

ИССЛЕДОВАНИЕ ТОЧНОСТНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК СИСТЕМЫ ДИНАМИЧЕСКОГО ИЗМЕРЕНИЯ СРЕДНЕЙ ЭНЕРГИИ КВАНТОВ ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЛИУ-30

*Мальшев Алексей Александрович (otd4@expd.vniief.ru),
Миронов Николай Константинович*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородской обл.

В настоящей работе приведены результаты развития метода линейных характеристик (МЛХ) определения средней энергии квантов тормозного излучения ЛИУ-30 от интегрального к динамическому рассмотрению. Определены временные интервалы между импульсами двух откликов метода МЛХ с оценкой погрешности. Приведены результаты измерения и обработки импульсных характеристик каналов метода МЛХ. Проведено исследование параметров процедуры математического восстановления временной формы импульсов метода МЛХ. Получены восстановленные импульсы в рабочем и градуировочном режимах работы метода и значения временных интервалов между импульсами, с учетом процедуры математического восстановления. Приведены результаты расчета зависимости от времени средней энергии квантов тормозного излучения ЛИУ-30 и ее погрешности. Также описаны способы применения динамической зависимости средней энергии и возможные улучшения элементов каналов метода МЛХ для улучшения их временного разрешения.

Ключевые слова: ЛИУ-30, метод линейных характеристик, временной интервал, импульсная характеристика, средняя энергия, погрешность.

ACCURACY CHARACTERISTICS RESEARCH OF LIU-30 BREMSSTRAHLUNG QUANTUM MODERATE ENERGY DYNAMIC MEASUREMENT SYSTEM

*Malyshev Alexey Alexandrovich (otd4@expd.vniief.ru),
Mironov Nikolai Konstantinovich*

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov Nizhny Novgorod region

The paper presents results of development of linear characteristics method (MLC) for determining LIU-30 bremsstrahlung moderate quantum energy from integral to dynamic consideration. Time intervals with measurement error estimation between two MLC pulses are defined. There are presented results of MLC channels pulse responses measurement and processing. There is presented research of MLC pulses waveform mathematical reconstruction parameters. MLC pulses in operation and calibration modes and time intervals after mathematical reconstruction are determined. There are presented results of LIU-30 bremsstrahlung quantum moderate energy time dependence calculation with measurement error estimation. Also described are methods of moderate energy time dependence application and modification of MLC channels elements for the purpose of time resolution improvement.

Key words: LIU-30, linear characteristics method, time interval, pulse response, moderate energy, measurement error.

Введение

Линейный индукционный ускоритель электронов ЛИУ-30 [1] является источником мощного импульсного тормозного излучения (ТИ) и используется

для проведения исследований в области радиационной физики.

Для ускорителя ЛИУ-30 разработан набор методов измерения дозовых и энергетических характеристик ионизирующего излучения. Одним из таких

методов является метод линейных характеристик измерения средней энергии квантов ТИ [3] интегрально за импульс.

Представляет интерес определение средней энергии квантов в динамике, то есть в зависимости от времени. Зависимость средней энергии квантов ТИ от времени может использоваться, во-первых, для проверки электродинамических программ, предназначенных для расчета прохождения электронов по ускорительному тракту и формирования поля ТИ. Во-вторых, для уточнения показаний детекторов, измеряющих временные и мощностные характеристики поля ТИ ускорителя ЛИУ-30. В общем случае для динамических измерений мощности дозы требуется определять зависимость спектра квантов ТИ от времени в месте установки детекторов. Такие измерения, а также процедура их обработки являются чрезвычайно громоздкими.

Предлагается учитывать спектральный состав квантов ТИ в сокращенном виде, в виде средней энергии. Такое предложение обусловлено плавной зависимостью сечений взаимодействия гамма-квантов от энергии (в области энергий от единиц до десятков МэВ). Значение средней энергии квантов ТИ может использоваться для уточнения измеряемых характеристик ТИ как в интегральном, так и в динамическом варианте.

Особенности определения средней энергии квантов тормозного излучения ускорителя ЛИУ-30 в динамическом режиме

Метод измерения средней энергии квантов, основанный на использовании детекторов с линейными спектральными характеристиками (СХ), создавался для ЛИУ-30 [2]. Средняя энергия определяется как отношение флюенса энергии квантов к флюенсу квантов:

$$E_{\text{ср}} = \frac{F_w}{F}, \quad (1)$$

где $E_{\text{ср}}$ – средняя энергия; F_w – флюенс энергии квантов; F – флюенс квантов.

СХ детектора в данном методе называется зависимость квантовой чувствительности от энергии [3]. Линейные СХ детекторов представляются в виде, использующим два постоянных коэффициента:

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

где $\eta(E)$ – СХ детекторов; a , b – коэффициенты, характеризующие постоянную и прямо пропорциональную энергии части.

Отклик детектора, имеющего СХ вида (2), на воздействие излучения является суммой двух частей, одна из которых пропорциональна плотности потока энергии в месте установки детекторов, а вторая – плотности потока квантов.

Значение средней энергии квантов, определяемое данным методом, равно:

$$\bar{E}_L = \frac{a_2 - a_1 X}{b_1 X - b_2}, \quad (3)$$

где X – параметр метода – экспериментальное отношение зарядов с детекторов:

$$X = \frac{Q_2}{Q_1}, \quad (4)$$

где Q_2 и Q_1 – заряды с детекторов.

Метод МЛХ работает в двух режимах. Основной измерительный режим – рабочий, дополнительный режим – градуировочный. Рабочий режим метода – основной режим работы метода, в котором реализуется максимальная разность наклонов СХ двух детекторов, что позволяет измерять среднюю энергию квантов ТИ.

Измерительная система МЛХ, состоящая из конвертора и детектора на основе фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) СНФТ-5, генерирует два отклика, которые суммируются на один измерительный канал. Конвертор является составным, состоящим из комбинированного слоя $\text{CH}_2 + \text{Al}$ и сцинтиллятора на основе полистирола. Суммирование производится посредством передачи светового импульса сцинтиллятора конвертора (первого отклика Д1) по оптическому кабелю HFBR RUS500 и регистрацией его на ФЭУ второго детектора. Первый отклик соответствует флюенсу энергии квантов. Второй отклик Д2 связан с рассеянными квантами, передающимися с конвертора на детектор по воздуху (соответствует флюенсу квантов). Нумерация откликов сложилась в процессе разработки метода и при этом отклики расположены на осциллограмме в обратной последовательности.

Пример отклика схемы суммирования приведен на рис. 1. Первому импульсу соответствует флюенс энергии квантов, второму импульсу соответствует флюенс квантов.

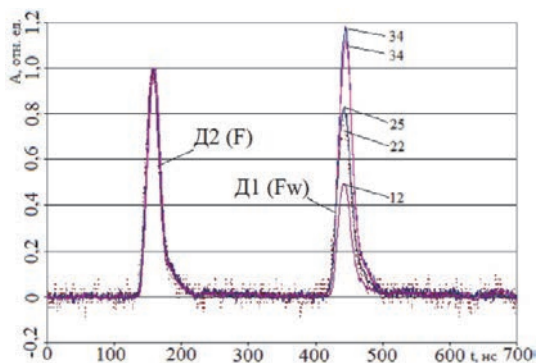


Рис. 1. Пример отклика схемы суммирования: Д1 – импульсы плотности потока энергии, Д2 – импульсы плотности потока квантов

Цифры (12...34) на рис. 1 означают число включившихся ускорительных блоков.

Градуировочный режим метода - вспомогательный режим работы метода, в котором вносятся технические изменения в систему. За счет этого происходит максимальное сближение наклонов СХ двух детекторов, что позволяет определять относительную чувствительность детекторов методом *in situ* [2], [4] с помощью излучения ЛИУ-30 в основной геометрии системы.

Вернемся к рабочему режиму метода МЛХ. При определении средней энергии в зависимости от времени параметр X (4) заменяется на параметр, зависящий от времени:

$$X(t) = \frac{I_2(t+T)}{I_1(t)}, \quad (5)$$

где $I_2(t)$ – зависимость от времени тока второго импульса; $I_1(t)$ – зависимость от времени тока первого импульса; T – временной интервал между импульсами метода.

То есть производится поточечное деление амплитуды одного импульса на амплитуду другого. Для этого нужно максимально точно определить интервал времени T между импульсами для того, чтобы привести импульсы к одной временной оси.

Определение временного интервала между аппаратными импульсами двух откликов метода МЛХ в градуировочном режиме

Величина временного интервала T – это время между точками фронтов импульсов откликов Д1 и Д2, соответствующих половинам амплитуд импульсов (см. рис. 2). Амплитуда импульсов определялась как амплитуда в точке, в которой значение напряжения (или тока) максимально.

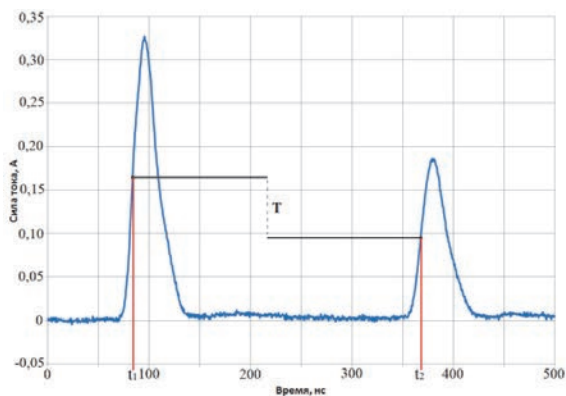


Рис. 2. Градуировочные импульсы системы, T – временной интервал

Для нахождения моментов времени, соответствующих максимумам амплитуд импульсов, использована полиномиальная аппроксимация квадратичной параболой (см. рис. 3).

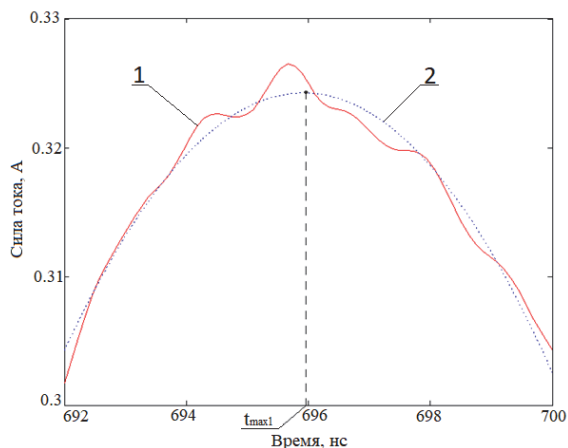


Рис. 3. Зависимость от времени пика импульса и его аппроксимация квадратичной параболой: 1 – пик импульса, 2 – аппроксимация пика импульса

Моменты времени, соответствующие половинам амплитуд импульсов t_1 и t_2 (см. рис. 2) рассчитываются от найденных методом полиномиальной аппроксимации максимумов импульсов методом кубической сплайн – интерполяции.

После вычисления временных интервалов определяется среднеквадратичная погрешность σ временного интервала T (усредненного по трем вычисленным значениям) согласно следующей формуле:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{cp})^2}{n(n-1)}}, \quad (6)$$

где $n = 3$ (количество измерений) [5].

Среднеквадратичная погрешность временного интервала σ_i для отдельного измерения больше, чем σ в \sqrt{n} раз [5] и равна:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (T_i - T_{cp})^2}{n-1}}, \quad (7)$$

Полученные результаты приведены в табл. 1.

Таблица 1

Средние значения временных интервалов между импульсами метода МЛХ в градуировочном режиме работы метода и значения их погрешностей

$T_{max\ cp}$, нс	$2\sigma_i$, нс	2σ , нс	$T_{0,5\ cp}$, нс	$2\sigma_i$, нс	2σ , нс
283,83	0,66	0,38	283,90	0,25	0,14

$T_{max\ cp}$ – среднее значение временного интервала, определенного по моментам времени, соответствующим максимумам импульсов, $T_{0,5\ cp}$ – среднее значение временного интервала, определенного по моментам времени, соответствующим половинам амплитуд импульсов.

Измерение импульсных характеристик каналов метода линейных характеристик с помощью установки Аргумент-1000

Для измерений импульсных характеристик (ИХ) каналов МЛХ использовался ускоритель Аргумент-1000 [6]. Длительность импульса ТИ ускорителя на половине амплитуды составляет 2,5 нс.

На рис. 4 приведена геометрия измерений ИХ откликов метода МЛХ. Осциллограмма (после обработки), полученная в ходе измерения ИХ откликов метода МЛХ приведена на рис. 5.

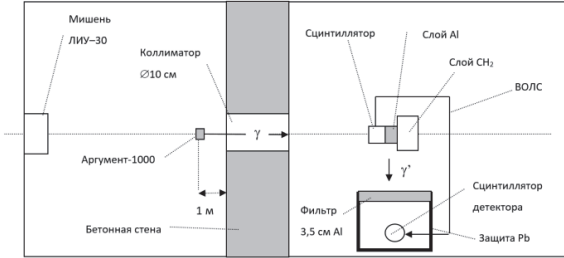


Рис. 4. Геометрия измерений ИХ откликов метода МЛХ

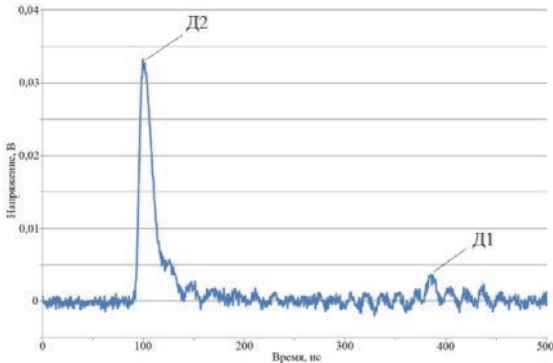


Рис. 5. Осциллограмма (после обработки), полученная в ходе измерения ИХ откликов метода МЛХ: Д1 – импульс первого отклика, Д2 – импульс второго отклика

Амплитуда импульса второго отклика на ТИ Аргумент-1000 (Д2) является приемлемой для регистрации и дальнейшей обработки. Следует отметить чрезвычайно малую амплитуду импульса первого отклика (Д1), являющуюся следствием малой энергии квантов ТИ Аргумент-1000 в сравнении с ЛИУ-30. Для увеличения амплитуды этого отклика составной конвертор разворачивается на 180° и помещается в коллиimator для увеличения потока квантов ТИ. При этом излучение попадает непосредственно на сцинтиллятор Д1 без ослабления. В этой геометрии проведены повторные измерения ИХ Д1.

При проведении измерений и их обработки предполагается, что изменения в геометрии составного конвертора или свинцовой защиты не меняют форму ИХ откликов.

Исследование параметров математического восстановления временной формы импульсов метода линейных характеристик и получение результатов восстановления

ИХ канала искажает импульс излучения, приходящего на детектор, в соответствии с уравнением типа свертки:

$$\bar{f}(t) = f(t) * g(t) = \int_0^{t_i} f(\tau)g(t-\tau)d\tau, \quad (8)$$

где $f(t)$ – импульс излучения; $g(t)$ – ИХ канала регистрации; $\bar{f}(t)$ – зарегистрированный импульс с детектора – осциллограмма.

Восстановление импульсов сводится к решению уравнения (8). Восстановление произведено методом Тихонова. Метод восстановления информации о сигнале в достаточно общем виде основан на понятиях регуляризации решения и регуляризирующего оператора, введенных А. Н. Тихоновым. Под регуляризацией по Тихонову понимается построение семейства корректных задач, зависящего от параметра регуляризации и обладающего тем свойством, что при одновременном стремлении к нулю этого параметра и погрешности правой части уравнения, используемого при восстановлении, решение корректной задачи стремится к истинному решению соответствующей некорректной задачи. Используя восстановление методом Тихонова можно выбрать произвольную невязку, но рекомендуется выбирать наименьшую невязку, при которой еще не наблюдается значительной раскачки восстановленного сигнала.

Для восстановления использованы нормированные ИХ каналов метода МЛХ. ИХ каналов МЛХ приведены на рис. 6. Значения длительностей ИХ на половине амплитуды составляют: для отклика Д1 $\tau_{g1} = 18,74$ нс; для отклика Д2 $\tau_{g2} = 14,27$ нс. На рис. 7 приведены исходный и восстановленный импульсы отклика Д2 в рабочем режиме метода МЛХ. Восстановленный импульс по оси времени сдвигается назад.

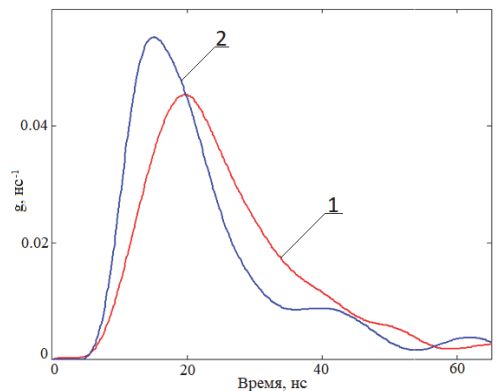


Рис. 6. Нормированные ИХ каналов откликов после нормировки: 1 – Д1, 2 – Д2

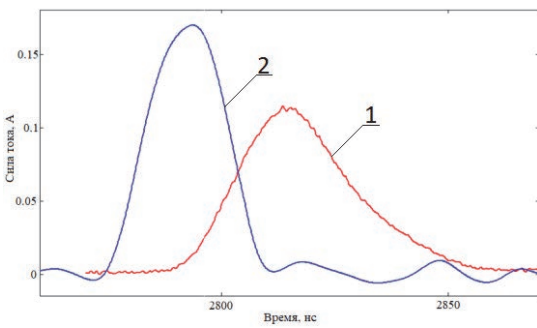


Рис. 7. Рабочие импульсы отклика Д2: 1 – исходный, 2 – восстановленный

Общий сдвиг восстановленных импульсов относительно аппаратурных вычисляется по следующей формуле:

$$\Delta t_{\text{фр}} = \Delta t_{\text{фр1}} - \Delta t_{\text{фр2}}, \quad (9)$$

где $\Delta t_{\text{фр1}}$ – сдвиг восстановленного импульса относительно аппаратурного для отклика Д1; $\Delta t_{\text{фр2}}$ – сдвиг восстановленного импульса относительно аппаратурного для отклика Д2.

Аппаратурные импульсы Д1 в рабочем режиме метода МЛХ имеют длительности на половине амплитуды, превышающие длительности импульсов Д2. Однако после проведения восстановления длительности импульсов Д1 становятся короче длительностей импульсов Д2. То есть длительность импульса, соответствующего плотности потока энергии квантов (ϕ_w) всегда короче длительности импульса, соответствующего плотности потока квантов (ϕ). По-видимому, это является общим свойством ускорителей.

Поскольку восстановленные импульсы по оси времени сдвигаются назад, то временные интервалы с учетом поправки считаются по следующей формуле:

$$T_{0,5} = T_{0,5 \text{ апп}} - \Delta t_{\text{фр}}. \quad (10)$$

Длительности восстановленных градуировочных импульсов сблизилась между собой по сравнению с длительностями аппаратурных импульсов. Это подтверждает выравнивание наклонов СХ двух откликов в градуировочном режиме.

Посчитаны временные интервалы с учетом временного сдвига восстановленных импульсов относительно аппаратурных: выбрано значение $T_{0,5} = (281,03 \pm 0,30)$ нс.

Вычисление и построение динамической зависимости средней энергии квантов тормозного излучения ЛИУ-30 и ее погрешности

При представлении СХ детекторов в линейном виде значение средней энергии квантов представляется формулой (3), где a_1, b_1, a_2, b_2 – коэффициенты линеаризации СХ первого и второго детектора.

В градуировочном режиме временные формы откликов максимально сближены, что позволяет более точно определять временной интервал между двумя откликами, в сравнении с рабочим режимом.

Восстановление временных импульсов метода МЛХ проведено в градуировочном режиме – для более точного определения временного интервала и рабочем режиме работы метода – собственно для определения средней энергии квантов. После этого проведено вычисление средней энергии квантов ТИ в динамике для нескольких импульсов в рабочем режиме метода.

При определении средней энергии в зависимости от времени параметр X – экспериментальное отношение зарядов (или токов) с детекторов заменяется на параметр $X(t)$, зависящий от времени (формула (5)).

Используя вычисленное значение временного интервала $T_{0,5} = (281,03 \pm 0,30)$ нс, полученное на полувысотах восстановленных градуировочных импульсов, произведен «сдвиг» первого импульса (F_w) по временной шкале назад, ко второму (F). На рис. 8 приведены восстановленные импульсы метода МЛХ в рабочем режиме.

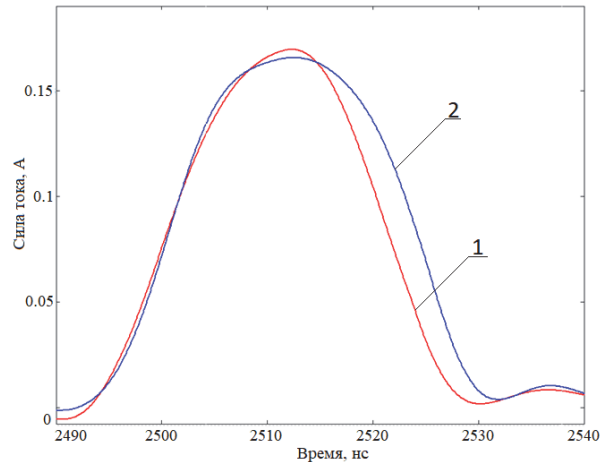


Рис. 8. Рабочие импульсы метода МЛХ после восстановления с учетом $T_{0,5}$: 1 – отклик Д1, 2 – отклик Д2

Как было отмечено ранее, после восстановления длительность на половине амплитуды импульса, соответствующего плотности потока энергии квантов (Д1 на рис. 8) всегда меньше длительности импульса, соответствующего плотности потока квантов (Д2 на рис. 8). Следствием этого свойства является то, что зависимость средней энергии квантов ТИ имеет колоколообразную форму.

Далее проведено поточечное деление амплитуды первого импульса на амплитуду второго импульса, получен параметр метода $X(t)$. После этого полученный параметр подставляется в формулу (3) и вычисляется динамическая зависимость средней энергии квантов ТИ ЛИУ-30.

Для расчета погрешности временной зависимости средней энергии квантов ТИ ЛИУ-30 нужно определить суммарную погрешность каждого импульса метода МЛХ, а затем вычислить полную погрешность, вследствие деления одного импульса на другой (для расчета средней энергии квантов ТИ).

На рис. 9 приведена временная зависимость средней энергии квантов ТИ ЛИУ-30 и ее относительная погрешность (в методе МЛХ нормирована погрешность средней энергии квантов при ее значениях более 1 МэВ).

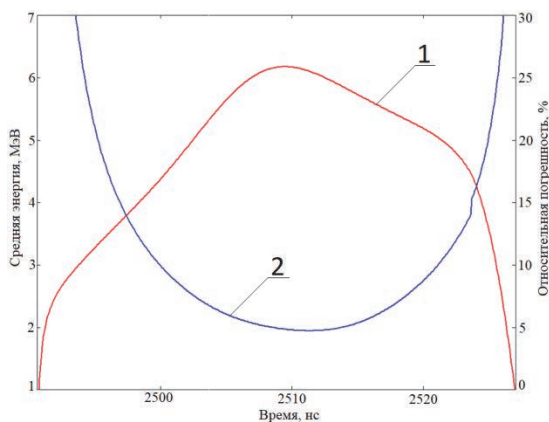


Рис. 9. Средняя энергия квантов ТИ ЛИУ-30 и ее относительная погрешность в динамике: 1 – временная зависимость, 2 – относительная погрешность

Использование результатов динамической зависимости средней энергии квантов ТИ

Как уже было сказано, временная зависимость средней энергии квантов ТИ может использоваться для уточнения показаний детекторов, измеряющих временные и мощностные характеристики поля ТИ ускорителя ЛИУ-30.

Априорно погрешность измерения длительности импульса ТИ на половине амплитуды (параметра $\tau_{0,5}$) принимается равной 10 %, что обусловлено неопределенностью спектрального состава ТИ. Ниже будет описан один из вариантов применения динамической зависимости средней энергии и возможность уточнения параметра $\tau_{0,5}$ на примере сцинтилляционного детектора СД2. Геометрия измерений с помощью детектора СД2 и осциллограммы импульсов с детектора СД2 приведены на рис. 10 и рис. 11 соответственно.

СХ детектора определялась расчетом по программе С-007 [7]. В качестве источников излучений задавались ускоренные электроны в тракте ускорителя, в соответствии с рис. 10. Ускоренные электроны создают кванты ТИ, которые в свою очередь вызывают вторичные электроны в поглотителе мишени. Поглотитель мишени предназначен для поглощения первичных ускоренных электронов ускорителя. Все эти процессы преобразования излучений в сквозной манере рассчитывались методом Монте-Карло.

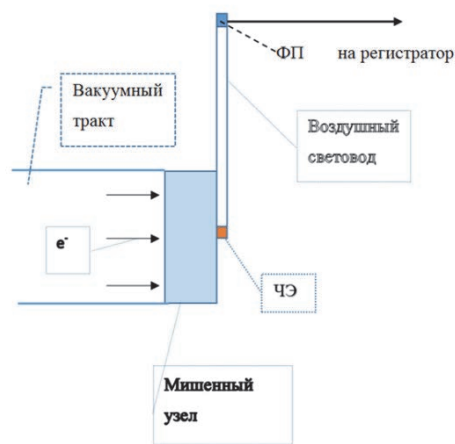


Рис. 10. Геометрия измерений с помощью детектора СД2

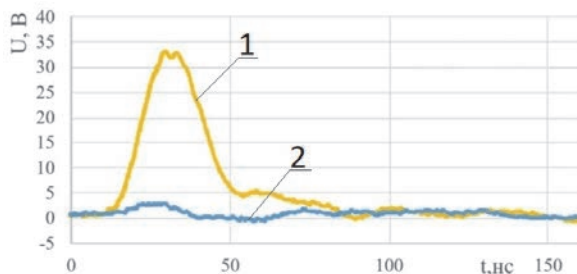


Рис. 11. Осциллограммы импульса с детектора СД2: 1 – с рабочего, 2 – с фонового

В результате расчетов определялась поглощенная энергия D в чувствительном элементе (ЧЭ) детектора. Пример полученной дозовой СХ приведен на рис. 12.

Так как на выходе из мишени ТИ имеет распределение по энергии, то СХ определялась в зависимости от средней энергии квантов ТИ.

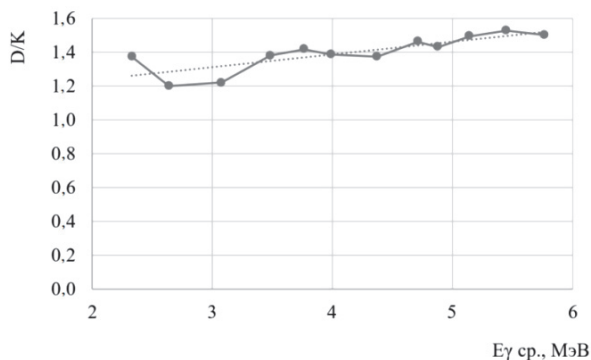


Рис. 12. Дозовая СХ детектора СД2

Далее используется временная зависимость средней энергии ТИ (см. рис. 13), при этом ток с детектора в процессе импульса корректируется по формуле:

$$I' = \frac{I}{\eta}, \quad (11)$$

где I – ток на осциллограмме; η – зависимость чувствительности детектора (рис. 12); I' – ток, скорректированный в соответствии с зависимостями $E_{ср}(t)$ и η .

В результате деления по формуле (11) получается временная зависимость воздушной дозы в месте установки детектора (скорректированный импульс, см. рис. 13). Изменение длительности импульса на половине амплитуды при этом составило 8 %.

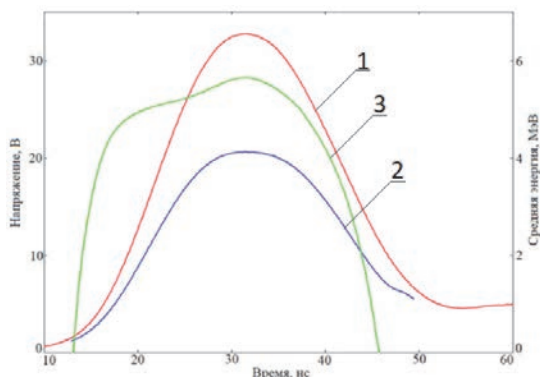


Рис. 13. Временные зависимости: 1 – исходный импульс сцинтилляционного детектора СД2, 2 – скорректированный импульс сцинтилляционного детектора СД2, 3 – средняя энергия квантов ТИ ЛИУ-30

Предполагается, что в скорректированном значении устранена погрешность влияния спектра ТИ на результат измерений с помощью детектора СД2.

При определении временной зависимости ТИ достаточно пользоваться зависимостью СХ детектора от $E_{ср}$ в относительном виде, приведенном на рис. 12. То есть в данном случае не нужно проводить абсолютную градуировку детекторов, в ходе которой определяется отклик детекторов в измеряемых величинах.

Значения средней энергии квантов ТИ можно использовать для уточнения показания детекторов в интегральном виде. При измерениях дозы используется зависимость СХ детектора и измеренное интегральное значение средней энергии. Но при этом необходимо проведение абсолютной градуировки детекторов.

Возможность улучшения временного разрешения каналов метода МЛХ

Улучшение временного разрешения каналов МЛХ возможно при замене элементов каналов на более быстродействующие. Перечень элементов каналов и возможные их замены приведены в табл. 2.

Также предлагается заменить волоконно-оптическую линию связи (ВОЛС) HFBR RUS500 длиной 55 м на ВОЛС КП такой же длины.

Предполагается, что каналы МЛХ в новом составе будут иметь временное разрешение порядка нескольких наносекунд. Это позволит улучшить точность измерения средней энергии в динамике.

Заключение

Отмечена необходимость использования спектрального состава квантов ТИ ускорителя ЛИУ-30 для уточнения результатов дозовых и мощностных измерений. В первом приближении это возможно на основе использования результатов измерения средней энергии квантов ТИ. На ЛИУ-30 реализован метод измерения средней энергии квантов ТИ с помощью двух детекторов с линейными спектральными характеристиками – метод МЛХ.

Проведена работа по определению средней энергии квантов ТИ в динамике (в зависимости от времени). Для этого выполнены следующие исследования и вычисления.

Проведены измерения ИХ откликов метода МЛХ с помощью установки Аргумент-1000. Проведено исследование параметров математического восстановления рабочих и градуировочных импульсов метода МЛХ. После восстановления длительность импульса на половине амплитуды, соответствующего плотности потока энергии квантов, меньше длительности импульса, соответствующего плотности потока квантов. По-видимому, это является общим свойством ускорителей. Нужно отметить значительное уменьшение отличия длительностей градуировочных импульсов после восстановления по сравнению с рабочими импульсами. Это обстоятельство отражает физическую сущность градуировки, связанную с выравниванием СХ двух откликов при ее проведении.

В качестве значения интервала T между импульсами выбрано его среднее значение между фронтами восстановленных импульсов при градуировочном режиме метода МЛХ: $T_{0,5} = (281,03 \pm 0,30)$ нс.

Вычислены и построены зависимости средней энергии квантов ТИ ЛИУ-30 и ее погрешности от времени для нескольких рабочих включений ЛИУ-30.

Таблица 2

Список компонентов каналов МЛХ

№	Исходные компоненты		Предлагаемые компоненты	
	Элемент	$\tau_{0,5}$, нс	Элемент	$\tau_{0,5}$, нс
1	Кабель РК-75-9-13, L ~250 м		Кабель РК-75-9-13, L ~30 м	$\leq 0,1$
2	ФЭУ СНФТ5	3,5	ФЭУ СНФ1, СНФ5	0,8÷1
3	Сцинтиллятор ПС стандартный	3÷5	Сцинтиллятор ПС СПС-Б16, СПС-Б18	0,2

Используя полученную временную зависимость средней энергии, скорректирован рабочий импульс со сцинтилляционного детектора СД2. Изменение длительности импульса на половине амплитуды при этом составило 8 %. Предполагается, что скорректированное значение не имеет погрешности, связанной со спектральным составом ТИ.

Для проведения динамических измерений средней энергии отмечена необходимость замены элементов канала МЛХ на более скоростные.

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., Горностай–Польский С. А., Завьялов А. Н. и др. Метод измерения средней энергии квантов тормозного излучения ускорителя ЛИУ-30. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2015. Вып. 20.

3. Веретенников А. И., Горбачев В. М., Предин Б. А. Методы исследования импульсных излучений. М.: Энергоатомиздат, 1985.

4. Патент №2470326 РФ МПК G01T 1/167 (2006.01). Способ градуировки относительных чувствительностей детекторов, предназначенных для регистрации характеристик жесткого гамма- или тормозного излучения / Грунин А. В., Лазарев С. А., Миронов Н. К. // Бюллетень изобретений. 2012. № 35.

5. Рабинович С. Г. Погрешности измерений. Ленинград: Энергия, 1978.

6. Завьялов Н. В., Канунов И. М., Полиенко Г. А., Хорошайло Е. С. Переносные импульсные рентгеновские аппараты «Аргумент-700» и «Аргумент-1000» с газовой изоляцией высоковольтных блоков. Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Саров: ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2005. Вып. 10. С. 80–87.

7. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов. ВАНТ. Сер. Матем. моделирование физ. процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.