

**МНОГОСЛОЙНАЯ ПАССИВНАЯ ЗАЩИТА  
СЦИНТИЛЛЯЦИОННЫХ ДЕТЕКТОРОВ  
НА ОСНОВЕ КРИСТАЛЛОВ BGO, NaI(Tl)  
И СТИЛЬБЕНА, РАБОТАЮЩИХ  
В ИНТЕНСИВНЫХ НЕЙТРОННЫХ ПОЛЯХ  
С ЭНЕРГИЕЙ 14,1 МэВ**

*В. М. Быстрицкий<sup>a, 1</sup>, В. Валкович<sup>b</sup>, Д. Н. Грозданов<sup>a</sup>,  
А. О. Зонтиков<sup>a</sup>, И. Ж. Иванов<sup>a</sup>, Ю. Н. Конач<sup>a</sup>,  
А. Р. Крылов<sup>a</sup>, Ю. Н. Рогов<sup>b</sup>, И. Н. Русков<sup>a</sup>,  
М. Г. Сапожников<sup>a</sup>, В. Р. Ской<sup>a</sup>, В. Н. Швецов<sup>a</sup>*

<sup>a</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна

<sup>b</sup> Институт им. Р. Бошковица,  
лаборатория ядерно-аналитических методов, Загреб

<sup>a</sup> Институт ядерных исследований и ядерной энергетики  
Болгарской академии наук, София

В работе рассмотрены вопросы, связанные с выбором оптимального варианта пассивной защиты сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов BGO, NaI(Tl) и стильбена от прямого попадания в них нейтронного излучения с энергией 14,1 МэВ, испущенного источником изотропно в телесный угол  $4\pi$ . Выполнен цикл экспериментов по измерению фактора подавления загрузки указанных детекторов путем использования различных защитных фильтров, состоящих из слоев железа, свинца и борированного полиэтилена с суммарной толщиной, не превышающей 50 см.

The paper discusses the issues related to the selection of the optimal variant of passive protection of scintillation detectors based on the crystals of BGO, NaI(Tl) and stilbene from direct neutron radiation with an energy of 14.1 MeV emitted by an isotropic source in a  $4\pi$  solid angle. A series of experiments has been performed, aimed at measuring the suppression factor of the total counting rate for these detectors by using various protection filter layers consisting of iron, lead and borated polyethylene with a total thickness not exceeding 50 cm.

PACS: 29.25.Dz; 29.40.Mc; 29.85.Ca; 29.85.Fj

---

<sup>1</sup>E-mail: bystvm@jinr.ru

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в Объединенном институте ядерных исследований (Дубна) проводится цикл методических работ, направленных на выполнение проекта TANGRA (TAgged Neutrons & Gamma RAys) [1]. Одним из основных направлений данного проекта является исследование редких процессов, происходящих в результате взаимодействия быстрых нейтронов с энергией 14,1 МэВ со средними и тяжелыми ядрами: реакции  $(n, n')$ ,  $(n, n'\gamma)$ ,  $(n, 2n')$ . В связи с тем, что выход данных реакций мал, возникает, как правило, задача подавления нейтронного фона, обусловленного прямым попаданием нейтронов, испущенных источником, в сцинтилляционные детекторы, используемые для регистрации вторичного ядерного излучения (нейтронов, гамма-квантов). В этом случае важно оптимизировать пассивную защиту сцинтилляционных детекторов от прямого попадания в них нейтронов, испущенных источником. Оптимизация защиты сводится к тому, чтобы подавить вклад за счет регистрации данным детектором прямых нейтронов с энергией 14,1 МэВ до требуемого уровня, согласно условиям проведения эксперимента.

В каждом конкретном эксперименте, согласно геометрии расположения источника нейтронов, мишени и детекторов, требуется выбор своего конкретного оптимального варианта пассивной защиты.

В связи с этим для успешного выполнения намеченного эксперимента по исследованию реакций неупругого рассеяния нейтронов с энергией 14,1 МэВ на ядрах углерода ( $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}$ ) [2] нами предварительно производился цикл измерений с целью выбора оптимального варианта защиты сцинтилляционных детекторов на основе кристаллов BGO, NaI(Tl) и стиблена (DST), используемых в запланированном эксперименте. В качестве материалов, входящих в состав защиты, использовались железо, борированный полиэтилен и свинец. Измерения выполнялись как с защитой из однородного вещества, так и с различным комбинационным составом слоев из перечисленных веществ.

В результате выполнения данных измерений определены факторы подавления прямого потока нейтронов с энергией 14,1 МэВ, испущенных из источника, в направлении расположения сцинтилляционных детекторов. Построены зависимости фактора подавления прямого нейтронного потока от толщины тормозного фильтра.

## 1. ПОСТАНОВКА ЭКСПЕРИМЕНТА

На рис. 1 дана схема проведения измерений по выбору оптимальной защиты сцинтилляционных детекторов от прямого потока нейтронов с энергией 14,1 МэВ. В качестве источника нейтронов с энергией 14,1 МэВ использовался портативный нейтронный генератор ИНГ-27 [3] со встроенными тритиевой мишенью и кремниевым альфа-детектором. Следует отметить, что данные измерения проводились с использованием нейтронного генератора, применение которого планируется в эксперименте по исследованию реакций  $^{12}\text{C}(n, n')^{12}\text{C}$  и  $^{12}\text{C}(n, n'\gamma)^{12}\text{C}$ . Генерация нейтронов производится в результате протекания бинарной ядерной реакции взаимодействия ускоренных дейтронов с тритиевой мишенью:



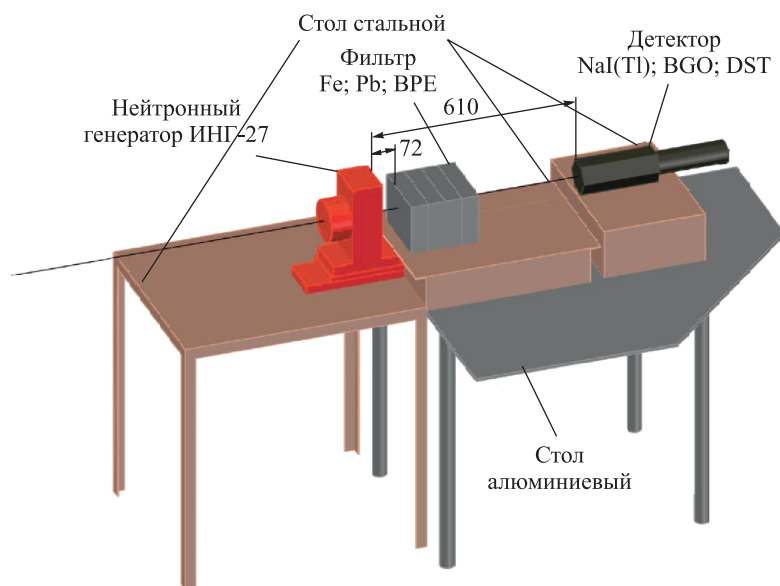


Рис. 1. Схема проведения эксперимента: нейтронный генератор ИНГ-27; сцинтилляционный детектор на основе кристалла NaI(Tl) (BGO — кристалл германата висмута; DST — кристалл стильбена); фильтр (пассивная защита): Fe — железо, Pb — свинец, ВРЕ — борированный полиэтилен

В качестве сцинтилляционных детекторов использовались детекторы [4] на основе кристаллов BGO (диаметр 76 мм, толщина 65 мм), NaI(Tl) (в перпендикулярном сечении — шестигранник со стороной 70 мм и длиной 200 мм) и стильбена (диаметр 76 мм, толщина 50 мм) [5]. В дальнейшем данные детекторы обозначаются соответственно как детекторы BGO, NaI и DST. Между выходным окном нейтронного генератора и сцинтилляционным детектором располагалась пассивная защита из слоев различных веществ либо их суперпозиции. Расстояние между выходным окном нейтронного генератора ИНГ-27 и входным окном детекторов составляло 61 см и оставалось постоянным при любой толщине защиты. Расстояние от выходного окна нейтронного генератора до защиты вдоль направления потока нейтронов, падающих на нее, составляло 7 см и оставалось постоянным при вариации как толщины защиты, так и комбинаторики слоев из различных веществ, входящих в ее состав.

Регистрирующая электроника [6] позволяла производить измерение энергетических распределений событий, зарегистрированных сцинтилляционными детекторами NaI, BGO и DST. Следует отметить, что распределения событий представляют собой суперпозицию распределений, обусловленных регистрацией: нейтронов, прошедших через тормозной фильтр и попавших в детектор; нейтронов, испытавших рассеяние в веществе фильтра и попавших в сцинтилляционный детектор; гамма-квантов, образовавшихся в результате взаимодействия нейтронов с веществом тормозного фильтра.

Мониторирование потока нейтронов, падающих на защиту, осуществлялось в каждом конкретном измерении путем регистрации альфа-частиц, образующихся в реакции (1) кремниевым детектором, расположенным внутри нейтронного генератора.

## 2. РЕЗУЛЬТАТЫ ИЗМЕРЕНИЙ. АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Эксперимент включал в себя цикл измерений фактора подавления нейтронного потока, падающего на сцинтилляционный детектор, с использованием различных веществ в качестве его пассивной защиты — железа, свинца и борированного полиэтилена, а также их возможных комбинаций вдоль направления нейтронного потока. Фактор подавления загрузки  $f$  сцинтилляционного детектора BGO (NaI, DST) определяется как отношение чисел событий, зарегистрированных данным детектором в случаях отсутствия и наличия пассивной защиты определенной толщины и композиционного состава между источником нейтронов и детектором:

$$f = \frac{N_{ev}(L = 0)}{N_{ev}(L)}, \quad (2)$$

где  $N_{ev}(L = 0)$ ,  $N_{ev}(L)$  — числа событий, зарегистрированных данным сцинтилляционным детектором в случае отсутствия и наличия пассивной защиты из определенного вещества между источником нейтронов и детектором.

На рис. 2–4 в качестве примера приведены амплитудные спектры событий (в единицах эквивалентной по световыходу энергии электронов, МэВee [7]), зарегистрированных соответственно детекторами BGO, NaI и DST, в зависимости от толщины пассивной защиты, изготовленной из железа, а для детектора DST — еще и дополнительно (рис. 5) от толщины фильтра из борированного полиэтилена (BPE). Толщины фильтров варьировались в интервале от 0 до 50 см, а амплитудный порог в каналах регистрации событий детекторами BGO, NaI и DST соответствовал 0,25 МэВee.

На рис. 6–8 для детекторов BGO, NaI и DST приведены измеренные зависимости факторов подавления  $f$  загрузки данных детекторов от толщины тормозных фильтров из железа, свинца и борированного полиэтилена в пределах от 0 до 50 см. На этих же

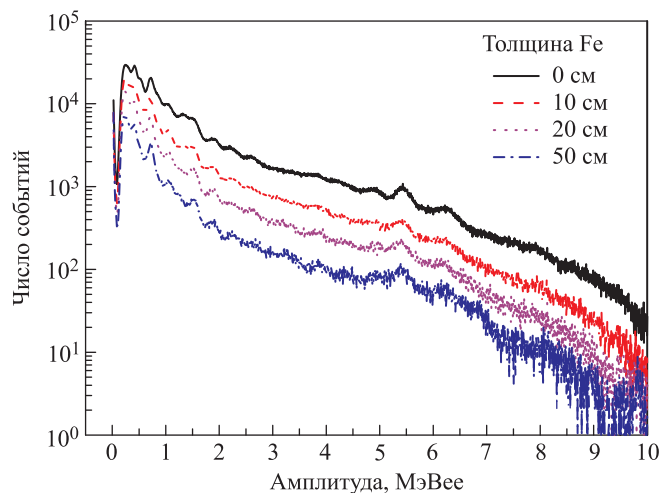


Рис. 2. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных BGO-детектором, при толщинах тормозного фильтра из Fe от 0 до 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, эквивалентном энергии гамма-квантов, равной 0,25 МэВee

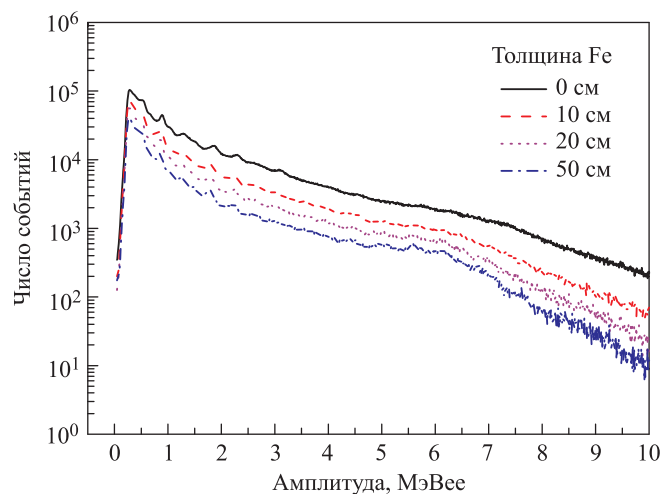


Рис. 3. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных NaI-детектором, при толщинах тормозного фильтра из Fe от 0 до 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, эквивалентном энергии гамма-квантов, равной 0,25 МэВee

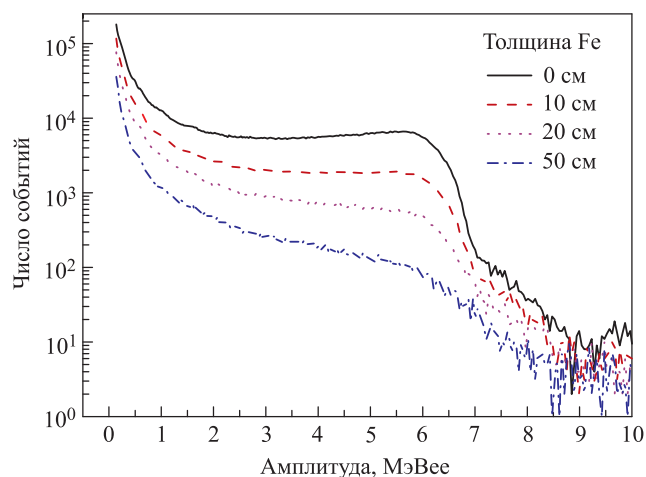


Рис. 4. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором DST, при толщинах тормозного фильтра из Fe от 0 до 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, эквивалентном энергии гамма-квантов, равной 0,25 МэВee

рисунках представлены аналогичные зависимости для случая использования комбинированного фильтра (Fe + ВРЕ + Pb) с суммарной толщиной 50 см, состоящего из слоев железа, борированного полиэтилена и свинца, расположенных в указанной последовательности вдоль направления падающего потока нейтронов, в комбинациях: толщина слоя железа варьируется в интервале от 10 до 40 см, толщина слоя борированного полиэтилена постоянна и составляет 10 см, а толщина слоя из свинца варьируется при этом от 30 см до нуля. Обоснование выбора данной комбинации трехкомпонентной пассивной защиты приведено в тексте ниже.

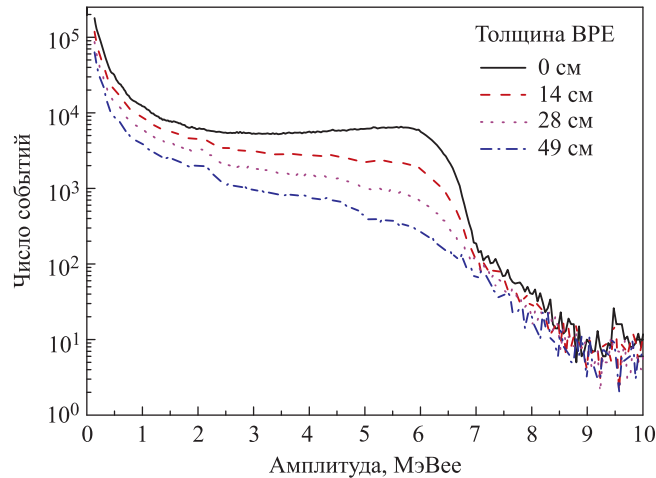


Рис. 5. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором DST, при толщинах тормозного фильтра из борированного полиэтилена от 0 до 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, эквивалентном энергии гамма-квантов, равной 0,25 МэВее

Представленные на рис. 6–8 зависимости фактора подавления  $f$  загрузки детекторов BGO, NaI и DST от толщины тормозных фильтров из железа, свинца и борированного полиэтилена измерены при энергетическом пороге в канале регистрации излучения сцинтилляционными детекторами, равном 0,25 МэВее в шкале, эквивалентной по световыходу энергии гамма-кванта.

Как видно из рис. 6, максимальный фактор подавления загрузки детектора BGO, равный 8,7, достигается при использовании составных фильтров следующих составов: Fe\*(20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) либо Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см). При указанных комбинациях фильтров и энергетическом пороге 0,25 МэВее фактор подавления загрузки детектора BGO примерно на 25 % больше соответствующей величины, измеренной при использовании фильтров из железа и свинца толщиной 50 см.

Для детектора NaI, согласно рис. 7, максимальный фактор подавления загрузки, равный 4,2, достигается, как и для детектора BGO, при использовании комбинированного фильтра следующего состава: Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) либо Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см). При указанных комбинациях фильтров и энергетическом пороге 0,5 МэВее фактор подавления примерно на 10 % больше соответствующих величин, измеренных при использовании фильтров из железа и свинца толщиной 50 см.

На рис. 8 приведены измеренные зависимости фактора подавления суммарной загрузки детектора DST (загрузки, обусловленной регистрацией данным детектором как нейтронной компоненты, так и гамма-компоненты) от толщины тормозных фильтров из Fe, Pb и ВРЕ в пределах от 0 до 50 см, а также полученные при использовании комбинированной защиты в двух модификациях: Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) и Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см).

Как видно из рис. 8, значения фактора подавления суммарной загрузки детектора DST при одних и тех же толщинах фильтров из Fe и Pb, в интервале от 0 до 50 см, отличаются друг от друга не более, чем на 3 %.

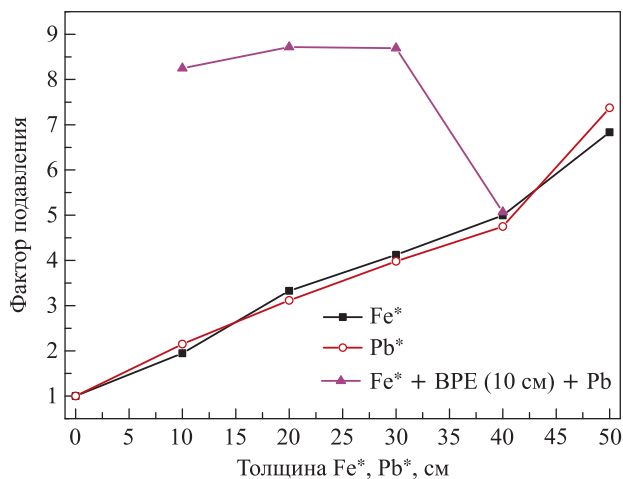


Рис. 6. Измеренные зависимости фактора подавления  $f$  загрузки детектора BGO от толщины тормозных фильтров из железа, свинца и борированного полиэтилена в пределах от 0 до 50 см. Приведена также зависимость фактора подавления для составного фильтра Fe\* + BPE(10 см) + Pb от толщины слоя железа при полной толщине составного фильтра 50 см (\* обозначает толщину фильтра, отложенную по оси абсцисс)

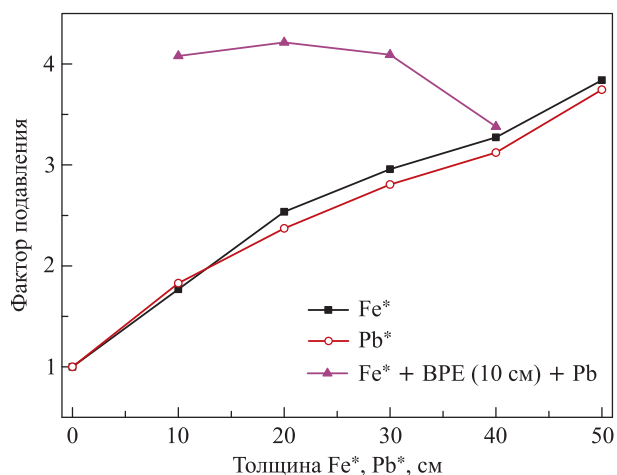


Рис. 7. Измеренные зависимости фактора подавления  $f$  загрузки детектора NaI от толщины тормозных фильтров из железа, свинца и борированного полиэтилена в пределах от 0 до 50 см. Приведена также зависимость фактора подавления для составного фильтра Fe\* + BPE(10 см) + Pb от толщины слоя железа при полной толщине составного фильтра 50 см (\* обозначает толщину фильтра, отложенную по оси абсцисс)

Следует отметить, что согласно рис.8 фактор подавления суммарной загрузки детектора DST при использовании фильтров из Pb и Fe существенно превышает соответствующие величины, измеренные с фильтром из BPE при вариации толщины его в интервале 0–50 см.

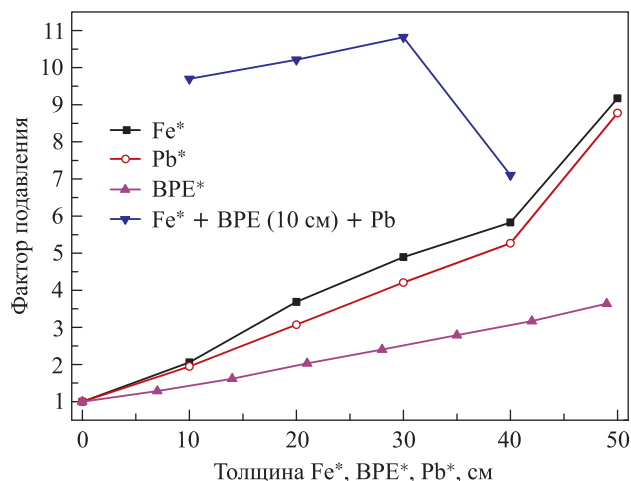


Рис. 8. Зависимости фактора подавления суммарной загрузки детектора DST от толщины варьируемого слоя железа, борированного полиэтилена и свинца в пределах от нуля до 50 см, а также зависимость фактора подавления при использовании составного фильтра  $Fe^* + BPE(10\text{ см}) + Pb$ , полная толщина которого 50 см (\* обозначает слой вещества, толщина которого отложена по оси абсцисс)

Выбор указанной выше комбинации трехкомпонентной защиты ( $Fe^* + BPE(10\text{ см}) + Pb$ ) продиктован результатами измерений фактора подавления загрузки детекторов BGO, NaI и DST, полученными при исследовании двухкомпонентных фильтров  $Fe^* + Pb$  и  $Pb^* + Fe$  (суммарная толщина двухкомпонентного фильтра равна 50 см; \* указывает слой вещества, толщина которого варьируется от 0 до 50 см и который расположен первым по счету от источника нейтронов вдоль направления их испускания).

На рис. 9 в качестве примера приведены амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором NaI, а на рис. 10 — зависимости фактора подавления загрузки данного детектора от толщины варьируемого слоя защиты в случае использования двухкомпонентных фильтров  $Fe^* + Pb$  и  $Pb^* + Fe$ .

Как видно из рис. 9 и 10, практически отсутствует различие (в среднем не более 10%) как по форме амплитудных спектров, так и по соответствующим значениям фактора подавления загрузки детектора NaI между двумя вариантами использования двухкомпонентных фильтров:  $Fe^* + Pb$  и  $Pb^* + Fe$ . Данный результат явился обоснованием выбора оптимальной толщины варьируемого слоя железа при следующей комбинации трехкомпонентной пассивной защиты:  $Fe^* + BPE(10\text{ см}) + Pb$ .

В дальнейшем будут обсуждаться два варианта практически эквивалентной комбинированной защиты в конфигурациях  $Fe(20\text{ см}) + BPE(10\text{ см}) + Pb(20\text{ см})$  и  $Fe(30\text{ см}) + BPE(10\text{ см}) + Pb(10\text{ см})$ .

На рис. 11 в качестве примера для детектора BGO приведены зависимости фактора подавления его загрузки от порога регистрации излучения данным детектором в случае использования фильтров из железа и свинца толщиной 50 см, а также комбинированных фильтров  $Fe(20\text{ см}) + BPE(10\text{ см}) + Pb(20\text{ см})$  и  $Fe(30\text{ см}) + BPE(10\text{ см}) + Pb(10\text{ см})$ .



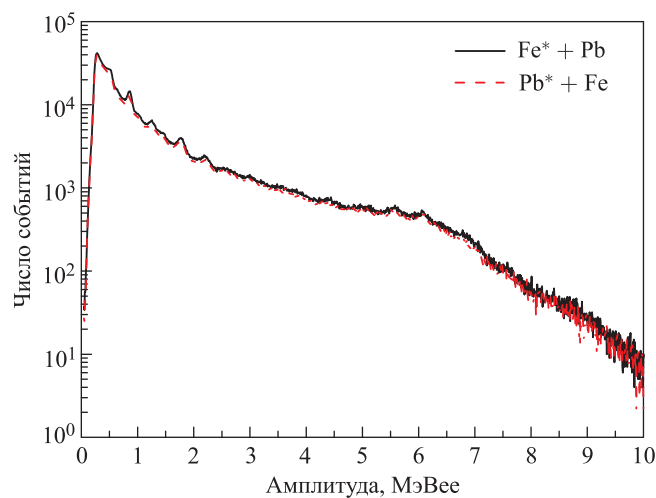


Рис. 9. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных NaI-детектором, при полных толщинах составных фильтров Fe\* + Pb и Pb\* + Fe, равных 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, эквивалентном энергии гамма-квантов, равной 0,25 МэВee

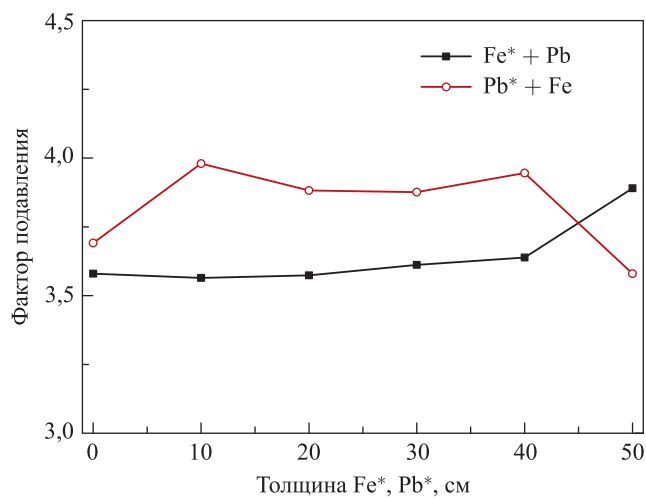


Рис. 10. Измеренные для NaI-детектора зависимости фактора подавления загрузки от толщины варьируемого слоя вещества составных фильтров Fe\* + Pb и Pb\* + Fe, полная толщина каждого из которых 50 см (по оси абсцисс отложена толщина фильтра из железа или свинца)

Как видно из рис. 11, фактор подавления загрузки детектора BGO при использовании комбинированного фильтра Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) либо Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) варьируется от 8,7 до 13,2 в диапазоне изменения порога регистрации событий от 0,25 до 3,0 МэВee. Следует отметить, что при этом отношение фактора подавления загрузки детектора BGO в случае использования указанного ком-

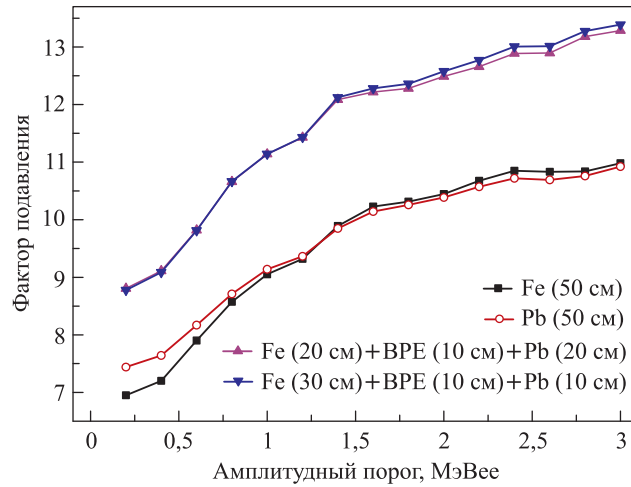


Рис. 11. Зависимости фактора подавления загрузки детектора BGO от энергетического порога регистрации событий данным детектором, измеренные для фильтров из железа и свинца толщиной 50 см, а также для комбинаций пассивной защиты: Fe (20 см) + BPE (10 см) + Pb (20 см) и Fe (30 см) + BPE (10 см) + Pb (10 см)

бинированного фильтра и однородных фильтров такой же толщины из железа либо свинца практически не изменяется в зависимости от величины порога и составляет примерно 1,25.

На рис. 12 в качестве примера для детектора NaI приведены зависимости фактора подавления загрузки данного детектора от порога регистрации событий при использова-

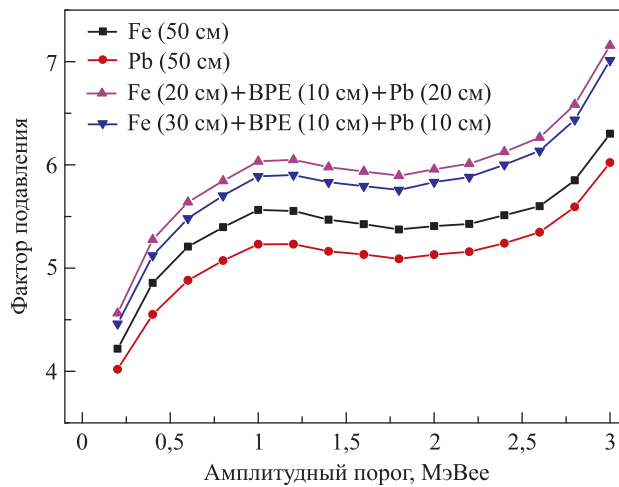


Рис. 12. Зависимости фактора подавления загрузки NaI-детектора от энергетического порога регистрации, измеренные с использованием фильтров из железа и свинца толщиной 50 см, а также комбинированных фильтров: Fe (20 см) + BPE (10 см) + Pb (20 см) и Fe (30 см) + BPE (10 см) + Pb (10 см)

нии фильтров из железа и свинца толщиной 50 см, а также комбинированных фильтров Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) и Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см).

Как видно из рис. 12, фактор подавления загрузки NaI-детектора в диапазоне изменения порога регистрации от 0,25 до 3,0 МэВee в случае использования фильтра Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) либо Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) увеличивается на 10 % по сравнению с аналогичной величиной, измеренной с фильтрами из Fe и Pb толщиной 50 см. Следует отметить, что при этом отношение факторов подавления загрузки в случае использования указанных комбинированных фильтров и однородных фильтров из Fe или Pb толщиной 50 см практически не изменяется и составляет примерно 1,1.

На рис. 13 в качестве примера для детектора DST приведены зависимости фактора подавления суммарной загрузки данного детектора от порога регистрации при использовании фильтров из Fe и Pb толщиной 50 см и комбинированных фильтров Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) и Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см).

Так как измеренные распределения зарегистрированных событий представляют собой суперпозицию распределений, обусловленных регистрацией нейтронов, прошедших через тормозной фильтр и попавших в детектор, и гамма-квантов, образовавшихся в результате взаимодействия нейтронов с веществом тормозного фильтра, было бы интересным получить экспериментальную информацию о вкладах каждого из этих двух распределений в суммарный спектр. К сожалению, при использовании детекторов ВГО и NaI такая возможность отсутствует из-за незнания как энергетических спектров нейтронов и гамма-квантов, прошедших через тормозной фильтр и попавших в детектор, так и эффективностей их регистрации. Кроме того, данные детекторы с кристаллами ВГО и NaI(Tl) не обладают свойством, позволяющим дискриминировать загрузку их нейтронным и гамма-излучением (отсутствие возможности использования схемы  $(n-\gamma)$ -разделения).

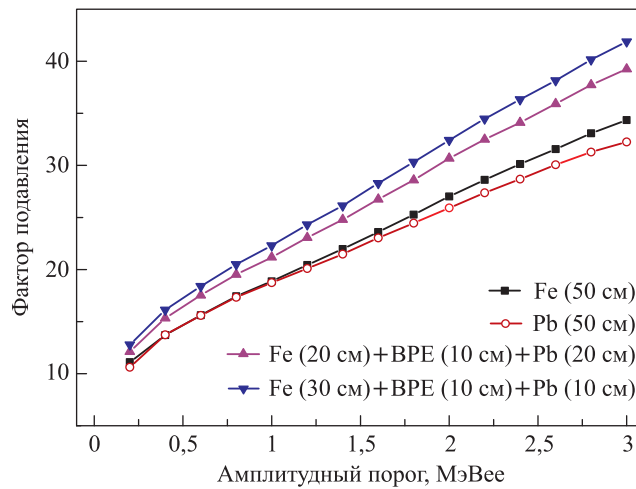


Рис. 13. Зависимости фактора подавления загрузки детектора DST от энергетического порога регистрации событий, измеренные с использованием защиты из Fe и Pb толщиной 50 см и комбинированной пассивной защиты: Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см); Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см)

С учетом возможности применения  $(n-\gamma)$ -разделения при использовании детекторов DST нами для различных тормозных фильтров из Fe, Pb, а также для комбинированных фильтров Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) и Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) выполнены измерения: амплитудных распределений событий, зарегистрированных данным детектором и соответствующих нейтронной и гамма-компонентам на двумерном  $(n-\gamma)$ -распределении; зависимостей факторов подавления загрузки детектора DST, обусловленной остаточным нейтронным излучением и гамма-излучением, возникшим при прохождении нейтронов с энергией 14,1 МэВ через тормозной фильтр определенной толщины и состава. На рис. 14 в качестве примера приведено двумерное  $(n-\gamma)$ -распределение, измеренное с тормозным фильтром из Fe толщиной 50 см. Как видно из рисунка, с помощью детектора DST возможна корректная количественная оценка загрузки, обусловленной нейтронной и гамма-компонентами.

На рис. 15 и 16 представлены амплитудные спектры событий, зарегистрированных DST-детектором, соответствующие загрузке его нейтронной компонентой после прохождения потока нейтронов с энергией 14,1 МэВ через тормозные фильтры из железа и свинца. Приведенные распределения соответствуют порогу регистрации нейтронной компоненты, равному 0,25 МэВее.

На рис. 17 приведены амплитудные спектры событий, соответствующие загрузке детектора DST нейтронной компонентой после прохождения потока нейтронов с энергией 14,1 МэВ через комбинированный фильтр Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) (порог регистрации равен 0,25 МэВее). На этом же рисунке для сравнения приведено измеренное амплитудное распределение событий, зарегистрированных DST-детектором, соответствующее нейтронной ветке на двумерном  $(n-\gamma)$ -распределении и полученное при толщине

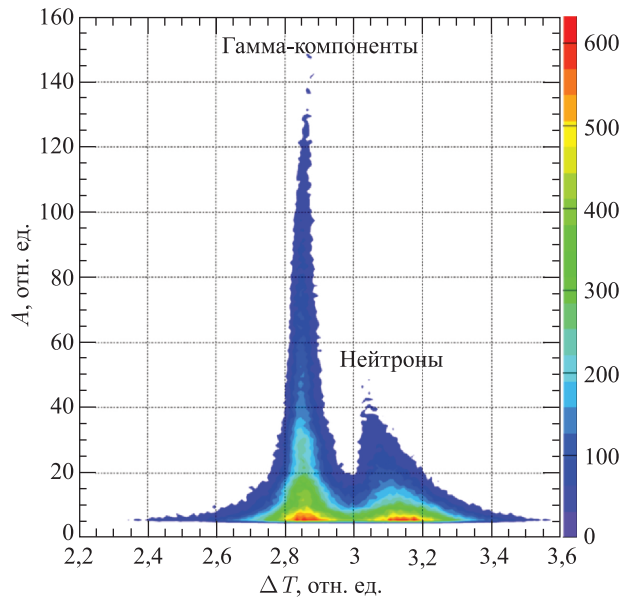


Рис. 14. Двумерное  $(n-\gamma)$ -распределение, измеренное с помощью детектора DST с тормозным фильтром из Fe толщиной 50 см: по оси абсцисс — ширина импульса с детектора, по оси ординат — амплитуда импульса

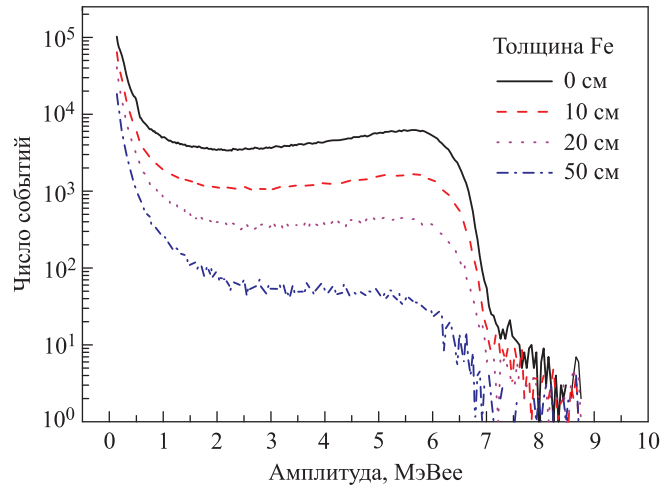


Рис. 15. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором DST, соответствующие нейтронной компоненте на двумерном  $(n-\gamma)$ -распределении при толщинах тормозного фильтра из железа от 0 до 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, равном 0,25 МэВee

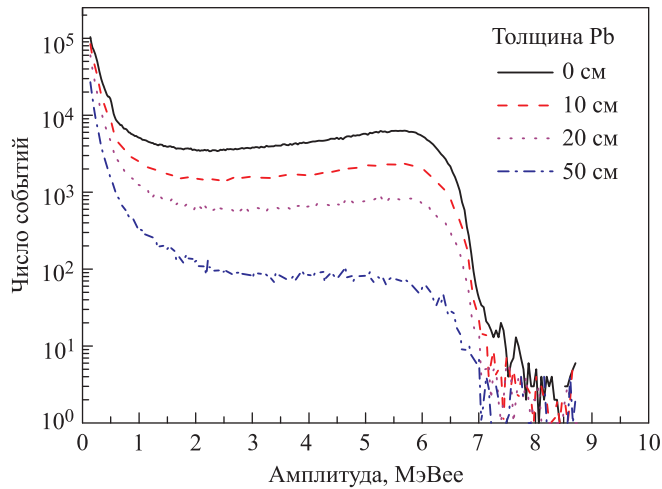


Рис. 16. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором DST, соответствующие нейтронной компоненте на двумерном  $(n-\gamma)$ -распределении при толщинах тормозного фильтра из свинца от 0 до 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, равном 0,25 МэВee

фильтра из железа, равной 50 см. Как следует из рис. 15–17, наилучшее подавление нейтронной компоненты для DST-детектора по сравнению со всеми другими комбинациями фильтров, описанными выше, наблюдается в случае использования тормозного фильтра из железа толщиной 50 см.

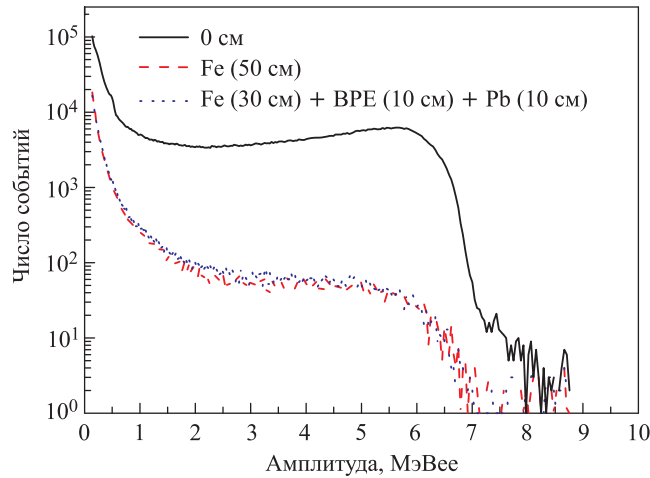


Рис. 17. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором DST, соответствующие нейтронной компоненте на двумерном ( $n-\gamma$ )-распределении при комбинациях пассивной защиты Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) и Fe (50 см). Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, равном 0,25 МэВee

Данный пример (рис. 17) представлен нами в связи с тем, что выбранный трехкомпонентный комбинированный фильтр Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см), соответствующий наибольшей величине фактора подавления суммарной загрузки для всех трех типов детекторов (DST, NaI, BGO), не является оптимальным в случае необходимости максимально возможного подавления нейтронной компоненты для DST-детектора. Для ре-

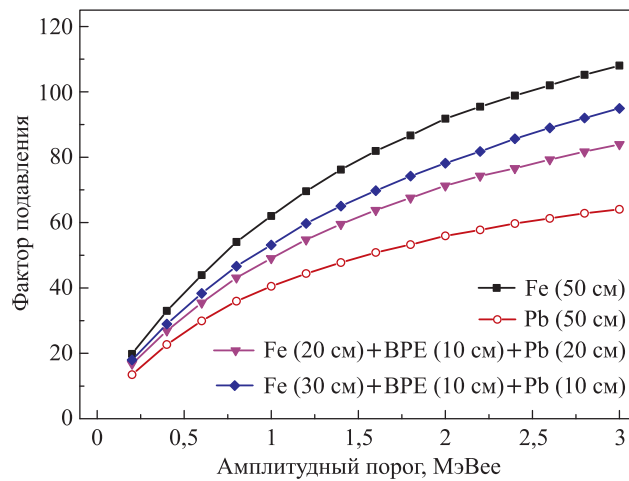


Рис. 18. Зависимость фактора подавления загрузки детектора DST нейтронной компонентой от энергетического порога регистрации событий при использовании пассивной защиты из железа и свинца толщиной 50 см, а также комбинированной защиты: Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см); Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см)

ализации последнего необходимо использовать тормозной фильтр из железа толщиной 50 см. Данное утверждение четко проявляется при построении зависимости фактора подавления нейтронной загрузки DST-детектора от порога регистрации событий данным детектором (рис. 18).

Как видно из рис. 18, использование тормозного фильтра из Fe при работе с детектором DST позволяет по сравнению со всеми другими комбинациями фильтров, опи-

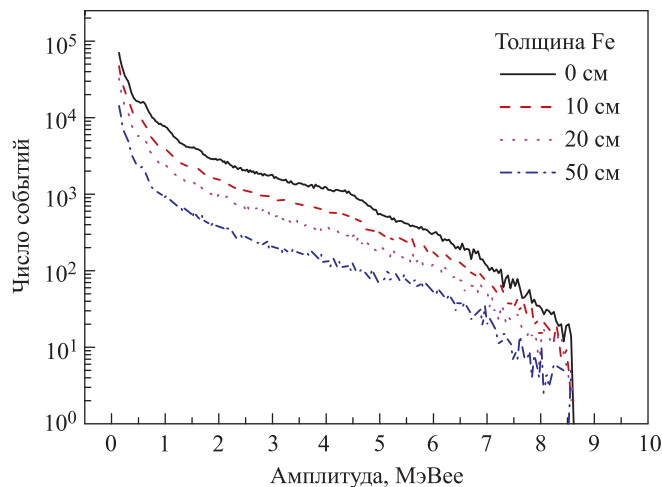


Рис. 19. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором DST, соответствующие гамма-компоненте на двумерном  $(n-\gamma)$ -распределении при толщинах тормозного фильтра из Fe от 0 до 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, равном 0,25 МэВee

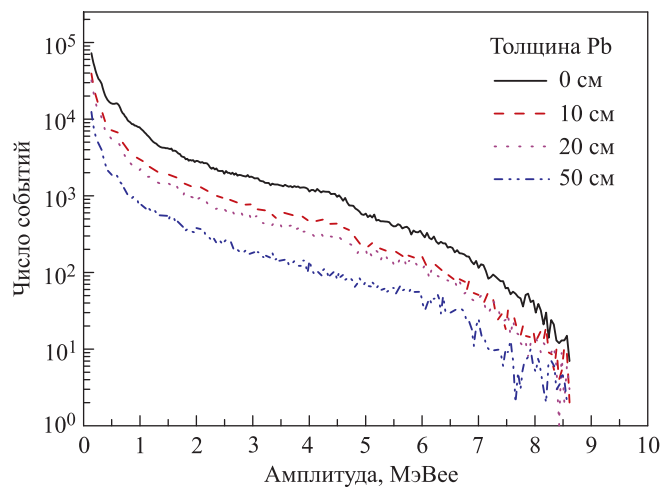


Рис. 20. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором DST, соответствующие гамма-компоненте на двумерном  $(n-\gamma)$ -распределении при толщинах тормозного фильтра из свинца от 0 до 50 см. Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, равном 0,25 МэВee

санными выше, получить при всех значениях порога регистрации событий в интервале 0,25–3,0 МэВee максимальное подавление нейтронной загрузки. Следует отметить, что при всех значениях порога регистрации событий DST-детектором фактор подавления нейтронной компоненты намного выше соответствующей величины при использовании фильтра из свинца: например, при пороге регистрации 3,0 МэВee отношение факторов подавления загрузки при использовании фильтров из Fe и Pb составляет 1,7.

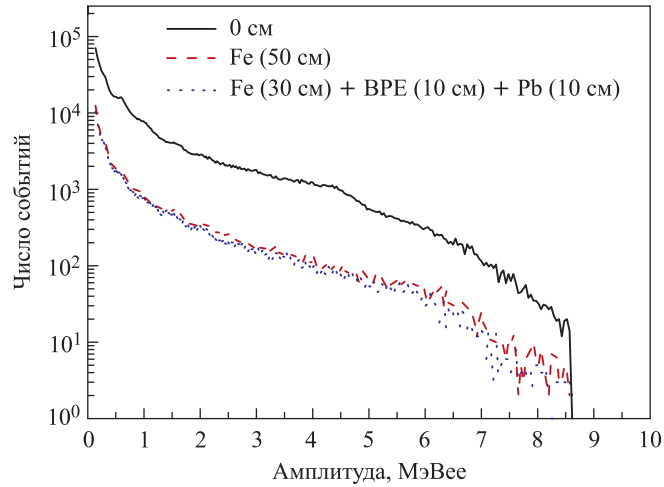


Рис. 21. Амплитудные распределения событий, зарегистрированных детектором DST, соответствующие гамма-компоненте на двумерном ( $n-\gamma$ )-распределении при комбинациях пассивной защиты: Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) и Pb (50 см). Распределения измерены при амплитудном пороге в канале регистрации событий, равном 0,25 МэВee

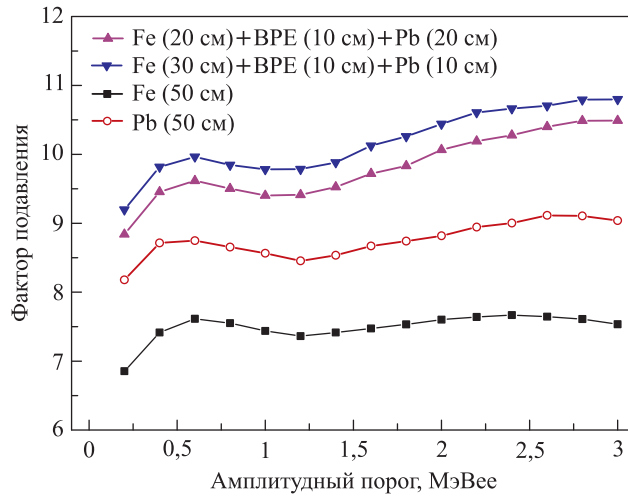


Рис. 22. Зависимости фактора подавления гамма-загрузки детектора DST от энергетического порога регистрации событий для защиты из Fe и Pb толщиной 50 см, а также для комбинаций пассивной защиты: Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см); Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см)



Экспозиции по измерению фактора подавления  $f$  загрузки детекторов BGO, NaI и DST при использовании тормозных фильтров из железа, свинца и борированного полиэтилена, а также комбинированных фильтров из указанных веществ. Приведенные значения фактора подавления загрузки детекторов соответствуют порогу регистрации событий указанными детекторами, равному 0,25 МэВс. Ошибки измерения приведенных значений фактора подавления загрузки для детекторов BGO, NaI и DST в таблице не указаны ввиду их малости — для каждого значения фактора  $f$  суммарная ошибка с учетом систематической ошибки не превышает 1 %

Фильтр		Детектор				
Состав	Толщина, см	NaI (суммарный спектр)	BGO (суммарный спектр)	DST		
				Суммарный спектр	Гамма-компонента	Нейтронная компонента
Fe (железо)	0	1	1	1	1	1
	10	1,77	1,95	2,06	1,71	2,41
	20	2,54	3,33	3,69	2,70	5
	30	2,96	4,13	4,89	3,33	7,39
	40	3,27	4,99	5,83	3,89	9,16
	50	3,84	6,83	9,17	6,44	13,98
Pb (свинец)	0	1	1	1	1	1
	10	1,83	2,15	1,95	2,20	1,81
	20	2,37	3,12	3,07	2,84	3,26
	30	2,81	3,98	4,21	3,38	5,08
	40	3,12	4,75	5,27	3,99	6,81
	50	3,74	7,37	8,78	7,77	9,64
BPE (борированный полиэтилен)	0	—	—	1	1	1
	7	—	—	1,29	1,17	1,39
	14	—	—	1,62	1,32	1,94
	21	—	—	2,03	1,51	2,71
	28	—	—	2,40	1,66	3,56
	35	—	—	2,79	1,82	4,56
	42	—	—	3,17	1,98	5,65
49	—	—	3,64	2,13	7,51	
Fe* + Pb	0 + 50	3,58	—	7,82	6,50	9,33
	10 + 40	3,56	—	7,39	5,26	10,54
	20 + 30	3,57	—	7,85	5,55	11,35
	30 + 20	3,61	—	8,07	5,64	11,86
	40 + 10	3,64	—	8,19	5,76	12,24
	50 + 0	3,89	—	8,48	5,83	12,82
Pb* + Fe	0 + 50	3,69	—	8,25	5,53	13,16
	10 + 40	3,98	—	9,32	7,27	12,20
	20 + 30	3,88	—	9,02	7,00	11,54
	30 + 20	3,88	—	8,54	6,75	10,96
	40 + 10	3,95	—	8,38	6,71	10,45
	50 + 0	3,58	—	7,82	6,50	9,33
Fe* + BPE + Pb	10 + 10 + 30	4,08	8,25	9,70	8,12	11,84
	20 + 10 + 20	4,21	8,72	10,21	8,39	12,71
	30 + 10 + 10	4,09	8,69	10,82	8,76	13,67
	40 + 10 + 0	3,38	5,07	7,10	4,51	13,02

На рис. 19 и 20 в качестве примера представлены амплитудные спектры событий, зарегистрированных DST-детектором, соответствующие загрузке гамма-компонентой после прохождения потока нейтронов с энергией 14,1 МэВ через тормозные фильтры из железа и свинца. Приведенные распределения соответствуют порогу регистрации гамма-компоненты, равному 0,25 МэВее.

На рис. 21 приведены амплитудные спектры событий, соответствующие гамма-загрузке детектора DST, возникающей при прохождении потока нейтронов с энергией 14,1 МэВее через комбинированный фильтр Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) (порог регистрации равен 0,25 МэВее). На этом же рисунке для сравнения представлены амплитудные распределения событий, соответствующие гамма-компоненте на двумерном ( $n-\gamma$ )-распределении, измеренные при толщине фильтра из Pb, равной 50 см. Видно, что наибольшее подавление гамма-компоненты для DST-детектора по сравнению со всеми другими комбинациями фильтров, описанными выше, наблюдается в случае использования трехкомпонентного тормозного фильтра Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см). Данное утверждение четко проявляется при построении зависимостей фактора подавления гамма-загрузки DST-детектора от порога регистрации событий данным детектором (рис. 22).

Как видно из рис. 22, использование трехкомпонентного фильтра Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) при работе с детектором DST позволяет по сравнению со всеми другими комбинациями фильтров, описанными выше, получить при всех значениях порога регистрации событий максимальное подавление гамма-загрузки. Следует отметить, что при всех значениях порога регистрации событий DST-детектором в интервале от 0,25 до 3,0 МэВее фактор подавления гамма-компоненты с использованием фильтра из Pb больше в 1,2 раза соответствующей величины для фильтра из Fe, а фактор подавления при использовании комбинированного фильтра Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см), в свою очередь, в 1,2 раза больше соответствующей величины для фильтра из Pb.

В таблице для детекторов BGO, NaI и DST приведено описание всех измерений, которые были выполнены с разнообразными по составу тормозными фильтрами, а также отражены соответствующие результаты по измерению фактора подавления загрузки указанных детекторов.

### 3. ВЫВОДЫ

В настоящей работе рассмотрены вопросы, связанные с выбором оптимального варианта защиты детекторов на основе кристаллов BGO, NaI(Tl) и стильбена (DST) от прямого попадания в них нейтронного излучения с энергией 14,1 МэВ, испущенного изотропно источником в телесный угол  $4\pi$ .

Приведены возможности использования различных защитных фильтров указанных детекторов, состоящих из слоев железа, свинца и борированного полиэтилена с суммарной толщиной, не превышающей 50 см, от попадания в них нейтронов.

Найдено, что использование трехслойных фильтров из железа, борированного полиэтилена и свинца в комбинациях Fe (20 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (20 см) либо Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см) в направлении нейтронного потока, падающего на детекторы BGO и NaI, позволяет достичь максимальных значений фактора подавления загрузки данных детекторов, обусловленной регистрацией нейтронов и гамма-квантов, возникающих в результате взаимодействия нейтронов с веществом фильтра. В случае же использования

детекторов на основе кристаллов стиблена оптимальным защитным фильтром для подавления нейтронной компоненты загрузки является фильтр из железа, а для подавления гамма-компоненты — комбинированный трехслойный фильтр Fe (30 см) + ВРЕ (10 см) + Pb (10 см).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kopatch Yu. N.* Development of the Tagged Neutron Method for Elemental Analysis and Nuclear Reaction Studies (Project TANGRA) // 22nd Intern. Seminar on Interaction of Neutrons with Nuclei: Neutron Spectroscopy, Nuclear Structure, Related Topics (ISINN-22). Dubna, 2014; [http://isinn.jinr.ru/past-isinns/isinn-22/progr-28\\_05\\_2014/Kopatch.pdf](http://isinn.jinr.ru/past-isinns/isinn-22/progr-28_05_2014/Kopatch.pdf).
2. *Sun Xiao-Jun et al.* Analysis of Neutron Double-Differential Cross Sections for  $n + {}^{12}\text{C}$  Reaction below 30 MeV // *Commun. Theor. Phys.* 2007. V. 48. P. 534–540; <http://iopscience.iop.org/0253-6102/48/3/029>.
3. Нейтронный генератор на газонаполненной нейтронной трубке ИНГ-27. <http://www.vniia.ru/ng/element.html>.
4. *Быстрицкий В. М. и др.* Гамма-детекторы в установках по обнаружению взрывчатых и наркотических веществ // *Письма в ЭЧАЯ.* 2013. Т. 10, № 6(183). С. 925–935; <http://ntech.jinr.ru/img/papers/2012/Krasnoperov.pdf>.
5. Amcryst ®. Scintillation Materials, Detectors and Electronics. <http://www.amcryst.com/products/>.
6. AFI-ADCM, A Digital Pulse Processing System for Nuclear Physics Experiments ADCM16-LTC, AFI-Electronics: <http://afi.jinr.ru/ADCM>, <http://afi.jinr.ru/ADCM16-LTC>.
7. *Hansen W., Richter D.* Determination of Light Output Function and Angle Dependent Correction for a Stilbene Crystal Scintillation Neutron Spectrometer // *Nucl. Instr. Meth. A.* 2002. V. 476. No. 1–2. P. 195–199; <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0168900201014309>.

Получено 21 октября 2014 г.