

## ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА МАТЕРИАЛА ПОВ-40 В УСЛОВИЯХ ОБЛУЧЕНИЯ ВТОРИЧНЫМИ НЕЙТРОНАМИ И ГАММА-КВАНТАМИ

Е.В. Малютин<sup>1</sup>, В.В. Сиксин<sup>2</sup>, А.Е. Шемяков<sup>3</sup>, И.Ю. Щеголев<sup>1</sup>

<sup>1</sup> АО “Авангард”, Смоленская обл., Сафоново

<sup>2</sup> Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН, Москва

<sup>3</sup> ЗАО “Протом”, Протвино

Экспериментально исследованы защитные свойства материала ПОВ-40, в состав которого входит ферробор и полиэтилен. Получены коэффициенты кратности ослабления при воздействии потока быстрых нейтронов и гамма-квантов, излучаемых водным фантомом, через который пропускаться пучок протонов с энергиями 50, 100 и 130 МэВ.

Ключевые слова: *водный фантом, детектор телевизионного типа, композиционный защитный материал, коэффициент ослабления, мощность амбиентного эквивалента дозы*

### Введение

В сеансе протонного облучения 19.06.2019 г. было проведено повторное измерение выхода вторичных “мгновенных” нейтронов, вылетающих ортогонально оси пучка из водного фантома. Геометрия проведения измерений была близка к геометрии детектора ДТет в ноябрьском и декабрьском сеансе 2018 г. [1]. Повторно были проведены измерения защитных свойств материала типа ПОВ-40, в состав которого входит ферробор и полиэтилен. Получены коэффициенты ослабления при воздействии потока “мгновенных” нейтронов, излучаемых водным фантомом, через который пропускаться пучок протонов с энергиями 50, 100 и 130 МэВ. В этом эксперименте изучался другой образец ПОВ-40 с увеличенными размерами (25×25×4 см) и другой геометрией эксперимента, которые гарантировали полное перекрытие по-

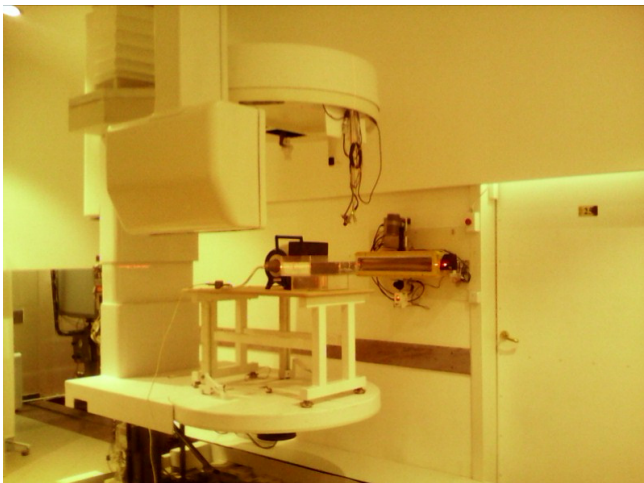
тока вторичных частиц между водным фантомом и детектором.

### Экспериментальные исследования

В настоящих исследованиях определялась мощность амбиентного эквивалента дозы – МЭД. Полученные образцы материала ПОВ-40 имели размеры 25×25 см и толщину 4 см, при длине водного фантома 30 см.

Диаметр шара нейтронного детектора БДМН-96 составлял 245 мм. На рис. 1 представлено расположение детектора БДМН-96 и защитной пластины ПОВ-40 при измерении ее защитных свойств в процедурном каньоне ускорителя “Прометеус”.

В настоящей работе изучалась лучевая нагрузка на небольших расстояниях от оси прохождения пучка в водном фантоме, не превышающих 30 м. Данный вопрос изучался



**Рис. 1.** Установка для эксперимента при измерениях МЭД от нейтронного излучения в сеансе 19.06.2019 г.

также в работе [1], где описывается, что для узких пучков диаметром меньше 5–15 мм можно пренебречь вкладом вторичных нейтронов в дозу, так как для энергий 150–200 МэВ их вклад составляет всего 1,5 % [2].

Материал ПОВ-40 с обозначением 21ф с прослойкой 17ф на ткани бельтинг ОСТ В36038-86, относящийся к “самозатухающим” композициям на основе полиэтилена, предназначен для использования в качестве материала биологической защиты от нейтронного излучения на терапевтических ускорителях и в других условиях применения. Под “самозатухающими” композициями понимают композитный защитный материал, в котором быстрые нейтроны замедляются до малых энергий и затем поглощаются. Основным результатом статьи [1] состоит в том, что в пределах ошибок совпали экспериментально измеренные дозы вторичного нейтронного излучения (в месте расположения электронного тракта у детектора ДТет – в точке на расстоянии от оси пучка не более 30 см) и результаты расчетов Монте-Карло (при той же геометрии). Эти дозовые нагрузки на расстояниях до 30 см от пучка – оказались невелики, как предсказывалась в работах [1, 2], что позволяют детектору ДТет при защите из ПОВ-40 в несколько слоев половинного ослабления работать длительное время (не менее 5 лет) при калибровке пучка на ускорителе.

Материал ПОВ-40 относится к композиционным материалам, обладающим преимуществами многослойной защиты по массогабаритным показателям, которые сначала замедляют быстрые нейтроны до тепловых энергий, а затем поглощают боросодержащей компонентой. Сопутствующее нейтронам захватное  $\gamma$ -гамма излучение практически все поглощается компонентой ферробора.

При прохождении протонного пучка через водный фантом генерируется вторичное излучение: ядра отдачи, ядерные осколки и нейтроны [3], а ядерные реакции между протонами и водной средой фантома идут при энергиях протонов выше 10 МэВ.

На ускорителях, где протонный терапевтический пучок формируется методом пассивного рассеяния, для формирования конечного протонного пучка применяются гораздо большие по интенсивности начальные пучки – превосходящие интенсивность ускорителя “Прометеус” в сотни раз [4]. Для ускорителей с высоким флюенсом пучка (выше  $10^9$  протонов за импульс) обычно разрабатывается специальная защита, в некоторых случаях представляющая собой массивные бетонные сооружения [4]. Но ввиду того, что терапевтический ускоритель “Прометеус” работает с максимальным флюенсом протонов не выше  $10^9$  протонов за импульс, для детектора телевизионного типа ДТет не требуется массивная защита от нейтронов.

Мощность эквивалентной дозы нейтронов в районе расположения ПЗС-матрицы детектора ДТет не превышает 5 мЗв/ч и не является опасной, так как ДТет используется для калибровки не более 10 мин в день. Опасной для разрушения ПЗС дозой является 10 Гр, которая накопится в электронном тракте ДТет за долгие годы эксплуатации прибора (более 5 лет работы).

Кроме прямых измерений дозы на близких от оси пучка расстояниях (не более 30 см) были проведены расчеты для той же геометрии программой FLUKA численными методами [6, 7]. Все расчеты были проведены для энергий 50, 100 и 130 МэВ, причем геометрия расчетов программой FLUKA совпала с геометрией и условиями эксперимента, описанного в этой статье.

Получилось хорошее совпадение между результатами сеансов март, июнь 2019 г. и расчетами программой FLUKA.

Композитные материалы, состоящие одновременно из легких водородосодержащих

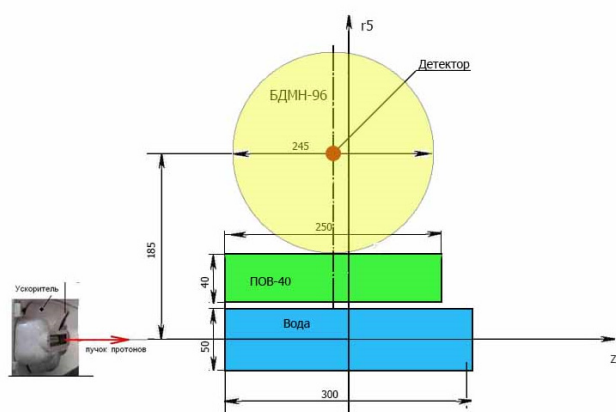


Рис. 2. Схема эксперимента при измерениях МЭД от нейтронного излучения в сеансе 19.06.2019 г.

компонент – типа полиэтилена и из тяжелых компонент – типа ферробора, исследовались ранее в работе [8], наряду с исследованиями основных путей технологического процесса получения многослойных защитных материалов и определением оптимального сочетания последовательности и толщин слоев.

Полученные образцы материала ПОВ-40 имели размеры – 25×25 см и толщину 4 см, при длине водного фантома 30 см.

Диаметр шара нейтронного детектора БДМН-96 составлял 245 мм. Для эксперимента использовалась схема расположения элементов представленная на рис. 2 и обеспечивающая гарантированное перекрытие потока вторичных излучений – для энергий 50, 100 и 130 МэВ.

На примере рис. 2 кратко объясним принцип действия детектора телевизионного типа:

- ✓ ДТет имеет геометрию, близкую к рис. 2 – и размеры водного фантома, и защиты, и расстояния от оси пучка до детектора ДТет – все они близки к размерам на рис. 2;
- ✓ ДТет содержит водный фантом (синий прямоугольник), а также имеет защиту своего детектора (зеленый прямоугольник);
- ✓ В районе красного шарика располагается ПЗС детектора ДТет – сверхчувствительная ПЗС-матрица с низкошумящим электронным трактом;
- ✓ При появлении в водном фантоме энерговыделения протонов и пика Брэгга ДТет с точностью около 0,5 мм определяет профили пика Брэгга и калибрует ускоритель.

Для измерения МЭД от нейтронного излучения при наличии защитной пластины и без нее применялся промышленный дозиметр ДКС-96 с детектором БДМН-96 (НПО “Доза”). Погрешность измерения МЭД по паспортным данным дозиметра-радиометра ДКС-96 составляет 30 %.

Для всех энергий протонного ускорителя флюенс пучка протонов проходящих по оси водного фантома составлял  $10^9$  протонов за импульс, длительность которого равнялась 300 мсек. Диаметр пучка при входе в фантом составлял 3 мм.

## Результаты экспериментов

Основные результаты по измерению МЭД от нейтронного излучения для случая без защитной пластины и с установленной пластиной приведены в табл. 1, содержащей результаты вычисления коэффициентов нейтронного ослабления  $K_n$  при энергиях протонного пучка 50, 100 и 130 МэВ.

В нижней части табл. 1 приводятся результаты расчета амбиентной дозы  $H^*(10)$  программой FLUKA для геометрии, приведенной на рис. 2.

Представители завода-изготовителя дозиметра ДКС-96 с нейтронным детектором БДМН-96 на запрос о измерении вторичных нейтронов со спектром по энергиям от 0,0001 до 10 МэВ, соответствующему нашему опыту, сообщили следующее:

“...Измеренную мощность амбиентного эквивалента дозы  $H^*(10)$  блоком БДМН-96 надо умножать на коэффициент 2 для спектра нейтронов от 0,0001–10 МэВ...”;

В этом случае, мы получаем полное совпадение экспериментально измеренных доз и доз рассчитанных методом Монте-Карло. То есть подтверждается, что в ПЗС детектора ДТет и соответственно в близлежащих областях около мишени нет больших опасных доз, которые могут быстро разрушить электронные тракты детекторов.

Кроме того, разработчик дозиметра ДКС-96 указал зависимость БДМН-96 к  $\gamma$ -излучению:

“...ДКС-96 с нейтронным блоком мы проверяем на относительную чувствительность к  $\gamma$ -излучению. Допустимой является чувствительность  $\gamma$ /нейтроны не более 0,01. То есть доза  $\gamma$ -излучения 1 мЗв даст показания в

Таблица 1

## Результаты измерений и расчетов нейтронного излучения

Энергия, МэВ	Мощность дозы, МЭД, мЗв/ч	Защита	Коэффициент ослабления, $K_{\text{н}}$
130	4,81	нет	–
100	3,51		–
50	0,381		–
130	4,03	есть	1,19
100	2,78		1,26
50	0,276		1,38
Энергия, МэВ	Мощность дозы, МЭД, мЗв/ч, FLUKA	Защита	Коэффициент ослабления, $K_{\text{н}}$
130	8,87	нет	–
100	5,42	нет	–
50	0,760	нет	–
130	7,845	есть	1,13
100	4,536	есть	1,194
50	0,524	есть	1,45

Таблица 2

Результаты измерений МЭД  $\gamma$ -излучения при отсутствии защиты и расчетов по программе FLUKA

Энергия, МэВ	Мощность дозы $H^*(10)$ , МЭД, мЗв/ч	Энергетический спектр = $\gamma$ -квантов и n-FLUKA	$\% = \gamma/n$ FLUKA, %
130	6,350	Нейтроны=0,0001–10=МэВ $\gamma=0,0001-20=$ МэВ для всех энергий	1,76
100	2,350		1,96
50	0,055		4,4

БДМН-96 (по нейтронам) не более 10 мкЗв...". И: "...из 100 % потока гамма-квантов проходящих через детектор БДМН-96, будет зарегистрирован только 1 % прошедших гамма-квантов...".

Учитывая, что паспортная погрешность самого БДМН-96 составляет 30 %, то этим 1 % можно пренебречь.

В табл. 2 приведены результаты по выходу вторичных гамма-квантов из водного фантома. При расчете по программе FLUKA для геометрии рис. 2 было определено отношение выхода гамма-квантов к нейтронам в точке, где стоял детектор дозиметра БДМН-96. Показано:

- ✓ Спектр вторичных нейтронов лежит в диапазоне энергий от 0,0001 до 10 МэВ.
- ✓ Спектр вторичных  $\gamma$ -квантов лежит в диапазоне энергий от 0,0001 до 20 МэВ.

✓ % соотношение доз  $\gamma$ -квантов и нейтронов приведено в табл. 2 и зависит от энергии пучка протонов.

Результаты испытаний защитного материала типа ПОВ-40 позволили сделать вывод, что коэффициент ослабления при энергии 50 МэВ дает половинное ослабление при толщине меньше 6 см. Две толщины половинного ослабления позволят в 4 раза ослабить нейтронное излучение.

### Заключение

Были экспериментально измерены величины МЭД в месте расположения нейтронного детектора БДМН-96 и проведено сравнение с расчетами, проведенными по программе FLUKA.

Было подтверждено, что на небольших радиусах от оси пучка ( $r=18,5$  см) мощность амбиентного эквивалента дозы имеет небольшие величины (около 5 мЗв/ч), что позволит с малогабаритной защитой (коэффициент ослабления равный 4) обеспечить работу детектора телевизионного типа ДТет на срок не менее 5 лет.

Полученные коэффициенты ослабления  $K_n$  для нейтронов, позволяют провести проектирование защитных устройств электронного тракта детектора ДТет.

Авторы выражают благодарность В.Е. Балакину за возможность проведения исследований защитного материала в сеансе 19 июня 2019 г. на ускорителе "Прометейс".

Авторы выражают благодарность А.И. Львову за консультации по проведению сеанса в г. Протвино в марте 2019 г. и за поддержку работы.

### Список литературы

1. Сиксин В.В. Измерение профилей пиков Брэгга детектором ДТет // Краткие сообщения по физике. ФИАН. 2019. Т. 45. № 2. С. 47–52.
2. Ломанов М.Ф., Резник Б.Н., Шимчук Г.Г., Яковлев Р.М. Изучение вклада вторичных

частиц в поглощенную дозу при локальном облучении протонами энергией 200 МэВ // Атомная энергия. 1978. Т. 45. Вып. 5, С. 350–354.

3. Dudkin V. // Health Phys. 1972, Vol. 23. № 5. P. 663–670.
4. Бекман И.Н. Радиационная и ядерная медицина: физические и химические аспекты. Радиохимия. Том 7. Учебное пособие. – МО, Щелково: Издатель Мархотин П.Ю. 2012. 400 с.
5. Гаврилов С.А. Исследование метода двумерной неразрушающей диагностики поперечных характеристик пучков ускоренных заряженных частиц на основе ионизации остаточного газа. Дис. на канд. физ.-мат. наук. Долгопрудный – Москва – Троицк, 2014. 116 с.
6. Официальный сайт пакета FLUKA – <http://www.fluka.org>.
7. Fasso A., Ferrari A., Ranft J., Sala P.R., FLUKA: a multi-particle transport code, CERN-2005-10 (2005), INFN/TC 05/11, SLAC-R-773.
8. Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю. и соавт. Использование материалов, полученных в режиме технологического горения, в технике радиационной защиты // Известия Томского политех. ун-та. 2005. Т. 308. № 5, С. 77–81.

### PROTECTIVE PROPERTIES OF THE POV-40 MATERIAL UNDER CONDITIONS OF IRRADIATION WITH SECONDARY NEUTRONS AND GAMMA RAYS

E.V. Malutin<sup>1</sup>, V.V. Siksin<sup>2</sup>, A.E. Shemyakov<sup>3</sup>, I.Ju. Sgegolev<sup>1</sup>

<sup>1</sup> AO "Avangard", Smolensk reg., t. Safonovo, Russia

<sup>2</sup> P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow, Russia

<sup>3</sup> FTC "Protom", Protvino, Russia

Experimentally investigated the protective properties of the material of the POV-40, which is composed of ferroborene and polyethylene. The coefficients of multiplicity of attenuation are obtained, when exposed to a stream of fast neutrons emitted by a water phantom, through which a beam of protons with energies of 50, 100 and 130 MeV was passed.

Key words: *water phantom, television detector, composite protective material, attenuation coefficient, ambient dose equivalent rate*

E-mail: [antktech@yandex.ru](mailto:antktech@yandex.ru)