозиметры ДВГН-01, ДВНГ-М. Из электронных дозиметров известны такие прямопоказывающие дозиметры, как EPD-N2 и PDM-303, в которых в качестве детектора используется ППД с двумя типами радиаторов: изотоп лития ⁶Li для регистрации тепловых нейтронов и водородосодержащего материала для регистрации быстрых нейтронов по протонам отдачи (табл. 3).

На основании данных об энергетических диапазонах различных индивидуальных дозиметров можно сделать вывод о том, что для эффективного контроля облучения персонала нейтронами широкого энергетического диапазона таких дозиметров недостаточно, так как они не справляются с оценкой индивидуальных доз от нейтронов с энергией выше 20 МэВ. Для некоторых из них, таких как альбедные дозиметры, ЭЗЧ спадает с увеличением энергии нейтронного излучения, для других, таких как EPD-N2 ЭЗЧ, не представлена свыше 15 МэВ (примеры ЭЗЧ известных индивидуальных дозиметров представлены на рис. 4). Также известно, что дозиметр PDM-303 обладает повышенной чувствительностью к высокоэнергетическим нейтронам, завышая показания на опорных полях ускорителя У-70 до 700 %, что требует введения корректирующих калибровочных коэффициентов [14]. Как следствие, отсутствие промышленных средств, позволяющих в полном объеме проводить ИДК в полях нейтронного излучения, вынудило научные центры разрабатывать собственные методики проведения ИДК,



Радиационная физика, техника и дозиметрия

 Рис. 4. Отношение ЭЗЧ индивидуальных дозиметров EPD-N2 и ДВГН-01 к удельному эквиваленту индивидуальной дозы моноэнергетических нейтронов [14]
 Fig. 4. The ratio of the ESP of individual dosimeters EPD-N2 and DVGN-01 to the specific equivalent of the individual dose of monoenergetic neutrons [14]

основанные на различных модификациях известных методов и средств измерений нейтронов [15].

Стоит отметить, что в готовящемся проекте «Специальные санитарные правила в области радиационной безопасности», включающем в себя все обновленные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности с различными источниками ионизирующего излучения, отсутствует раздел, посвященный обеспечению радиационной безопасности на ускорителях протонов, хотя такой нормативный документ был принят еще в СССР [16], на данный момент уже утративший силу.

В связи с отсутствием в настоящее подобных отечественных нормативных документов, относящихся к нормированию воздействия высокоэнергетического нейтронного излучения, практически не ведется разработка соответствующих средств дозиметрического контроля. Отсутствие государственных эталонов высокоэнергетического нейтронного излучения приводит к тому, что энергетический диапазон большинства серийно выпускаемых в настоящий момент переносных и индивидуальных дозиметров ограничен 14 МэВ по нейтронному излучению [17]. Спектры различных поверочных установок отличаются от реальных спектров за защитой протонных ускорителей, а также они имеют ограничение по энергии нейтронного излучения, не превышающего 14 МэВ. На примере организации радиационного контроля в ИФВЭ анализ на основе функций чувствительности всех трех групп применяемых дозиметров (индивидуальные дозиметры, радиационные мониторы, АСРК) показывает, что калибровка на УКПН в реальных условиях дает погрешность измерения эквивалентной дозы более 100 % для радиационных мониторов и более 1000 % для дозиметров ИДК [18]. В связи с этим представляется не-

Таблица 3

Энергетический диапазон измерения некоторых индивидуальных дозиметров нейтронного излучения Energy range of measurement of some individual neutron dosimeters

0, 0	
Название	Энергетический
индивидуального дозиметра	диапазон
ДВГН-01	0,025 эВ – 20 МэВ
ДВС-02Д	0,025 эВ – 20 МэВ
EPD-N2	0,025 эВ – 15 МэВ
Harshaw!6600	От тепловых до 10 МэВ
Кордон-А	4×10 ⁻⁷ – 20 МэВ

обходимым рассмотрение и сравнение различных известных методов и средств дозиметрии нейтронного излучения, с возможностью измерения высокоэнергетического нейтронного излучения.

Средства и методы регистрации высокоэнергетического нейтронного излучения

Активационный. Весьма распространенный метод определения эквивалентной дозы в практике радиационного контроля ив исследовательских работах основан на измерении флюенса высокоэнергетических нейтронов с помощью активационных углеродных детекторов по реакции ¹²С(n,2n)¹¹С [19]. Радионуклид ¹¹С имеет период полураспада около 20 мин и пороговую энергию образования около 20 МэВ, а сечение реакции имеет почти постоянное значение примерно 20 мбарн для нейронов с энергией выше 20 МэВ [20]. В качестве детектора высокоэнергетических нейтронов используют пластины или цилиндры из естественного графита. Позитроны распада ¹¹С могут регистрироваться любым тонкостенным бета-счетчиком. Для увеличения чувствительности такого детектора могут использоваться жидкие сцинтилляторы.

В работе [4] были исследованы дозные поля излучений за защитой синхротрона на 7 ГэВ и компонентный состав и вклад в дозовую нагрузку на персонал для различных видов и энергий вторичного излучения. Нейтронное излучение с энергией более 20 МэВ исследовали методом пороговых детекторов по реакции $^{12}C(n,2n)^{11}C$ путем облучения пластического сцинтилляционного блока на основе полистирола и измерения степени его активации детектором с облученным блоком в качестве сцинтиллятора. Показано, что вклад нейтронов с энергией более 20 МэВ в дозовую нагрузку на персонал составляет более 40 %.

Известны также висмутовые активационные детекторы. На висмуте наблюдается целый ряд пороговых реакций от (n,2n) до (n,9n), некоторые из которых имеют сравнительно большое сечение, дающее возможность оценивать флюенс высокоэнергетических нейтронов с энергией от 50 МэВ до нескольких ГэВ при больших периодах облучения, например, на установках по изучению радиационной стойкости материалов [21].

Трековый. Известны ядерные фотоэмульсии CR-39, на которых облучение нейтронами с энергией 20–50 МэВ сопровождается звездообразованием в результате неупругого рассеяния нейтронов на ядрах эмульсии. Чтобы повысить чувствительность к нейтронам в энергетическом диапазоне от 50 до 100 МэВ, применяются радиаторы из полиэтилена с железом и алюминием [22].

Известна методика комбинированного дозиметра на основе детекторов нейтронов с сильно отличающимися функциями чувствительности – альбедного дозиметра ДВГН-01 и ядерной фотоэмульсии МК-20 (рис. 5) [23].

На основе ядерной эмульсии МК-20, помещенной в корректирующем пакете в свободную полость кассеты ИФК-2,3, разработан метод определения эквивалентной дозы нейтронов по числу треков и так называемый метод ИФКн [24, 25].

Для использования в качестве калибровочного прибора и исследования чувствительности индивидуальных дозиметров нейтронов за защитой протонных ускорителей может использоваться пассивный дозиметр-спектрометр нейтронов (ПДСН), в состав которого входят мишени в контакте с лавсановыми трековыми детекторами, содержащих делящиеся изотопы ²³⁵U и др., и мишени из висмута ²⁰⁹Bi, имеющие различные энергетические зависимости чувствительности (рис. 6), покрывающие весь измеряемый энергетический диапазон прибора [26].







На практике известны комбинированные индивидуальные пленочно-термолюминесцентные дозиметры, чувствительные к нейтронам с энергией более 10 МэВ. Диапазон ЭЗЧ дозиметра NTA позволяет измерять индивидуальный эквивалент дозы нейтронного излучения в полях в диапазоне энергий 10–60 МэВ [27].

Также известны дозиметры, основанные на флуоресцентных трековых детекторах ядерных частиц – FNTD, таких как производимые фирмой Landauer и обладающие рядом важных преимуществ в измерении быстрых нейтронов и высокоэнергетических тяжелых заряженных частиц. Дозиметры, в состав которых входят кристаллы оксида алюминия, легированного магнием, и устройства визуализации новых типов имеют эффективность обнаружения нейтронов, сравнимую с пленками CR-39. Кроме того, FNTD чувствительны к нейтронам с высокой энергией (20–100 МэВ), тогда как детекторы CR-39 теряют свой отклик из-за низкой чувствительности к протонам отдачи с высокой энергией [28].

Тканеэквивалентная пропорциональная камера.

В работах [29, 30] проведено изучение ЭЗЧ тканеэквивалентных пропорциональных камер к нейтронному излучению. Корпус тканеэквивалентных камер (ТЭПК) был изготовлен из капролона (материала, эквивалентного биологическим тканям) с внутренним диаметром 10,8 см и толщиной 0,2 см. Камера имеет газонепроницаемую алюминиевую крышку толщиной 0,2 см и наполнена метаном под давлением, соответствующим 2 мкм ткани. Расчет энергетического отклика нейтронов ТЭПК проводился в энергетическом диапазоне от 20 МэВ до 5 ГэВ. Настоящие данные согласуются с результатами проведенных измерений. Измерения с тканеэквивалентной пропорциональной камерой позволяет получить правильную оценку амбиентной дозы (неопределенности менее 15 %) для нейтронов с энергией ниже 200 МэВ. Такие камеры можно использовать в качестве эталонного дозиметра для калибровки различных дозиметров нейтронного излучения в единицах амбиентной дозы для применения в нейтронных полях высоких энергий.

Пузырьковые детекторы. Детекторы пузырьков представляют собой суспензии чрезмерно расширенных капель галогенуглерода и/или углеводородов (диаметром около 20 мкм), которые испаряются под действием протонов отдачи с высокой ЛПЭ от нейтронных взаимодействий. Перегретые капли диспергированы в гелеобразной среде, содержащейся во флаконе, и действуют как постоянно чувствительные миниатюрные пузырьковые камеры. Общее количество пара, образовавшегося в результате зарождения капель под действием излучения, пропорционально дозе нейтронного облучения. Как средства измерений к данному методу известны дозиметры двух типов производства Bubble Technology Industries, Канада: модель BDPND (рис. 7) для быстрых нейтронов и модель BDT для тепловых нейтронов (Vanhavere et al, 1998). В технических характеристиках указано, что верхний энергетический предел измерения таких дозиметров составляет 15 МэВ, однако известны методы повышения чувствительности к высокоэнергетическому нейтронному излучению путем использования дополнительных свинцовых конверторов. В работах [31, 32] исследованы ЭЗЧ пузырьковых детекторов на ускорителях протонов с применением свинцовых конверторов нейтронов толщиной от 0,2 до 4 см.

Замедлитель + конвертор. Перспективным методом дозиметрии нейтронного излучения на ускорителях заряженных частиц является метод, основанный на регистрации тепловых нейтронов водородосодержащими замедлителями с дополнительными вставками из тяже-

лых материалов с большой атомной массой. Обычно используется несколько шаровых или цилиндрических полиэтиленовых замедлителей, как в спектрометре Боннера, с дополнительным шаром со вставкой из тяжелого металла, либо используется один шар с дополнительным слоем тяжелого материала [33]. Множественное рождение нейтронов во взаимодействии первичных нейтронов с ядрами металла в реакциях расщепления (n, Xn) обусловливает увеличение плотности потока тепловых нейтронов в центре таких дозиметров и, соответственно, увеличению ЭЗЧ для нейтронов высоких энергий, по сравнению с обычными полиэтиленовыми замедлителями. Причем среднее число вторичных нейтронов возрастает с энергией первичного высокоэнергетического нейтрона. ЭЗЧ таких дозиметров практически всегда находится в энергетическом диапазоне от тепловых нейтронов до нескольких ГэВ. В качестве металлических вставок обычно используются металлы, такие как свинец, вольфрам и медь. Детекторами тепловых нейтронов в таких замедлителях зачастую являются пропорциональные счетчики на основе BF3 или ³Не. В условиях импульсных полей ускорителей также целесообразно использовать и накопительные детекторы тепловых нейтронов, такие как термолюминесцентные детекторы [34].

Для улучшения ЭЗЧ детектора тепловых нейтронов в таких комбинированных полиэтиленовых замедлителях в области промежуточных энергий возможно размещение кадмиевых или борных поглотителей тепловых нейтронов на некотором расстоянии от детектора [35]. Помимо улучшения ЭЗЧ такое дополнение позволяет также уменьшить вес и размеры прибора в целом. С целью улучшения ЭЗЧ в области промежуточных энергий, для оперативной оценки дозы в области энергий нейтронов от 10⁻² МэВ до 1 ГэВ так же может применяться комбинация двух замедлителей – полиэтиленовых шаров, один из которых включает свинцовую вставку [36].

В работе [37] приводятся результаты исследований по сравнению откликов некоторых подобных дозиметров, проведенное в области высоких энергий на установке CERF в ЦЕРН (спектральная плотность нейтронов, рассчитанная с помощью программного комплекса



Рис.7. А - Дозиметр Los Alamos NTA

В – Модель пузырькового детектора BDPND для быстрых нейтронов [Электронный pecypc: http://bubbletech.ca/product/bd-pnd/] Fig. 7. A – Dosimeter Los Alamos NTA

B - Model of the bubble detector BDPND for fast neutrons [Electronic resource: http://bubbletech.ca/product/bd-pnd/]



Рис. 8. Спектральная плотность нейтронов, полученная
 FLUKA-моделированием для положения за железной защитой (красный), за бетонной защитой по центру (синий)
 и за бетонной защитой (зеленый). Статистическая неопределенность значений флюенса обычно ниже 1 %
 Fig. 8. Spectral density of neutrons obtained by FLUKA-modeling for the position behind the iron shield (red), behind the concrete shield

in the center (blue) and behind the concrete shield (green). The statistical uncertainty of the fluence values is usually below 1%

FLUKA, представлена на рис. 8). В эксперименте использовались такие приборы как: спектрометр Боннера с расширенным энергетическим диапазоном, нейтронный дозиметр Linus от CERN, нейтронный дозиметр Lupine, нейтронный дозиметр FHT 762 Wendi-II (рис. 9), а также нейтронный дозиметр LB6411, не регистрирующий высокоэнергетические нейтроны (ЭЗЧ дозиметров в сравнении с амбиентным эквивалентом дозы представлены на рис. 10).

По результатам облучения на опорном поле нейтронный дозиметр Wendi II показывает завышенную оценку дозы на бетонном щите в 22 % и недооценку дозы за железной защитой 11 %. Lupine показывает отклонение в ± 12 % за бетонной защитой, и занижает дозу за железной защитой до 16 %. Linus показывает хорошую согласованность с результатами расчетов по FLUKA (до ± 5 % за железной и бетонной защитой)[38].

Сравнение методов и средств измерений доз высокоэнергетического нейтронного излучения

В сравнительной табл. 4 представлены энергетические диапазоны средств измерения доз нейтронного излучения и их возможное применение для радиационного контроля на ускорителях протонов.

Дозиметры EPD-N2 и PDM-303 возможно использовать в высокоэнергетических полях нейтронного излучения за защитой протонных ускорителей только при введении поправочного коэффициента. При этом необходима информация о спектре нейтронного излучения для конкретных рабочих мест, где будет использован данный дозиметр, что требует либо применения спектрометра, чувствительного к высокоэнергетическому нейтронному излучению, либо специальных расчетных программ [31]. При оценке плотности потока высокоэнергетических нейтронов активационными углеродными детекторами минимально детектируемая плотность потока 100 нейтрон/кв.см.×с при неопределенности 50 % и 2 нейтрон/кв.см×с. при ошибке 20 % при активации органического сцинтиллятора. Чувствительность метода при использовании висмутовых счетчиков и камер деления – 100 н/кв.см×с при ошибке 50 % и энергетическом пороге регистрации нейтронов 50 МэВ. Такие активационные детекторы могут быть чувствительны и к импульсному излучению, т.к. являются накопительными. При больших плотностях потока и больших энергиях первичного пучка на исследовательских ускорителях создаются приемлемые условия для оценки вклада в дозу



Рис. 9. Схематическое изображение дозиметра Wendi II [30] Fig. 9. Schematic representation of the dosimeter Wendi II [30]

от высокоэнергетической компоненты. Однако на медицинских ускорителях энергия и величина плотности потока вторичного нейтронного излучения гораздо меньше, особенно за биологической защитой установок на рабочих местах персонала. С учетом низкого сечения данных активационных детекторов (до одного барна), время их экспонирования должно быть достаточно большим, что приводит к невозможности использования такого средства измерения в качестве индивидуального дозиметра нейтронного излучения.

Рассмотренные средства, основанные на методе трековых детекторов, представляют возможность расширения диапазона энергий регистрируемого нейтронного излучения для индивидуальных дозиметров. Однако такие типы дозиметров в основном имеют верхнюю границу регистрации энергий нейтронов только до 100 МэВ, являющуюся достаточно низкой. Также процесс подсчета треков достаточно трудоемкий. Такие дозиметры обычно имеют чувствительность измерения, достаточную для проведения ИДК на протонных ускорителях, но следует отметить, что нижняя граница измерения эквивалентной



Рис. 10. Функции энергетического отклика Linus, Wendi II, Lupine и LB6411 вместе с коэффициентами конверсии эквивалентной дозы по ICRP 74

Fig. 10. Energy response functions Linus, Wendi II, Lupine and LB6411 together with ICRP 74 equivalent dose conversion factors Таблица 4

Энергетические диапазоны рассмотренных дозиметров нейтронного излучения и их возможное применение в радиационном контроле на ускорителях протонов Energy ranges of the considered neutron radiation dosimeters and their possible application in radiation monitoring at proton accelerators

Дозиметры	Энергетический диапазон	Возможное применение средства в радиационном контроле	
EPD-N2 и PDM-303	От тепловых до 15 МэВ, необходим поправочный коэффициент	Индивидуальный дозиметр	
Углеродные активационные детекторы и сцинтилляторы	От 20 МэВ до нескольких ГэВ	Оценка флюенса высокоэнергетических нейтронов при проведении ДКРМ. Возможность использования для оценки аварийных доз от высокоэнергетических нейтронов	
Висмутовые активационные мишени	От 50 МэВ до нескольких ГэВ	Оценка флюенса высокоэнергетических нейтронов при проведении ДКРМ. Возможность использования для оценки аварийных доз от высокоэнергетических нейтронов	
Эмульсии МК-20	От нескольких МэВ до ГэВ С применением ДВГН-01 от тепловых до ГэВ	Индивидуальный дозиметр быстрых и высокоэнергетических нейтронов с возможностью оценки аварийных доз	
NTA	10-60 МэВ	Индивидуальный дозиметр	
FNTD	От тепловых до 100 МэВ	Индивидуальный дозиметр возможностью оценки аварийных доз	
Пузырьковые детекторы (BDPND и BDT)	От тепловых до 15 МэВ, с применением свинцового конвертора до ГэВ	Индивидуальный дозиметр	
FHT 762 WENDI-II (Termo Scientific)	От тепловых до 5 ГэВ	Радиационный монитор в составе стационарного средства измерения; Переносной дозиметр при проведении ДКРМ	
LUPINE (Else Nuclear)	От тепловых до 10 ГэВ	Радиационный монитор в составе стационарного средства измерения; Переносной дозиметр при проведении ДКРМ	

дозы нейтронного излучения для такого метода является достаточно высокой, не менее 0,1 мЗв. Из преимуществ таких дозиметров можно отметить, что они, являясь накопительными, обладают возможностью измерения дозы нейтронного излучения в импульсных полях. Также некоторые из них, например основанные на технологии FNTD, имеют большую верхнюю границу измерения дозы – до 30 Зв, что является необходимым параметром, если дозиметр применяется для оценки вклада в дозу при аварийном облучении.

В качестве индивидуальных дозиметров могут использоваться пузырьковые детекторы BDPND и BDT с дополнительными свинцовыми конверторами нейтронов, обладающие удовлетворимой чувствительностью к нейтронному излучению. Из преимуществ таких детекторов можно отметить, что они не чувствительны к гамма-, рентгеновскому и мюонному излучению. Основным недостатком данных детекторов является то, что при использовании дополнительных конверторов из свинца увеличивается вес дозиметра. Также данные детекторы не могут быть применены для оценки аварийных доз облучения, т.к. верхняя граница дозового диапазона составляет примерно 5 мЗв [39].

Дозиметры, основанные на полиэтиленовых замедлителях с конвертором, имеют лучшую чувствительность к нейтронному излучению из всех рассмотренных методов в широком диапазоне энергий нейтронного излучения – от тепловых до нескольких ГэВ. В отличие от других приведенных методов измерения, метод с использованием тепловых детекторов нейтронов за замедлителями и конверторами обладает достаточно низкой границей измерения мощности дозы нейтронного излучения, до 0,01 мкЗв/ч. Однако в технических характеристиках, таких как Wendy II и Lupine, указан предел измерения мощности дозы нейтронного излучения 100 мЗв/ч, соответственно такие дозиметры не могут применяться при оценке вклада в дозу при аварийном облучении, а также из-за наличия электронно-измерительной аппаратуры не могут применяться и в импульсных полях.

Заключение

На основании проведенного обзора по средствам и методам дозиметрии высокоэнергетического нейтронного излучения на протонных ускорителях возможно сделать следующие выводы.

В настоящее время отечественные производители приборов и систем радиационного контроля не могут предоставить необходимые средства измерения с возможностью корректного измерения дозы нейтронного излучения свыше 20 МэВ.

Предложен ряд частных методических решений, позволяющих использовать рассмотренные типы дозиметров в радиационном контроле на протонных ускорителях как временное решение в отсутствии нормативной базы и аттестованного эталона для нейтронного излучения с энергией свыше 20 МэВ.

Для разработки соответствующей санитарно-гигиенической нормативной базы необходимо ее гармонизировать с международными рекомендациями, относящимся к дозиметрии нейтронного излучения с энергией более 20 МэВ.

В связи с отсутствием средств дозиметрического контроля на протонных ускорителях с возможностью корректного измерения дозы нейтронного излучения с энергией свыше 20 МэВ, остается неясной позиция выполняющих экспертизу органов санитарно-эпидемиологического надзора при выдаче санитарно-эпидемиологического заключения для таких объектов, хотя в обязанности таких надзорных организаций входит требование к эксплуатирующим органам обеспечить объективный радиационный контроль на протонных ускорителях.

Из этого следует, что необходим комплекс работ по разработке и введению новых средств измерений, способных корректно измерять дозу нейтронного излучения с энергией более 20 МэВ, и на основе полученных результатов возможно разработать специальные санитарные правила и нормы по радиационной безопасности для ускорителей протонов, учитывающих энергетические особенности нейтронного излучения на таких объектах.

Means and Methods of Dosimetry of High-Energy Neutron Radiation on Proton Accelerators

A.G. Tsovyanov¹, P.P. Gantsovskii¹, A.Yu. Komarov¹, A.G. Alexeev², M.R. Popchenko¹, V.E. Zhuravleva¹, N.A. Bogdanenko¹

¹A.I. Burnasyan Federal Medical Biophysical Center, Moscow, Russia ²Institute of Physics High Energy of the RAS, Protvino, Russia

Contact person: Artyom Yurievich Komarov: komarov_artiom@mail.ru

CONTENTS

The main common means and methods of neutron radiation dosimetry.

Consideration of various means and methods for detecting high-energy neutron radiation:

- Activation
- Tracking
- Bubble detectors
- TEPC
- Moderator + converter

Comparison of the above methods and instruments for measuring doses of high-energy neutron radiation.

Key words: dosimetry, high-energy radiation, proton accelerators, radiation safety

For citation: Tsovyanov AG, Gantsovskii PP, Komarov AYu, Alexeev AG, Popchenko MR, Zhuravleva VE, Bogdanenko NA. Means and Methods of Dosimetry of High-Energy Neutron Radiation on Proton Accelerators. Medical Radiology and Radiation Safety. 2021;66(4):77-85.

DOI: 10.12737/1024-6177-2021-66-4-77-85

СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

- Скринский А.Н. Ускорительные и детекторные перспективы физики элементарных частиц УФН. Т. 138 С. 3–43. 1982. DOI: 10.3367/UFNr.0138. 198209a.0003
- Агафонов А.В. Ускорители в медицине // Матер. 15-го совещания по ускорителям заряженных частиц. Т.2. 1991.
- Князев В.В., Комочков М.М., Лебедев В.Н., Мещерова И.В., Мошаров А.И. Радиационная безопасность на ускорителях протонов высокой энергии // Атомная энергия. 1969. Т. 27, № 3.
- Егорова М.С. Характеристики вторичного излучения от протонного ускорителя на 7 ГэВ. М.: Институт биофизики МЗ СССР, 1966.
 Алейников В.Е., Комочков М.М. Дозиметрические характеристики
- Алейников В.Е., Комочков М.М. Дозиметрические характеристики полей излучения ядерно-физических установок ОИЯИ и адекватность показаний детекторов дозе радиации. 1981.
- Alexeev AG, Kharlampiev SA. Dosimetric Characteristics of the IHEP Neutron Reference Fields // Rad. Prot. Dosim. 1997. V.70, No. 1-4. P. 341-344.
- МУ 2.6.5.028-2016. Определение индивидуальных эффективных и эквивалентных доз и организация контроля профессионального облучения в условиях планируемого облучения. Общие требования.
- МУ 2.6.5.026-2016. Дозиметрический контроль внешнего профессионального облучения. Общие требования: Методические указания.
- Юревич В.И. Спектрометрия высокоэнергетических нейтронов. Дубна: ОИЯИ, 2012.
- Красавин Е.А., Борейко А.В., Колтовая Н.А., Говорун Р.Д., Комова О.В., Тимошенко Г.Н. Радиобиологические исследования в ОИЯИ. Дубна: ОИЯИ, 2015. 182 с.
- Санников А.В., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Купцов С.И., Сухарев М.М. Многошаровой спектрометр нейтронов на основе серийного прибора РСУ-01: Препринт ИФВЭ 2007–21. Протвино, 2007. 12 с.
- Комплекс аварийной нейтронной дозиметрии "КОРДОН-А": Описание типа средства измерения.
- Рекомендации по приборному обеспечению дозиметрического и радиометрического контроля в соответствии с НРБ-99 и ОСПОРБ-99.
- 14. Алексеев А.Г., Бараненков Н.Н., Быстров Ю.В. Исследование чувствительности индивидуального нейтронного дозиметра PDM-303 к высокоэнергетическому нейтронному излучению // Матер. XVI совещания по ускорителям заряженных частиц, 20–22 октября 1998 г. Протвино: ГНЦ РФ Институт физики высоких энергий, 1998.
- Мокров Ю.В. Разработка методов и средств метрологического обеспечения радиационного контроля нейтронного излучения на ускорителях и импульсных реакторах: Автореф. Дубна, 1998.
- 16. Санитарные правила размещения и эксплуатации ускорителей протонов с энергией более 100 МэВ.
- 17. Цовьянов А.Г., Ганцовский П.П., Шандала Н.К., Шинкарев С.М., Романов В.В. Проблемы обеспечения радиационной безопасности персонала при эксплуатации терапевтических ускорителей протонов на примере центра протонной терапии в Дмитровграде // Медицинская радиология и радиационная безопасность. 2019. Т. 64, № 2 С. 33-40. DOI: 10.12737/ article_5ca5e40c3f79b9.76178616
- Алексеев А.Г., Быстров Ю.В., Головачик В.Т., Харлампиев С.А. Дозиметр смешанного излучения на основе ионизационных камер для метрологического обеспечения радиационного контроля на ускорителе: Препринт ИФВЭ 98-68. Протвино, 1998.
- Комочков М.М., Лебедев В.Н. Практическое руководство по радиационной безопасности на ускорителях заряженных частиц. М.: Энергоатомиздат, 1986.
- Егорова М.С. Радиационно-дозиметрическая характеристика условий труда на протонном синхротроне с энергией 7 ГэВ. М.: Институт биофизики МЗ СССР, 1967.

- Крупный Г.И., Стеценко Г.Н., Янович А.А. Методические вопросы использования пороговых активационных детекторов в радиационных исследованиях на ускорительном комплексе ИФВЭ. Протвино: ГНЦ РФ ИФВЭ, 2000.
- Kazumasa S, Takeshi I, Toshiso K. Design of a High Energy Neutron Dosimeter Using CR-39 with Multi-Layer Radiator // Radiation Measurements. 2011. V.46, Issue 12, December. P. 1778-1781.
- 23. Голдобин В.Н., Широков А.Ю., Мынкина Н.В., Пелешко В.Н. Гигиеническая оценка условий труда персонала института физики высоких энергий и мониторинг некоторых показателей здоровья // Медицина экстремальных ситуаций. 2018. Т. 20. № 1.
- Комочков М.М., Мокров Ю.В. Индивидуальный дозиметрический контроль в ОИЯИ. Сообщения объединенного института ядерных исследований. P16-94-178. Дубна, 1994.
- Гельфанд Е.К., Комочков М.М., Манько Б.В., Салацкая М.Я., Сычев Б.С. Использование метода ИФКн для определения эквивалентной дозы излучения за защитой ускорителей протонов // Атомная энергия. 1980. Т.49. Вып. 2. С. 108-112.
 Санников А.В. Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения
- Санников А.В. Развитие методов спектрометрии нейтронного излучения на больших протонных ускорителях: Автореф. Протвино, 2006.
- Clinton P., Anderson Meson., Michael W., Mallett Dennis G., Vasilik George J., Littlejohn Joseph R. High-Energy Neutron Dosimetry at TKE Physics Facility Cortez. Los Alamos National Laboratory, 1990.
 Akselrod M.S. Fundamentals of Materials, Techniques, and Instrumentation
- Akselrod M.S. Fundamentals of Materials, Techniques, and Instrumentation for OSL and FNTD Dosimetry Concepts and Trends in Medical Radiation Dosiumetry // Proceedings of SSD Summer School. AIP Conference Proceedings. 2011. V.1345, Issue 1. P. 274-302.
- Alexeev A.G. Application of Tissue Equivalent Proportional Counter in IHEP Radiation Protection: IHEP Preprint 95-69. Protvino Publ., 1995.
- Alexeev A.G., Kharlampiev S.A. Energy Response of Tissue Equivalent Proportional Counter for Neutron Above 20 MeV: IHEP Preprint 97-18. Protvino Publ., 1997.
- Nunomiya T., Nakao N., Kim E., Kurosawa T., Taniguchi S., Sasaki M., Iwase H., Nakamura T., Uwamino Y., Shibata T., Ito S., Perry D.R. & Wright P. Measurements of Neutron Attenuation through Iron and Concrete at ISIS // Journal of Nuclear Science and Technology. 2000. Suppl. 1 (March). P. 158-161.
- of Nuclear Science and Technology. 2000. Suppl. 1 (March). P. 158-161.
 32. Improved Response of Bubble Detectors' to High-Energy Neutrons Stefano Agosteo Marco Silari and Luisa Uirid? Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Nucleare. Milan, Italy CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland.
- Крючков В.П. Адронный дозиметр: Патент на изобретение. SU 1521057.
 Мамаев А.М., Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В., Сухарев
- М.М., Сухих С.Э. Пассивный дозиметр нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей. Протвино, 2019.
- Пелешко В.Н., Савицкая Е.Н., Санников А.В. Оптимизация конструкции дозиметра нейтронов с расширенным диапазоном энергий для высокоэнергетических ускорителей. Протвино, 2014.
- Бескровная Л.Г., Гусева С.В., Тимошенко Г.Н. Метод мониторирования полей нейтронов вокруг высокоэнергетических ускорителей // Письма в ЭЧАЯ. 2018. Т.15, №3(215). С. 286-294.
- 37. Dinara N., Pozzia F., Silaria M., Puzob P., Chiriottic S., Saint-Huberte M.De., Vanhaverec F., Hoeyc O.Van, Orchardd G.M., Wakerd A.J. Instrument Intercomparison in the High-Energy Field at the CERN-EU Reference Field (CERF) Facility and Comparison with the 2017 FLUKA Simulations.
- 38. Olsher, et al. // Health Physics. 2000. V. 79, No. 2. P. 170ff.
- Bhaskar Mukherjee, Wolfgang Clement, Stefan Simrock. Neutron Field Characterisation in a High-Energy Proton–Synchrotron Environment Using Bubble Detectors // Radiation Measurements. 2008. V. 43, Issues 2-6, February-June. P. 554-557.

REFERENCES

- Skrinskiy AN. Accelerator and Detector Prospects of Elementary Particle 1. Physics. DOI: 10.3367/UFNr.0138.198209a.0003 (In Russian).
- Agafonov AV. Accelerators in Medicine 15th Meeting on Charged Particle Accelerators 1997. Vol. 2. (In Russian).
- Knyazev VV, Komochkov MM, Lebedev VN, Mescherova IV, Mosharov AI. 3 Radiation Safety at High-Energy Proton Accelerators. Atomic Energy. 1969;27;3 (In Russian).
- Egorova MS, et al. Characteristics of Secondary Radiation from a 7 GeV Pro-4. ton Accelerator. Moscow, Institute of Biophysics, Ministry of Health of the USSR Publ., 1966 (In Russian).
- Aleinikov VE, Lumps MM. Dosimetric characteristics of radiation fields of 5. JINR nuclear physics facilities and adequacy of detector readings to radiation dose, 1981 (In Russian).
- Alexeev AG, Kharlampiev SA. Dosimetric Characteristics of the IHEP Neu-6 tron Reference Fields. Rad. Prot. Dosim. 1997;70:1-4:341-344
- MU 2.6.5.028-2016. Determination of Individual Effective and Equivalent Doses and Organization of Control of Occupational Exposure in the Conditions of Planned Exposure. General Requirements (In Russian). MU 2.6.5.026-2016. Dosimetric Control of External Occupational Exposure.
- 8 General Requirements. Methodical Instructions (In Russian)
- 9 Yurevich VI. Spectrometry of High-Energy Neutrons. JINR. 2012 (In Russian).
- 10. Krasavin EA, Boreiko AV, Koltovaya NA, Govorun RD, Komova OV, Timoshenko GN. Radiobiological research at JINR Dubna. JINR. 2015.182 p. (In Russian).
- Sannikov AV, Peleshko VN, Savitskaya EN, Kuptsov SI, Sukharev MM. 11 Multiball Neutron Spectrometer Based on the RSU-01 Serial Instrument: IHEP. Preprint 2007–21. Protvino Publ., 2007. 12 p. (In Russian).
- 12. Complex of Emergency Neutron Dosimetry "CORDON-A". Description of the Type of Measuring Instrument (In Russian).
- 13. Recommendations for Instrumentation of Dosimetric and Radiometric Control in Accordance with NRB-99 and OSPORB-99 (In Russian). 14. Alekseev AG, Baranenkov NN, Bystrov YuV. Investigation of the Sensitivity
- of an Individual Neutron Dosimeter PDM-303 to High-Energy Neutron Radiation. XVI Meeting on Charged Particle Accelerators. SSC RF Institute for High Energy Physics, October 20-22, Protvino, 1998 (In Russian).
- 15. Mokrov YV. Development of Methods and Means of Metrological Support for Radiation Monitoring of Neutron Radiation at Accelerators and Pulsed Reactors. Abstract. Dubna Publ., 1998 (In Russian).
- 16. Sanitary Rules for the Placement and Operation of Proton Accelerators with Energies above 100 MeV (In Russian).
- 17. Tsovyanov AG, Gantsovsky PP, Shandala NK, Shinkarev SM, Romanov VV. Problems of Ensuring Radiation Safety of Personnel when Operating Proton Therapeutic Accelerators Using the Example of the Proton Therapy Center in Dmitrovgrad. Med. Radiology and Radiation Safety. 2019;64;2:33-40. DOI: 10.12737/article_5ca5e40c3f79b9.76178616 (In Russian).
 18. Alekseev AG, Bystrov YV, Golovachik VT, Kharlampiev SA. Mixed Radia-
- tion Dosimeter Based on Ionization Chambers for Metrological Support of Radiation Monitoring at an Accelerator. IHEP Preprint 98-68. Protvino Publ., 1998 (In Russian).
- 19. Komochcov MM, Lebedev VN. A Practical Guide to Radiation Safety at Charged Particle Accelerators. Voscow, Energoatomizdat Publ., 1986 (In Russian)
- 20. Egorova MS. Radiation-Dosimetric Characteristics of Working Conditions at a Proton Synchrotron with an Energy of 7 GeV. Moscow, Institute of Biophysics, Ministry of Health of the USSR Publ., 1967 (In Russian).
- 21. Krupny GI, Stetsenko GN, Yanovich AA. Methodical Problems the Use of

Threshold Activation Detectors in Radiation Researches at the Ihep Accelerator Complex. IHEP Preprint 2000-30. Protvino Publ., 2000 (In Russian).

- 22. Kazumasa S, Takeshi I, Toshiso K. Design of a High Energy Neutron Dosimeter Using CR-39 with Multi-Layer Radiator Radiation Measurements. 2011;46(12):1778-1781.
- Goldobin VN, Shirokov AY, Mynkina NV, Peleshko VN. Hygienic Assessment of the Working Conditions of the Staff of the Institute of High Energy Physics and Monitoring of Some Health Indices. Emergency Medicine. 2018;20(1) (In Russian).
- 24. Komochcov MM, Mokrov YV. Individual Dosimetric Control at JINR. Communications of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna Publ., 1994. P. 16-94-178 (In Russian). 25. Gelfand EK, Komochcov MM, Manko BV, Salatskaya MY, Sychev BS. Using
- the IFCn Method to Determine the Equivalent Radiation Dose behind the Shielding of Proton Accelerators. Atomic Energy. 1980;49(2):108-112 (In Russian).
- 26. Sannikov AV. Development of Methods for Spectrometry of Neutron Radiation at Large Proton Accelerators. Abstract. Protvino Publ., 2006 (In Russian)
- 27. Clinton P, Anderson Meson, Michael W, Mallett Dennis G, Vasilik George J, Littlejohn Joseph R. High-Energy Neutron Dosimetry at TKE Physics Facility Cortez. Los Alamos National Laboratory. 1990.
- Akselrod MS. Fundamentals of Materials, Techniques, and Instrumentation for OSL and FNTD Dosimetry Concepts and Trends in Medical Radiation Dosiumetry. Proceedings of SSD Summer School. AIP Conference Proceedings. 2011;1345(1):274-302.
- 29. Alexeev AG. Application of Tissue Equivalent Proportional Counter in IHEP Radiation Protection. IHEP Preprint 95-69. Protvino Publ., 1995
- Alexeev AG, Kharlampiev SA. Energy Response of Tissue Equivalent Pro-portional Counter for Neutron Above 20 MeV. IHEP Preprint 97-18. Protvino Publ., 1997
- Nunomiya T, Nakao N, Kim E, Kurosawa T, Taniguchi S, Sasaki M, Iwase H, Nakamura T, Uwamino Y, Shibata T, Ito S, Perry D R & Wright P. Measurements of Neutron Attenuation through Iron and Concrete at ISIS. Journal of Nuclear Science and Technology. 2000;Suppl. 1 (March):158-161.
- 32. Improved Response of Bubble Detectors' to High-Energy Neutrons Stefano Agosteo Marco Silari and Luisa Uirid? Politecnico di Milano, Dipartimento
- di Ingegneria Nucleare. Milan, Italy CERN, 1211 Geneva 23, Switzerland. 33. Kryuchkov VP. Hadron Dosimeter. Invention Patent. SU 1521057 (In Russian).
- 34. Mamaev AM, Peleshko VN, Savitskaya EN, Sannikov AV, Sukharev MM, Sukhikh SE. Extended Energy Range Passive Neutron Dosimeter for High Energy Accelerators. Protvino, 2019 (In Russian).
- 35. Peleshko VN., Savitskaya EN., Sannikov AV. Optimization of the Design of a Neutron Dosimeter with an Extended Energy Range for High-Energy Accelerators. Protvino, 2014 (In Russian). 36. Beskrovnaya LG., Guseva SV., Timoshenko GN. A Method for Monitoring
- Neutron Fields Around High-Energy Accelerators. Letters to ECHAYA. 2018;15;3(215):286-294 (In Russian).
- Dinara N, Pozzia F, Silaria M, Puzob P, Chiriottic S, Saint-Hubertc MDe, Vanhaverec F, Hoeyc ÓVan, Orchardd GM, Wakerd AJ. Instrument Intercomparison in the High-Energy Field at the CERN-EU Reference Field (CERF) Facility and Comparison with the 2017 FLUKA Simulations.
 38. Olsher, et al. Health Physics. 2000;79;2:170ff.
- 39. Bhaskar Mukherjee, Wolfgang Clement, Stefan Simrock. Neutron Field Characterisation in a High-Energy Proton-Synchrotron Environment Using Bubble Detectors. Radiation Measurements. 2008;43;Issues 2-6, February-June:554-557

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов. Финансирование. Исследование не имело спонсорской поддержки. Участие авторов. Статья подготовлена с равным участием авторов. Поступила: 30.03.2021. Принята к публикации: 20.04.2021.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest. Financing. The study had no sponsorship.

Contribution. Article was prepared with equal participation of the authors. Article received: 30.03.2021. Accepted for publication: 20.04.2021.