

УДК 621.384.6+539.1.08

Метод измерения средней энергии квантов тормозного излучения ускорителя ЛИУ-30*

Н. К. Миронов, С. А. Горностай-Польский,
А. В. Грунин, А. Н. Залялов,
С. А. Лазарев

Описан метод измерения средней энергии квантов тормозного излучения ускорителя ЛИУ-30. Метод основан на использовании конвертора, включающего в себя сцинтиллятор и устанавливаемый перед ним комбинированный слой вещества. Реализована схема физического суммирования информации, в которой производится регистрация одним сцинтилляционным детектором рассеянных конвертором квантов, распространяющихся по воздуху, и световой вспышки от сцинтиллятора конвертора, передаваемой по волоконно-оптической линии связи. Разработан способ in situ градуировки, основанной на выравнивании наклонов спектральных характеристик и достижении независимости отношения откликов системы от спектра тормозного излучения.

Установка ЛИУ-30 [1] – одна из самых мощных в России. Установка способна функционировать в разных режимах в зависимости от задач эксперимента. Одним из способов изменения режимов функционирования является включение разного числа ускорительных блоков: максимально – 36 (это полный состав ускорителя), минимально – 4. При таком изменении числа включаемых блоков выход тормозного излучения (ТИ) изменяется на 3–4 порядка, а средняя энергия квантов ТИ – примерно на порядок. В связи с изменяющимися характеристиками ТИ возникает необходимость измерения не только дозовых характеристик, но и средней энергии квантов ТИ.

Средняя энергия квантов определяется как отношение флюенса энергии излучения в данной точке к флюенсу квантов:

$$\bar{E} = \frac{\int E\varphi(E)dE}{\int \varphi(E)dE} = \frac{\phi_w}{\phi}, \quad (1)$$

где \bar{E} – средняя энергия квантов, E – энергия квантов, $\varphi(E)$ – энергетическая плотность потока квантов излучения (спектр), ϕ_w – флюенс энергии излучения, ϕ – флюенс квантов излучения.

Метод измерения средней энергии квантов, основанный на использовании детекторов с линейными спектральными характеристиками (СХ), создавался для ЛИУ-30 и изложен в [2]. Спектральной характеристикой детектора в данном методе называется зависимость квантовой чувствительности от энергии. Линейные СХ детекторов представляются в виде

$$\eta(E) = a + bE, \quad (2)$$

где a , b – коэффициенты, характеризующие постоянную и прямо пропорциональную энергии части. Отклик детекторов с линейными СХ на воздействие излучения, имеющего распределение квантов по энергии, определяется как

* Доклад на Междунард. науч. конф. «XIV Харитоновские чтения». Саров, 2012 г.

$$Q = \int \eta(E) \varphi(E) dE = \int (a + bE) \varphi(E) dE = a \int \varphi(E) dE + b \int E \varphi(E) dE = a\phi + b\phi_w = a\phi + b\phi\bar{E}, \quad (3)$$

т. е. является суммой двух частей, одна из которых пропорциональна флюенсу квантов в месте установки детекторов, а вторая – флюенсу энергии. Линейный характер СХ детекторов обуславливает независимость результата в виде суммы (3) от спектра квантов. Для определения характеристик поля ϕ_w , ϕ в нашем распоряжении должно быть как минимум два детектора с зависимостью вида (2). Математическая модель метода выглядит следующим образом: вводятся вектор характеристик поля излучения \hat{G} , матрица чувствительностей детекторов \hat{M} , вектор результатов измерений зарядов с детекторов \hat{Q} :

$$\hat{G} = \begin{pmatrix} \phi \\ \phi_w \end{pmatrix}, \quad \hat{M} = \begin{pmatrix} a_1 & b_1 \\ a_2 & b_2 \end{pmatrix}, \quad \hat{Q} = \begin{pmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{pmatrix}. \quad (4)$$

Индексы 1, 2 относятся, соответственно, к первому и второму детекторам. Заряды с детекторов связаны с характеристиками поля излучения уравнением

$$\hat{M}\hat{G} = \hat{Q}. \quad (5)$$

Для определения характеристик поля излучения решается уравнение (5). Как известно, для решения уравнения (5) коэффициенты второго детектора должны существенно отличаться от коэффициентов для первого детектора. Эти отличия должны обеспечивать ненулевое значение детерминанта матрицы \hat{M} : $\Delta = a_1b_2 - a_2b_1 \neq 0$.

Средняя энергия квантов, определяемая данным методом,

$$\bar{E}_L = \frac{a_2 - a_1X}{b_1X - b_2}, \quad (6)$$

X – параметр методики, экспериментальное отношение зарядов с детекторов,

$$X = \frac{Q_2}{Q_1}. \quad (7)$$

Техническая реализация метода основана на использовании различных процессов, протекающих при взаимодействии гамма- или тормозного излучения с веществом-конвертором (рис. 1): во-первых, происходит вылет под разными углами рассеянных или вторичных квантов; во-вторых – частичное поглощение энергии квантов; в-третьих – вылет вторичных электронов и позитронов (нумерация процессов определяется используемой схемой регистрации).

Первый и третий процессы можно регистрировать только дистанционно – с помощью удаленного детектора, установленного под определенным углом (относительно конвертора), который соответствует углу вылета регистрируемого излучения.

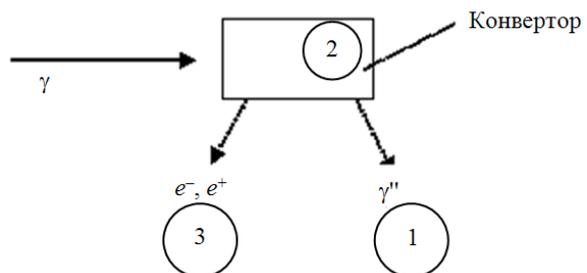


Рис. 1. Схематичное представление взаимодействия излучения с веществом: 1 – вылет квантов; 2 – поглощение энергии; 3 – вылет электронов и позитронов

Процесс поглощения энергии можно регистрировать, например, по ионизационному или сцинтилляционному эффекту. При этом детектор, регистрирующий этот эффект, может быть совмещен с конвертором, который в этом случае является его чувствительным элементом, а может быть удален от него. Нами выбран сцинтилляционный способ, потому что регистрация вспышки света возможна дистанционным способом, в одной манере с регистрацией первого и третьего эффектов. В случае дистанционной регистрации конвертор состоит из сцинтиллятора и слоя материала перед ним, а свет от сцинтиллятора подается на удаленный детектор, вынесенный из прямого потока излучения.

Спектральные характеристики детекторов определяются поглощенной в сцинтилляторах энергией и являются функцией всех параметров редакции измерений. СХ детекторов рассчитывались методом Монте-Карло по программе ЭЛИЗА [3]. В [2] представлены зависимости СХ от параметров элементов редакции измерений (слоя конвертора, угла рассеяния, фильтра детектора) и выбраны рабочие параметры этих элементов. СХ детекторов существенно различны в соответствии с видом сечений физических процессов.

На рис. 2, 3 приведены СХ детектора, регистрирующего вылетевшее из конвертора. Парциальные вклады вторичных частиц в поглощенную энергию в сцинтилляторе детектора регулируются алюминиевым фильтром, устанавливаемым между конвертором и удаленным детектором. СХ детектора при различных толщинах алюминиевого фильтра приведены на рис. 2.

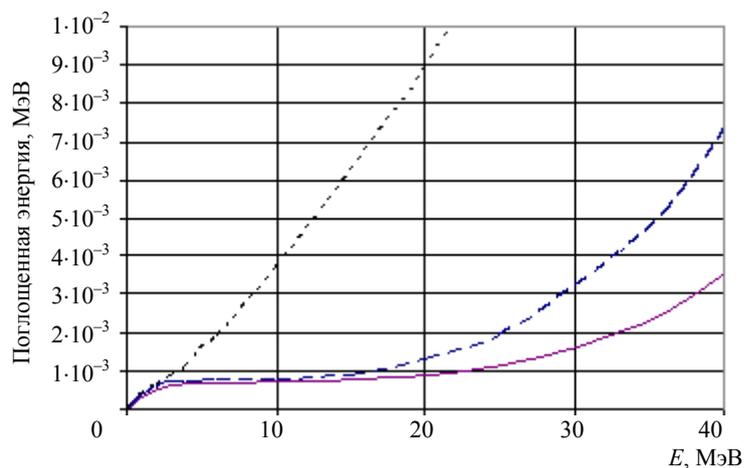


Рис. 2. Зависимости поглощенных энергий в сцинтилляторе детектора от толщины алюминиевого фильтра (угол установки детектора 25°): ---- – фильтр 0,1 см, - - - - – фильтр 2 см, ——— – фильтр 3 см

Фильтр из алюминия устраняет влияние заряженных частиц, сдвигая их вклад вправо по оси энергии. Для устранения влияния вторичных заряженных частиц до энергий квантов 40 МэВ требуется фильтр толщиной 3,5 см. На СХ детектора остается «остов», наклон которого практически не меняется с дальнейшим увеличением толщины фильтра. При использовании фильтра толщиной 3,5 см детектор в основном регистрирует рассеянные кванты излучения. При этом наклон СХ минимален.

СХ детектора с фильтром имеет нарастающий начальный участок при малых энергиях и основной рабочий участок. Наклон СХ детектора на основном рабочем участке сложным образом зависит от угла установки детектора и определяется также размерами конвертора и его составом (рис. 3,а). Представляется, что при углах установки детектора $\sim 60\text{--}90^\circ$ его спектральные характеристики наиболее прямолинейны.

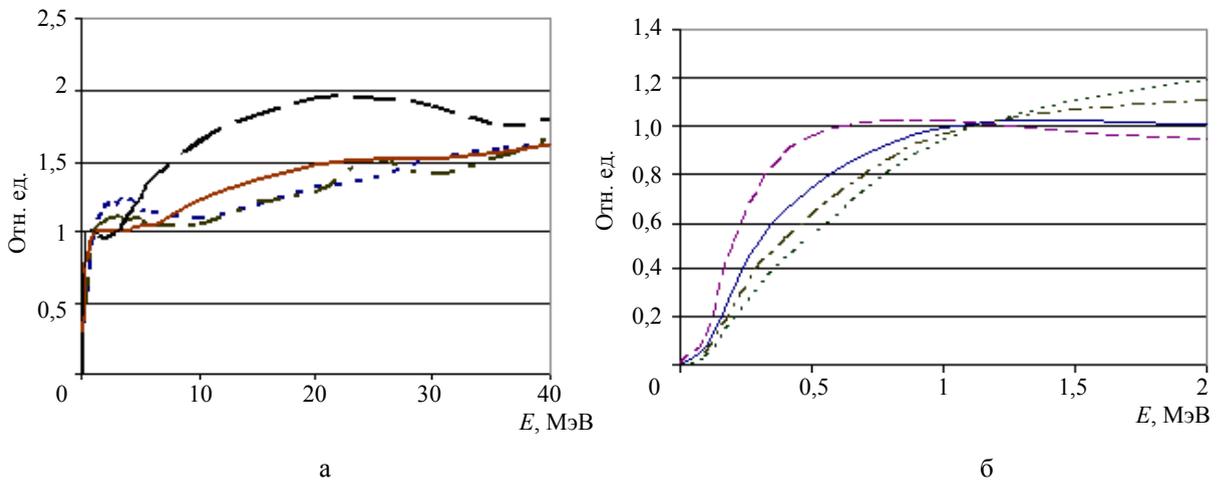


Рис. 3. Нормированные СХ детектора при разных углах его установки: а – рабочий энергетический участок; б – начальный участок; ---- – угол 45°; - · - · - – угол 60°; ———— – угол 90°; ······ – угол 135°

Наличие начального нарастающего участка обуславливает неидеальность СХ и вносит погрешность в измерение средней энергии квантов с мягким спектром. При увеличении угла рассеяния происходит монотонное уменьшение отклика с детектора и «укорочение» нарастающего участка его СХ (рис. 3,б), что является положительным фактором, уменьшающим погрешность измерений. Из рисунка видно, что СХ детектора при угле установки 90° достигает уровня 0,5 от номинала при энергии квантов 0,3 МэВ.

Анализ результатов расчетов Монте-Карло и предварительных экспериментов позволил выбрать в качестве оптимальной геометрии измерений с углом рассеяния 90°. При таком угле рассеяния реализуются достаточно малый начальный участок СХ, наибольшая точность юстировки взаимного положения детектора и конвертора и технологичность установки защиты от фоновых излучений.

После расчетов СХ проводится их линеаризация методом наименьших квадратов и определение коэффициентов a_i, b_i . На метод измерений и соответствующую измерительную систему получен патент [4]. Авторы усовершенствовали метод измерений, использовав конвертор с комбинированным слоем и разработав схемы физического суммирования и способа градуировки чувствительностей откликов измерительной системы.

В схеме измерений [2, 4] используются два детектора, отдельно регистрирующие конвертированное излучение и поглощенную энергию в конверторе. Авторы рассмотрели вопрос о возможности использования одного детектора для регистрации. В этом случае реализуется схема физического суммирования разных видов излучений, обладающая большей точностью регистрации относительных амплитуд импульсов по сравнению с двухдетекторной схемой, особенно если детекторами являются фотоэлектронные умножители. Усовершенствованная схема измерений приведена на рис. 4.

Конвертор расположен в прямом потоке излучения источника напротив отверстия в бетонном коллиматоре. Сцинтилляционный детектор на основе ФЭУ СНФТ-5 установлен за бетонной стеной (коллиматором) в области регистрации конвертированного излучения. В конверторе и детекторе используются сцинтилляторы на основе полистирола. В данной реализации метода измеряется средняя энергия квантов, летящих под углами к оси установки, близкими к нулевым ($\sim 0,1^\circ$).

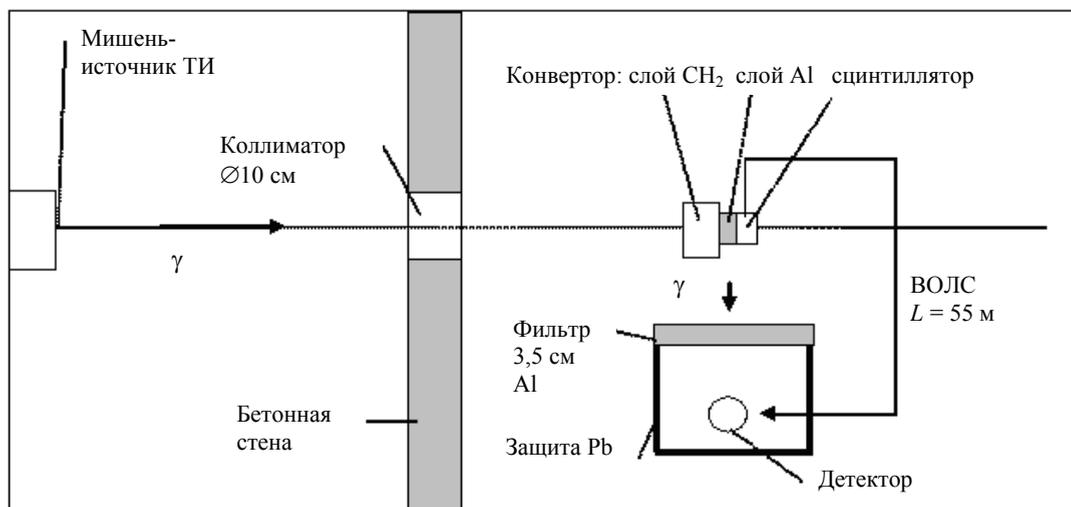


Рис. 4. Геометрия измерения средней энергии ТИ при угле рассеяния и установки детектора 90°

Вылетевшие из конвертора кванты и электроны распространяются до детектора по воздуху и регистрируются совместно. Устанавливаемый перед детектором фильтр практически полностью устраняет вклад заряженных частиц конвертора и уменьшает наклон спектральной характеристики. Заряженные частицы e^- , e^+ используются в отдельных измерениях при градуировке системы. Световая вспышка в сцинтилляторе конвертора с помощью волоконно-оптической линии связи (ВОЛС) с задержкой передается на фотокатод детектора.

Эти излучения формируют два отклика системы, которые суммируются на детекторе и преобразуются в электрические импульсы. Данная схема суммирования привела к некоторому изменению терминологии по сравнению с отдельной схемой [2]. В измерительной системе вместо откликов двух детекторов используются два отклика системы. Отклики рождаются в одной точке – в точке установки конвертора. Понятие СХ в схеме суммирования относится к откликам системы. Используется следующая нумерация откликов: первый отклик связан с регистрацией детектором квантов, рассеянных конвертором и распространяющихся по воздуху, второй отклик – с поглощением энергии и вспышкой света в сцинтилляторе-конверторе. Спектральные характеристики откликов обозначаются как CX_1 и CX_2 .

Слой материала в конверторе перед сцинтиллятором предназначен для формирования СХ, близкой к линейному виду. В схеме измерений [2] используется простой слой из Al, в усовершенствованной редакции – комбинированный слой $CH_2 + Al$, который приводит к разнонаправленному изменению наклонов и увеличению разности наклонов СХ двух откликов. Детектор, его расположение и геометрия измерений в целом при этом не изменяются.

Изучим подробнее влияние комбинированного слоя на характер получаемых СХ. Для этого рассмотрим влияние атомного номера Z материала конвертора на вид СХ. Сечение комптоновского рассеяния пропорционально Z . Сечение реакции образования пар пропорционально Z^2 . Если основной реакцией в слое конвертора становится комптоновское рассеяние, то CX_1 должна формироваться с меньшим наклоном по сравнению с системой с алюминиевым слоем. Это связано с уменьшением сечения комптоновского рассеяния с энергией квантов и уменьшением энергий квантов при рассеянии.

Методом Монте-Карло были рассчитаны SX откликов со слоями конвертора из разных материалов. Получены существенно убывающие SX_1 при использовании слоев из легких водородосодержащих материалов CH_2 и LiH . Расчеты показали, что при использовании более легкого материала слоя, чем алюминий, происходит уменьшение наклона SX_1 , но также при этом коррелированно уменьшается наклон SX_2 , вид которой становится существенно нелинейным.

Если в качестве материала слоя использовать более тяжелый, чем алюминий, элемент, например, железо, то SX первого и второго откликов изменяются в сторону увеличения наклона. При этом наклон SX_1 увеличивается больше и разность наклонов SX_2 и SX_1 уменьшается.

Таким образом, совместному уменьшению наклона SX_1 и увеличению наклона SX_2 препятствует свойство системы, связанное с наличием корреляционной зависимости SX двух откликов D_1 и D_2 . Эта зависимость обусловлена наличием слоя в конверторе, формирующего SX второго отклика и SX первого отклика (через рассеяние). Для решения задачи разнонаправленного изменения наклонов SX_2 и SX_1 и увеличения разности наклонов используется комбинированный слой в конверторе с добавочным слоем из CH_2 .

Принцип работы комбинированного слоя состоит в следующем. При формировании поглощенной дозы в сцинтилляторе конвертора работает в основном ближний к нему слой Al , обеспечивающий линейность SX_2 . При формировании поглощенной дозы в сцинтилляторе детектора параллельно работают оба слоя из CH_2 и Al . Этим слоям по отдельности соответствуют убывающие и возрастающие SX первого отклика. Однако вместе (при определенных пропорциях в размерах и массах этих слоев) они могут формировать SX_1 с уменьшенным или отрицательным наклоном $b_1 \leq 0$. Нужные пропорции в массах слоев трудно определить аналитически, они определяются подбором в оптимизационных расчетах по программам Монте-Карло.

Результаты расчетов SX_2 и SX_1 для конверторов оптимизированных конструкций и сравнение с вариантом простого слоя приведены на рис. 5, 6. SX выражены в относительных единицах, нормированы на единицу при энергии квантов 1,25 МэВ.

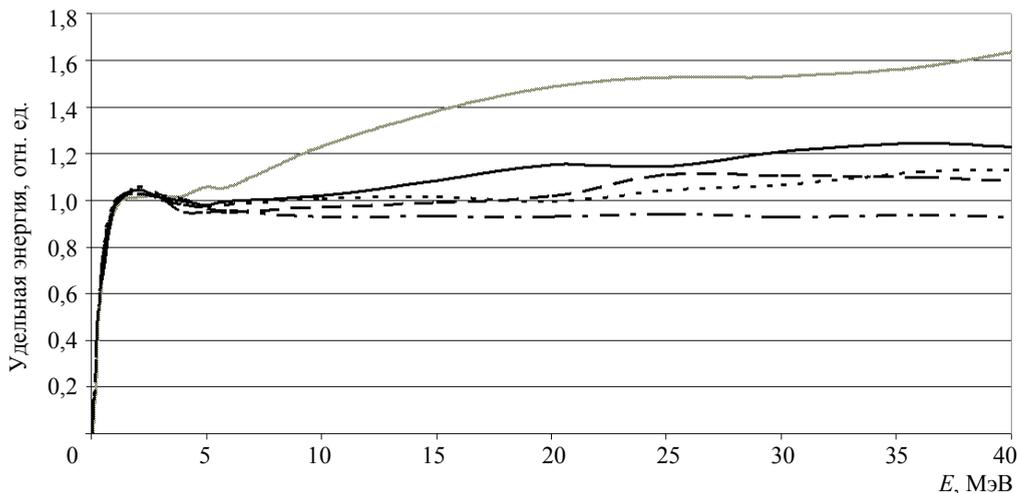


Рис. 5. SX первого отклика при разных конфигурациях конвертора: — исходный вариант $(10 \times 3)Al-(10 \times 5)CH$; — — — — $(10 \times 12)CH_2-(7 \times 3)Al-(6 \times 5)CH$; - - - - $(10 \times 12)CH_2-(6 \times 3)Al-(5,5 \times 5)CH$; - - - - $(10 \times 12)CH_2-(6 \times 3)Al-(5 \times 5)CH$; - - - - $(10 \times 12)CH_2-(5 \times 3)Al-(4 \times 5)CH$

Комбинированный конвертор с добавочным слоем CH_2 состоит из трех элементов, каждый из которых обозначен в соответствии со своими размерами и составом. Например, в обозначении добавочного слоя $(10 \times 12)\text{CH}_2$ цифры перед обозначением материала означают диаметр и толщину в сантиметрах. Обозначение конфигурации конвертора определяет в данном случае CX обоих откликов.

Из рис. 5 следует, что для конструкции конвертора в виде $(10 \times 12)\text{CH}_2 - (6 \times 3)\text{Al} - (5 \times 5)\text{CH}$, $(10 \times 12)\text{CH}_2 - (6 \times 3)\text{Al} - (5,5 \times 5)\text{CH}$ CX_1 имеет существенно меньший наклон, чем в варианте простого конвертора. Соответствующие CX_1 близки к постоянным, имея некоторые нерегулярности, но отличия от линеаризованных зависимостей не превышают 5 %.

При использовании добавочного слоя немного «опускается» участок CX_2 при энергиях несколько МэВ. Это связано с дополнительным ослаблением квантов меньших энергий в полиэтилене вследствие спадающей зависимости коэффициента ослабления квантов от энергии, т. е. с работой добавочного слоя как фильтра. В целом для CX_2 это означает существенное уменьшение коэффициента a_2 линеаризованной CX (2) и одновременно больший наклон и большее значение коэффициента b_2 (рис. 6). Зависимости для конверторов с добавочным слоем на рис. 6 сливаются.

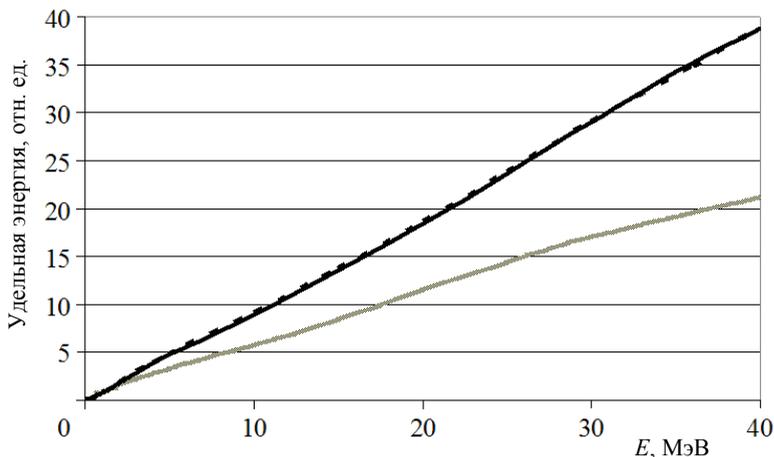


Рис. 6. CX второго отклика при разных конфигурациях конвертора: — — — $(10 \times 12)\text{CH}_2 - (7 \times 3)\text{Al} - (6 \times 5)\text{CH}$; - - - $(10 \times 12)\text{CH}_2 - (6 \times 3)\text{Al} - (5 \times 5)\text{CH}$; — исходный вариант $(10 \times 3)\text{Al} - (10 \times 5)\text{CH}$

Таким образом, применение комбинированного слоя приводит к разнонаправленному изменению наклонов CX откликов и увеличению разности наклонов. Отношение коэффициентов b/a увеличивается для CX_2 и уменьшается для CX_1 .

Рассмотрим систему с конвертором в виде $(10 \times 12)\text{CH}_2 - (6 \times 3)\text{Al} - (5 \times 5)\text{CH}$, $(10 \times 12)\text{CH}_2 - (6 \times 3)\text{Al} - (5,5 \times 5)\text{CH}$. Пример линеаризации CX приведен на рис. 7.

Погрешность средней энергии \bar{E} определяется погрешностью параметра X – отношения зарядов. Погрешности зарядов определяются типом используемого регистратора-осциллографа. Зависимость переноса относительной погрешности δX на относительную погрешность средней энергии $\delta \bar{E}$ выводится из формулы (6) на основании [5, с. 76] и выглядит как

$$\frac{\delta \bar{E}}{\delta X} = \frac{\Delta X}{(b_2 - b_1 X)(a_2 - a_1 X)}, \quad (8)$$

где Δ – детерминант матрицы, составленной из коэффициентов $a_i, b_i, i = 1, 2$.

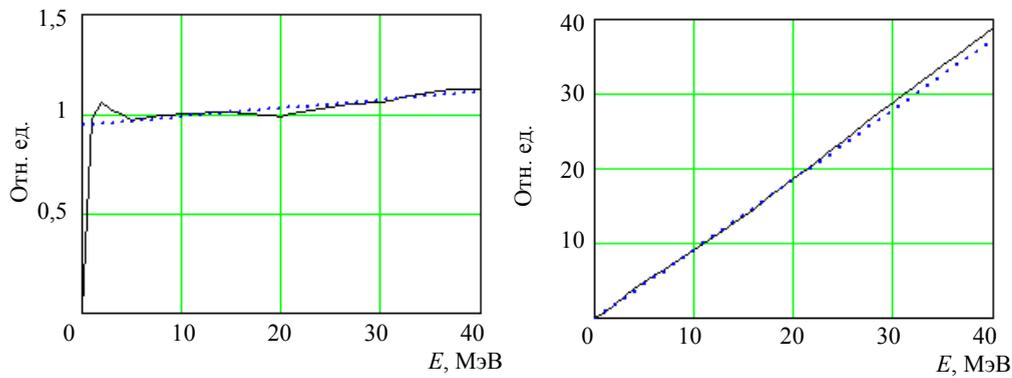


Рис. 7. СХ двух откликов конвертора $(10 \times 12)CH_2 - (6 \times 3)Al - (5 \times 5)CH$ и их линейризации:
 — расчет МК, ---- — линейризация

Улучшение точности измерений связано с оптимальным значением набора коэффициентов a_i, b_i . При измерении средней энергии способом линейных характеристик с помощью системы с комбинированным конвертором погрешность измерений, связанная с δX , в 1,55–1,4 раза меньше, чем для варианта конвертора с простым слоем. Для системы с комбинированным слоем в силу отличий значений параметров a_i, b_i погрешность $\delta \bar{E}$ примерно равна погрешности δX : $\delta \bar{E} \approx \delta X$. Уменьшение $\delta \bar{E} / \delta X$ в системе измерений с комбинированным конвертором является существенным. На систему измерений с комбинированным слоем получен патент [5].

Пример осциллограмм с импульсами, полученными с измерительной системой рис. 4 и регистрируемыми с помощью схемы суммирования осциллографом, приведен на рис. 8. Максимальные токи с детектора в импульсах составляют ~ 2 А.

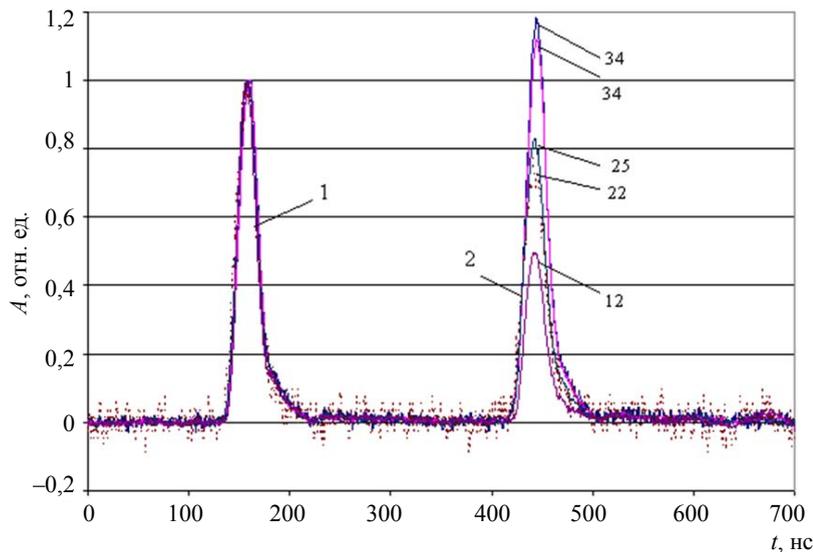


Рис. 8. Пример осциллограмм схемы суммирования: 1 – импульсы плотности потока квантов, связанные с рассеянными квантами; 2 – импульсы плотности потока энергии, связанные с передачей света по ВОЛС; 12–34 – количество включившихся ускорительных блоков

В общем случае амплитуды двух откликов, связанных с рассеянным гамма-излучением и световым импульсом в сцинтилляторе конвертора, в зависимости от значения параметров схемы суммирования могут различаться на несколько порядков. Авторы добивались получения сопоставимых амплитуд электрических аналогов откликов. В результате исследований были подобраны соответствующие параметры измерительной системы: масса конвертора, расстояние до детектора, диаметр и длина ВОЛС, светофильтры и т. д. Исследования показали, что световой поток от сцинтиллятора увеличивается с увеличением диаметра ВОЛС в соответствии со степенной зависимостью. В частности, изменение диаметра ВОЛС в диапазоне от 50 до 1000 мкм вызывает изменение светового потока от сцинтиллятора до 4 порядков величины. Используемый в данной схеме ВОЛС – HFBR RUS500 с диаметром светопроводящей жилы 1 мм и длиной ~55 м. Такая длина оптического кабеля обеспечивает задержку светового импульса с конвертора ~280 нс, достаточную для разделения импульсов длительностью 15–20 нс. Диаметр ВОЛС обеспечивает достаточную интенсивность передаваемого света и амплитуду импульса второго отклика, сопоставимую с амплитудой импульса, связанного с рассеянным излучением.

Реальные амплитудные характеристики (АХ) детекторов не являются идеально-линейными. Это вызывает дополнительную погрешность при использовании двухдетекторной схемы регистрации. При работе со схемой суммирования относительная точность регистрации импульсов сохраняется при изменении выхода ТИ ускорителя в различных режимах на 3–4 порядка. Это обусловлено тем, что импульсы формируются на близких участках АХ одного детектора.

Суммирование откликов происходит на фотокатоде фотоэлектронного умножителя до их преобразования в электрические аналоги. Амплитуды передаваемых откликов зависят только от физического состояния рабочих тел схемы измерений и стабильны в течение длительного периода. Регистрация двух импульсов на одном канале обеспечивает большую точность измерений относительного параметра X (7), так как оба импульса одинаково регистрируются и усиливаются фотоумножителем. При этом устраняется влияние нестабильности коэффициента умножения фотоумножителя и других элементов каналов. Нестабильность коэффициента умножения фотоумножителя имеет место, в частности, после включения в процессе прогрева. Схема суммирования обеспечивает практическую независимость от времени прогрева аппаратуры.

Амплитуды первых импульсов на рис. 8 нормированы на единицу, что позволяет видеть относительные амплитуды двух импульсов, характеризующие среднюю энергию квантов ТИ. Рядом со вторыми импульсами указано число включавшихся ускорительных блоков ЛИУ-30. Наблюдается пропорциональность амплитуды второго импульса (импульса энергии) числу сработавших блоков. На схему регистрации с использованием суммирования получен патент [7].

Обратной функцией к переносу погрешности (8) является другая характеристика системы – чувствительность к изменению измеряемой величины, в данном случае – средней энергии. В работе [5, с. 60] чувствительность прибора определяется как отношение отклонения показаний прибора к вызвавшему это отклонение изменению измеряемой величины. Авторы данной работы используют относительные изменения X , \bar{E} и определяют чувствительность системы как

$$S = \frac{\delta X}{\delta \bar{E}}. \quad (9)$$

Применительно к рис. 8 увеличение чувствительности S означает увеличение размаха амплитуд вторых импульсов.

Градуировка относительных чувствительностей откликов измерительной системы к излучению проводится с помощью разработанного способа, использующего ТИ ЛИУ-30. В основе способа лежит выравнивание наклонов SX откликов на основе полученных расчетных зависимостей вида SX от размеров и состава элементов измерительной системы. В частности, наклон SX от-

клика, связанного с рассеянными квантами, увеличивается с ростом Z слоя конвертора и уменьшением толщины фильтра детектора. Для проведения градуировки в системе делаются следующие изменения: добавочный слой CH_2 заменяется на железное кольцо $\varnothing_1 = 6 \text{ см}$, $\varnothing_2 = 10 \text{ см}$ и толщиной 2–2,5 см, а толщина фильтра уменьшается до 5 мм. Оптические контакты в системе не меняются. Изменения в составе конвертора показаны на рис. 9.

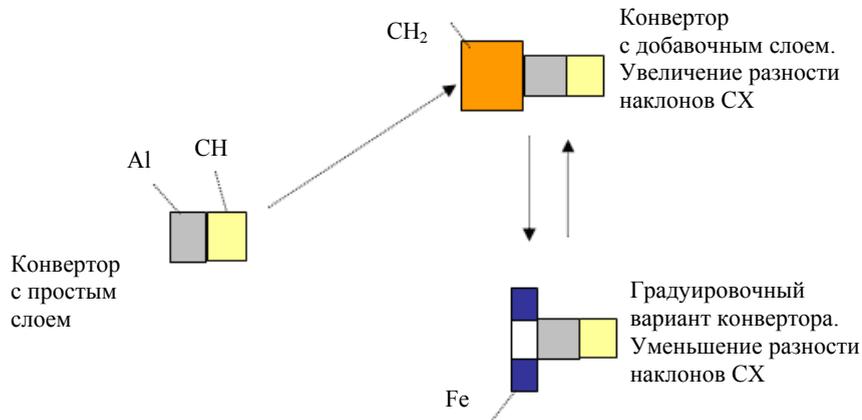


Рис. 9. Варианты составов конвертора для рабочих измерений и градуировки

Зависимости отношения зарядов от средней энергии квантов приведены на рис. 10. В градуировочном состоянии системы отношения зарядов практически не зависят от спектра квантов ТИ, что означает снижение чувствительности S (9) почти до нуля. Это позволяет проводить градуировку с помощью ТИ ЛИУ-30, спектральный состав которого нам не известен точно, но известны пределы изменения спектра и средней энергии квантов. Пример наложенных четырех осциллограмм с градуировочными импульсами системы приведен на рис. 11. Максимальный ток в первом пике составил около 2 А.

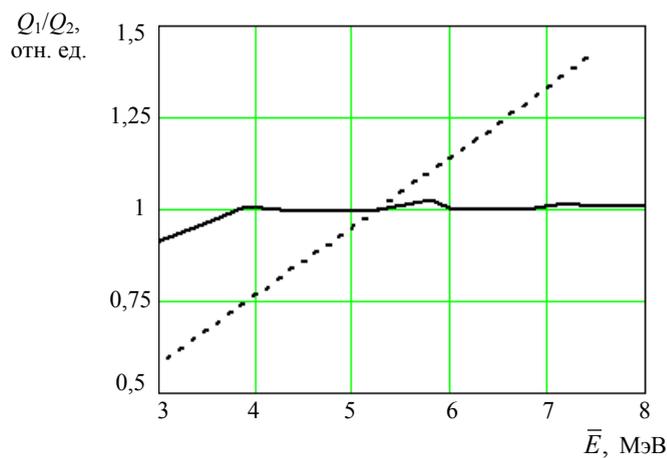


Рис. 10. Зависимости отношения зарядов от средней энергии квантов:
 --- – рабочая геометрия, ——— – градуировочная геометрия

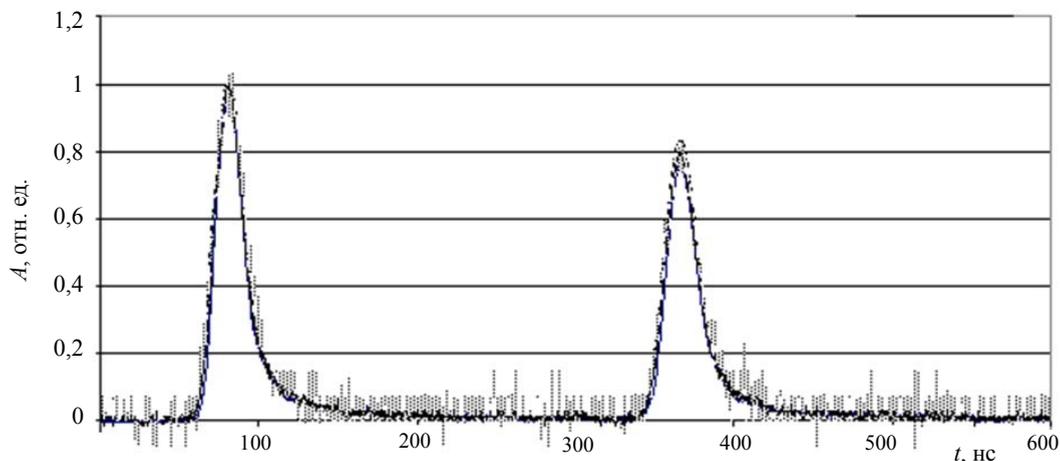


Рис. 11. Оциллограммы импульсов при проведении градуировки

Обработка результатов градуировки основана на пропорциональности между поглощенной энергией ε_i в сцинтилляторах и зарядом в импульсах с детектора Q_i . Исходя из пропорциональности Q_i и ε_i определяется относительный коэффициент:

$$K_d = \frac{\varepsilon_1/\varepsilon_2}{Q_1/Q_2}, \quad (10)$$

где Q_1, Q_2 – измеренные заряды откликов при градуировке; $\varepsilon_1, \varepsilon_2$ – расчетные удельные поглощенные энергии в сцинтилляторах в градуировочной геометрии.

После градуировки и определения K_d СХ второго отклика преобразуется как

$$\eta_2(E) = \eta'_2(E) K_d, \quad (11)$$

где $\eta'_2(E)$ – зависимость чувствительности второго отклика в рабочей геометрии, выраженная в единицах удельной поглощенной энергии.

Разработанный метод градуировки является способом *in situ*, при котором детекторы находятся на своих рабочих местах. На способ градуировки получен патент [8].

Погрешность измерения средней энергии квантов ТИ усовершенствованного метода оценивается в 4–6 %. Значения средних энергий квантов в рабочем диапазоне изменения числа ускорительных блоков находятся в пределах от ~0,8 до 6 МэВ.

Список литературы

1. Павловский А. И., Босамыкин В. С., Герасимов А. И. И др. Мощный линейный импульсный ускоритель пучка электронов на радиальных линиях ЛИУ-30 // ПТЭ. 1998. № 2. С. 13–25.
2. Миронов Н. К., Лазарев С. А., Грунин А. В., Залялов А. Н. Измерение средней энергии квантов тормозного излучения ускорителя ЛИУ-30 методом детекторов с линейными спектральными характеристиками // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010. Вып. 15. С. 332–338.

3. Донской Е. Н. Методика и программа ЭЛИЗА решения методом Монте-Карло задач совместного переноса γ -излучения, электронов и позитронов // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 1993. Вып. 1. С. 3–6.
4. Пат. РФ 2317571 МПК G01T 1/167 (2006.01). Способ определения характеристик тормозного или жесткого гамма-излучения мощных импульсных источников и система для его осуществления / Н. К. Миронов, С. А. Лазарев, А. В. Грунин, П. И. Фролов // Бюл. изобретений. 20.02.2008. № 5.
5. Лавренчик В. Н. Постановка физического эксперимента и статистическая обработка его результатов. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
6. Пат. РФ 2436121 МПК G01T 1/167 (2006.01). Система регистрации характеристик тормозного или гамма-излучения для определения его характеристик / Н. К. Миронов, А. В. Грунин, А. Н. Залыалов, С. А. Лазарев // Бюл. изобретений. 10.12.2011. № 34.
7. Пат. РФ 2383034 МПК G01T 1/167 (2006.01). Способ регистрации характеристик тормозного или гамма-излучения мощных импульсных источников и устройство для его осуществления / Н. К. Миронов, С. А. Лазарев, П. И. Фролов // Бюл. изобретений. 27.02.2010. № 6.
8. Пат. РФ 2470326 МПК G01T 1/167 (2006.01). Способ градуировки чувствительностей детекторов, предназначенных для регистрации характеристик жесткого гамма- или тормозного излучения / Н. К. Миронов, А. В. Грунин, С. А. Лазарев // Бюл. изобретений. 20.12.2012. № 35.

A Method of Measuring Average Energy of Bremsstrahlung Quanta in LIU-30 Accelerator

N. K. Mironov, S. A. Gornostaj-Pol'skiy, A. V. Grunin, A. N. Zalyalov,
S. A. Lazarev

There is described a method of measuring the average energy of bremsstrahlung quanta in LIU-30 accelerator. The method is based on the use of converter including a scintillator and combined layer of material installed in front of it. There is realized a scheme of physical summation of information in which there is performed by one scintillation detector the registration of quanta scattered by the converter and light flash from the scintillator-converter transmitted by a fiber-optic communication line (FOCL). There is developed a method of in-situ calibration based on alignment of slopes spectrum characteristics and achievement of independence of system response ratio on bremsstrahlung spectrum.