

ОБЩАЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ
ТЕХНИКА

УДК 537.53+539.1.03+539.1.07

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ ЭНЕРГИИ ИЗЛУЧЕНИЯ
ИМПУЛЬСНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА

© 2019 г. Р. Р. Ахметшин^{a,b}, Е. А. Бабичев^a, Д. Н. Григорьев^{a,b,c}, В. Р. Groшев^{a,b},
В. Ф. Казанин^{a,b}, А. А. Комарский^d, С. Р. Корженевский^d, А. С. Ромахин^e, С. И. Середняков^{a,b,*},
Г. В. Ставрицкий^e, А. А. Тальшев^{a,b}, А. В. Тимофеев^a, Д. А. Штоль^{a,b}, А. С. Чепусов^d

^a Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН
Россия, 630090, Новосибирск, просп. Академика Лаврентьева, 11

^b Новосибирский государственный университет
Россия, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2

^c Новосибирский государственный технический университет
Россия, 630073, Новосибирск, просп. Карла Маркса, 20

^d Институт электрофизики УрО РАН
Россия, 620016, Екатеринбург, ул. Амундсена, 106

^e РФЯЦ–ВНИИ технической физики имени академика Е.И. Забабахина
Россия, 456770, Снежинск Челябинской обл., ул. Васильева, 13

*e-mail: S.I.Serednyakov@inp.nsk.su

Поступила в редакцию 09.06.2018 г.

После доработки 09.06.2018 г.

Принята к публикации 31.07.2018 г.

Представлен метод измерения плотности энергии излучения импульсного рентгеновского источника с длительностью порядка 200 нс и энергией в разрядной цепи 2–3 Дж. Для измерения используется сцинтилляционный кристалл германата висмута (BGO). Абсолютная калибровка энергетической шкалы проведена путем измерения амплитудного спектра от космических мюонов. Измеренный поток энергии излучения рентгеновского источника за импульс составил 20 ГэВ/см² на расстоянии 1 м от анода источника.

DOI: 10.1134/S0032816219020010

1. ВВЕДЕНИЕ

Импульсные рентгеновские источники служат одним из инструментов при изучении быстропротекающих процессов. Во многих случаях требуются измерения плотности энергии излучения за импульс, однако для импульсных источников невозможно использовать стандартные дозиметры из-за их насыщения. В нашем случае необходимо измерить энергию в импульсе от рентгеновского источника мощностью порядка 2–3 Дж за импульс. Длительность разрядного импульса составляет около 200 нс. Для измерения энергетического выхода рентгеновского источника было предложено использовать сцинтиллятор германата висмута (BGO), который обладает хорошей эффективностью регистрации фотонов и в то же время широко используется для регистрации заряженных частиц. Поэтому при измерениях сигнала от рентгеновского источника абсолютная калибровка энергетической шкалы проводилась путем измерения амплитудного спектра от космических мюонов.

2. ИМПУЛЬСНЫЙ РЕНТГЕНОВСКИЙ ИСТОЧНИК

В данной работе был использован импульсный рентгеновский источник [1, 2], состоящий из генератора высоковольтных импульсов с откачиваемой импульсной рентгеновской трубкой и блока управления установкой. Блок управления служит для задания режима работы рентгеновского источника, через него осуществляется подключение к питающей цепи и подача напряжения для генератора высоковольтных импульсов.

Генератор высоковольтных импульсов представляет собой магнитный генератор импульсов, содержащий первичный накопитель энергии, коммутатор первичного накопителя, три последовательно соединенных магнитных звена сжатия, окончательный индуктивный накопитель и твердотельный полупроводниковый прерыватель тока SOS. Каждое магнитное звено содержит дроссель (трансформатор) на тороидальном сердечнике и конденсатор. На выходе генератора формируется импульс напряжения амплитудой 300 кВ и дли-

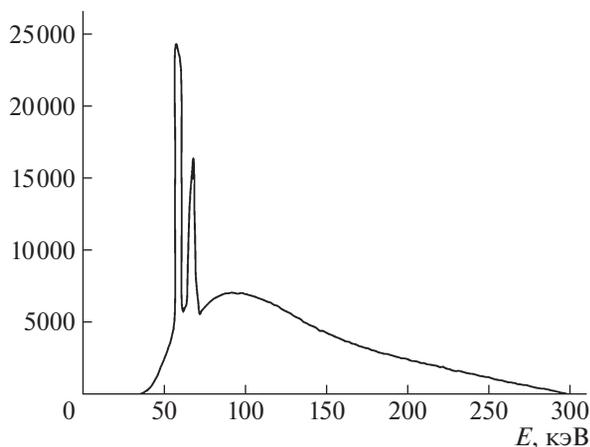


Рис. 1. Энергетический спектр излучения рентгеновской установки при напряжении на аноде $U_a = 300$ кВ с дополнительным фильтром, состоящим из 1 мм Cu и 1 мм Al. Спектр дан в относительных единицах — число фотонов на интервал 1 кэВ.

тельностью 200 нс. Накопленная энергия в конденсаторе последнего звена составляет 2.5 Дж.

Импульсная рентгеновская трубка работает на принципе взрывной электронной эмиссии и представляет собой коаксиальную двухэлектродную систему: конический анод, выполненный из вольфрамового прутка $\varnothing 6$ мм, и лезвийный катод из тантала. Необходимый вакуум не хуже $5 \cdot 10^{-5}$ Торр обеспечивается с помощью турбонасосной установки NiCube 80 Eco.

3. СТЕНД ДЛЯ КАЛИБРОВКИ ИМПУЛЬСНОЙ РЕНТГЕНОВСКОЙ ТРУБКИ

Выбор метода измерения энерговыделения импульсного рентгеновского источника зависит от величины потока и формы энергетического спектра рентгеновских фотонов. Исходные данные для расчетов были взяты из работ [3, 4]. Энергетический спектр, приведенный на рис. 1, был получен в работе [3] для рентгеновского источника с вольфрамовым анодом при анодном напряжении $U_a = 300$ кВ и с дополнительным фильтром, состоящим из 1 мм Cu и 1 мм Al.

Абсолютная нормировка спектра была сделана с использованием данных дозиметрических измерений из справочника [4]. Для рентгеновского источника непрерывного действия при анодном напряжении $U_a = 300$ кВ и анодном токе 1 мА с медным (Cu) фильтром толщиной 1 мм на расстоянии 1 м от анода мощность экспозиционной дозы равна 115 Р/ч. Мы приняли, что при одинаковом анодном напряжении и одинаковой энергии в анодной цепи рентгеновских источников непрерывного действия и импульсного потока энергии будет одинаков.

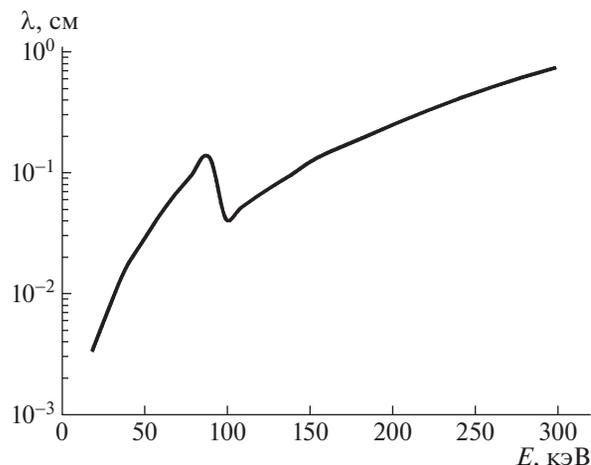


Рис. 2. Длина поглощения рентгеновских фотонов в BGO в зависимости от их энергии.

Для измерения энергии, излучаемой рентгеновским источником, подходит сцинтилляционный счетчик с кристаллом, хорошо поглощающим рентгеновские фотоны в широком диапазоне энергий. В качестве сцинтиллятора был выбран кристалл германата висмута BGO. Это один из наиболее плотных сцинтилляционных кристаллов. Его световыход составляет около 6000 фотонов/МэВ, время излучения ~ 300 нс, плотность 7.13 г/см³ [5]. Основной вклад в поглощение рентгеновских фотонов с энергией в диапазоне 50–200 кэВ в BGO вносит фотоэффект, вклад комптон-эффекта и рэлеевского рассеяния при энергии фотонов 100 кэВ мал по сравнению с фотоэффектом.

Длина поглощения фотонов в BGO в зависимости от их энергии приведена на рис. 2. Из графика видно, что даже фотоны с максимальной энергией, равной 300 кэВ ($\lambda = 7$ мм), полностью поглощаются в кристалле толщиной несколько сантиметров.

Энергетический спектр излучения рентгеновской установки (рис. 1) содержит значительную долю фотонов с низкой энергией, для которых длина поглощения в сцинтилляторе BGO мала. Это приводит к тому, что их поглощение происходит практически на входной поверхности кристалла. В этом случае нарушается линейная зависимость амплитуды сигнала детектора от энергии фотона. В работе [6] было показано, что для фотонов с энергией, превышающей 60 кэВ, сигнал с детектора линейно зависит от энергии. Для подавления вклада низкоэнергетической части спектра с энергией фотонов < 60 кэВ мы добавили фильтр из олова толщиной 1 мм. Спектр фотонов с такой фильтрацией показан на рис. 3. Видно, что фильтра из олова (Sn) толщиной 1 мм доста-

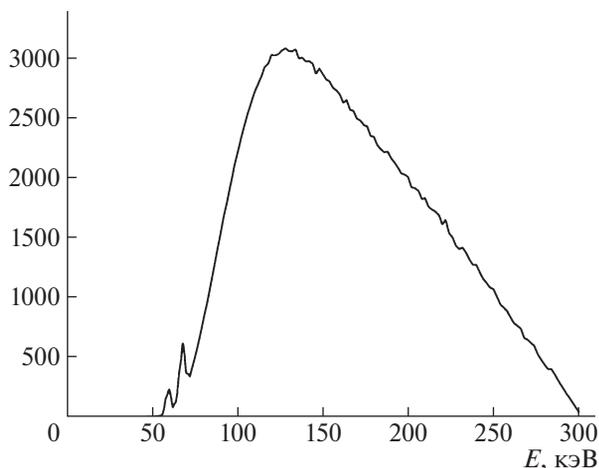


Рис. 3. Спектр излучения при напряжении на аноде $U_a = 300$ кВ с фильтром, состоящим из 1 мм Cu, 1 мм Al и 1 мм Sn. Спектр дан в относительных единицах – число фотонов на 1 кэВ.

точно для поглощения фотонов с энергией, меньшей 60 кэВ.

Расчет плотности энергии излучения на расстоянии 1 м от анода для нашего источника с учетом используемых фильтров дал величину порядка 10 ГэВ/см² за один импульс.

Для измерения потока энергии от рентгеновского источника необходима калибровка энергетической шкалы счетчика. Монохроматические источники γ -квантов имеют энергию порядка 1 МэВ, которая сильно отличается от энерговыделения рентгеновского источника, поэтому для калибровки не годятся. Космические частицы в материале сцинтиллятора (ВГО) на длине 30 мм за счет ионизационных потерь выделяют энергию

~30 МэВ. В распределении этих потерь имеется четкий пик, среднее значение которого можно измерить с хорошей точностью.

Схема измерительного стенда представлена на рис. 4. Установка содержит два сцинтилляционных счетчика с кристаллами ВГО размерами 3 × 3 × 3.5 см. Свет от сцинтилляционной вспышки с помощью световода длиной 10 см передается на фотокатод фотоумножителя ФЭУ-143. Рабочее напряжение на ф.э.у. подбиралось таким образом, чтобы его коэффициент усиления при регистрации сигналов от рентгеновского источника был максимален, но при этом оставался в линейном диапазоне. Значение рабочего напряжения на ф.э.у. составляло 1050 В. При таком напряжении его коэффициент усиления линейен до величины анодного тока 20 мА.

Сигнал с ф.э.у. подавался на анализатор импульсов DT5796 фирмы Каеп. Так как средняя энергия, выделяющаяся из-за ионизационных потерь космическими мюонами в нашем кристалле, составляет ~30 МэВ и существенно меньше, чем от рентгеновского источника, то при измерении сигналов от космических частиц был дополнительно использован линейный усилитель с коэффициентом усиления $k = 100$.

Перед набором амплитудных спектров для контроля правильной работы аппаратуры сигналы от рентгеновского источника и космических частиц наблюдались на экране осциллографа. Накопленные в анализаторе амплитудные спектры сохранялись в памяти компьютера ПК и использовались для дальнейшей обработки.

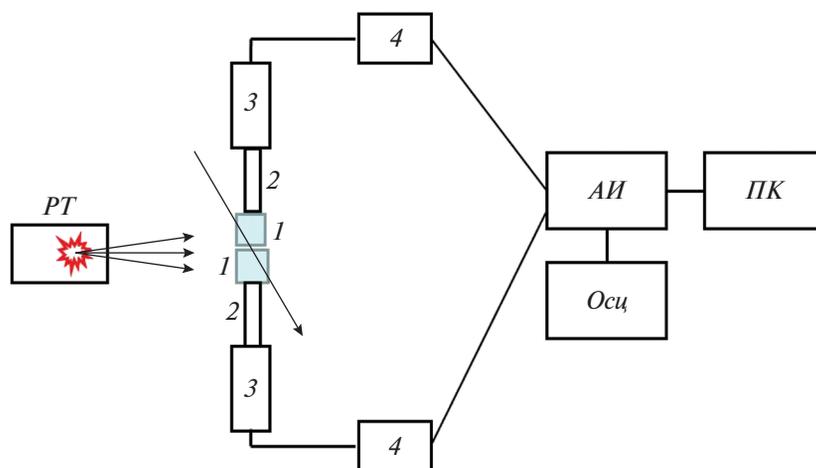


Рис. 4. Схема стенда для измерений. РТ – импульсный рентгеновский источник; 1 – сцинтилляционные счетчики с кристаллами ВГО; 2 – световоды; 3 – ФЭУ-143; 4 – линейные усилители; Осц – осциллограф; АИ – анализатор импульсов; ПК – компьютер.

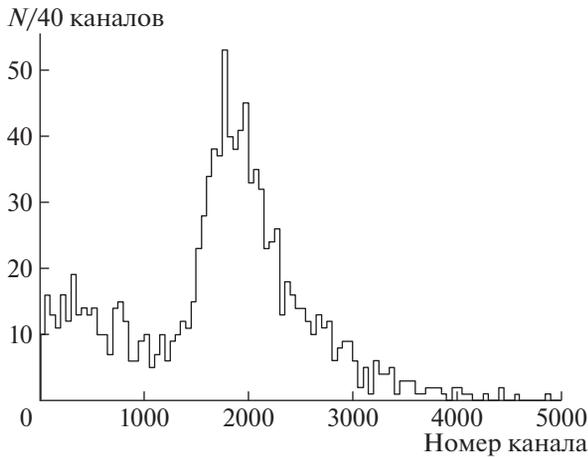


Рис. 5. Спектр энергетических потерь космических мюонов в счетчике ВГО. N – число зарегистрированных событий.

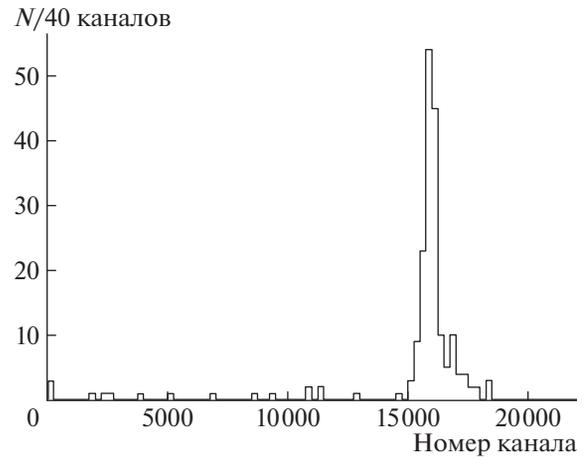


Рис. 6. Амплитудный спектр сигналов от рентгеновского источника в каналах анализатора. N – число зарегистрированных событий.

4. КАЛИБРОВКА ЭНЕРГИИ РЕНТГЕНОВСКОГО ИСТОЧНИКА

Сцинтилляционные счетчики, как показано на рис. 4, располагаются друг над другом, поэтому большая доля космических мюонов проходит сразу через оба кристалла ВГО. Скорость счета совпадений составляет около 0.1 с^{-1} . Измеренный амплитудный спектр в сцинтилляционных счетчиках от космических частиц приведен на рис. 5.

Значение энергии в максимуме спектра для космических частиц было получено из моделирования. Для моделирования энерговыделения в счетчике от космических частиц использовалась функция углового и энергетического распределения для потока мюонов на уровне моря [7]. В модели были описаны два кристалла ВГО в форме параллелепипедов с размерами, соответствующими реальным. Начальные частицы генерировались с верхней поверхности верхнего кристалла. Добавление слоя бетона размером $0.7 \times 0.7 \times 1 \text{ м}$, который имитировал перекрытия здания, не повлияло на результат моделирования. Спектры, полученные при моделировании, подгонялись к экспериментальному спектру. Параметры подгонки для верхнего и нижнего счетчиков практически совпали. Величина среднего значения энерговыделения космических частиц по двум счетчикам составила $28.48 \pm 0.06 \text{ МэВ}$.

Перед началом измерений с рентгеновской трубкой система счетчиков устанавливалась на пути пучка рентгеновских фотонов на расстоянии 1 м от излучателя. Сцинтилляторы и световоды закрывались со всех сторон свинцовым экраном толщиной 1 мм. Свинцовый экран ограничивает прямой поток рентгеновского излучения от источника и поглощает рассеянное излучение. Для каждого счетчика в экране в месте расположения

сцинтиллятора было сделано отверстие площадью 1 см^2 для регистрации рентгеновских фотонов.

Рентгеновский источник работал с частотой 1 Гц. Амплитудный спектр сигналов от рентгеновского источника приведен на рис. 6. Основная часть событий сосредоточена в области пика. Незначительное количество событий вне пика объясняется нестабильностью в работе рентгеновского источника.

Расчет потока энергии от рентгеновского источника проводился по следующей формуле:

$$Q = U_R k E_\mu / U_\mu \approx 20 \text{ ГэВ/см}^2,$$

где U_R и U_μ – амплитуды сигналов от рентгеновского источника и космических мюонов в единицах шкалы амплитудного анализатора для спектров, приведенных соответственно на рис. 6 и 5; $k = 100$ – коэффициент усиления усилителя (рис. 4); $E_\mu = 28.48 \text{ МэВ}$ – энерговыделение космических мюонов в ВГО. Полученное значение потока энергии на расстоянии 1 м от рентгеновской трубки, равное 20 ГэВ/см^2 , соответствует ожидаемым оценкам этой величины. Этот сигнал эквивалентен числу $2 \cdot 10^5$ фотонов с энергией 100 кэВ от рентгеновской трубки.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе предложен и реализован метод измерения энергии рентгеновского источника с помощью сцинтилляционных счетчиков с кристаллами ВГО, калибровка которых проводится на космических мюонах. При измерениях два счетчика ВГО с чувствительной площадью 1 см^2 располагаются на расстоянии 1 м от рентгеновского источника. Измерения сигнала от рентгеновского источника проводятся с помощью

многоканального анализатора импульсов. Измеренный поток энергии составил 20 ГэВ/см² на расстоянии 1 м.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Комарский А.А., Корженевский С.Р., Кузнецов В.Л., Бессонова В.А., Чепусов А.С., Грин М.Я., Солодов Д.Л., Бочков В.Д., Бочков Д.В., Панов П.В., Терешин В.И.* // Труды II Всероссийской научно-практической конференции производителей рентгеновской техники. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2015. С. 72.
2. *Корженевский С.Р., Комарский А.А., Чепусов А.С., Бессонова В.А., Титов В.Н.* // ПТЭ. 2017. № 1. С. 52. doi 10.7868/S0032816217010219
3. *Васильев В.Н., Лебедев Л.А., Сидорин В.П., Ставицкий Р.В.* Спектры излучения рентгеновских установок: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1990. С. 120.
4. *Клюев В.В., Соснин Ф.Р., Аертс В., Боллен Р., Владимиров Л.Н., Водопьянов Л.И., Кантер Б.М., Колесников Н.О., Кронгауз А.Н., Меестр П., Пятигорский Б.П., Телегин Ю.П., Шварцман А.З.* Рентгенотехника: Справочник. М.: Машиностроение, 1992. Кн. 1. С. 82.
5. *Grigoriev D.N., Danevich F.A., Shlegel V.N., Vasiliev Ya.V.* // J. Instrumentation. 2014. V. 9. Issue 9. P. C09004. doi 10.1088/1748-0221/9/09/C09004
6. *Evans A.E.* // IEEE Trans. Nucl. Sci. 1980. V. NS-27. № 1. P. 172.
7. *Cecchini S., Spurio M.* // Geosci. Instrum. Method. Data Syst. 2012. V. 1. P. 185. doi 10.5194/gi-1-185-2012