

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ВЫХОДА ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСТАНОВКИ «ГАММА-4»

STUDY OF BREMSSTRAHLUNG YIELD DYNAMICS OF «GAMMA-4» FACILITY

*Н. К. Миронов, А. В. Грунин, С. А. Лазарев, К. В. Страбыкин, С. Ю. Пучагин,
Е. Н. Крылевский, А. А. Мищенко, А. Н. Залялов
N. K. Mironov, A. V. Grunin, S. A. Lazarev, K. V. Strabykin, S. Yu. Puchagin,
E. N. Krylevskii, A. A. Mishchenko*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,

пр. Мира, 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

Federal Nuclear Center of Russia – All-Russia Research Institute of Experimental Physics

Работа посвящена исследованию динамики выхода тормозного излучения (ТИ) установки «ГАММА-4». Основным методом получения динамических характеристик является технология сквозных расчетов по программам BEAM25, C-007. Программа BEAM25 используется для расчета формирования электронного пучка в тракте ускорителя и его характеристик на мишени. Программа C-007 используется для расчета методом Монте-Карло характеристик ТИ. В результате сквозных расчетов получены временные зависимости, в частности, пространственно-спектрального распределения потока энергии ТИ и мощности кермы в материалах с разными атомными номерами – Si, CdTe и т.д. Получены поверхности длительностей различных характеристик излучений. Получены различия в длительностях временных зависимостей различных спектральных составляющих ТИ установки «ГАММА-4». Так длительность импульса потока энергии излучения с энергией квантов $< 0,1$ МэВ оказалась на ~ 10 нс больше, чем длительность импульса потока энергии ТИ по всему спектру. Полученные результаты проверялись экспериментально с помощью детекторов с различными материалами чувствительных элементов (ЧЭ) и имеющих преимущественную чувствительность к разным спектральным диапазонам ТИ. Различие длительностей импульсов, полученных с помощью детекторов СППД10-01 (ЧЭ из CdTe) и СКД (ЧЭ из Si) составило 5–15 нс, что качественно согласуется с полученными расчетными данными.

The paper is devoted to a study of bremsstrahlung yield dynamics of «GAMMA-4» facility. The main method of obtaining dynamic characteristics is a calculation technology by programs BEAM-25, C-007. The program beam BEAM-25 is used for calculation of electron beam formation in the accelerator path and its characteristics on the target. The program C-007 is used for calculation of bremsstrahlung characteristics by Monte-Carlo method. As a result of calculations there were obtained time dependencies, particularly, space-spectral distribution of bremsstrahlung energy flux and kerma power in materials with different atomic numbers – Si, CdTe etc. Surfaces of durations of different radiation characteristics were obtained. Differences in durations of time dependences of different spectral components of «GAMMA-4» facility bremsstrahlung were obtained. Thus, the pulse duration of radiation energy flux with quantum energy $< 0,1$ MeV turned out to be by ~ 10 ns higher, than the pulse duration of total bremsstrahlung energy flux. The results obtained were checked experimentally with the aid of detectors with different materials of sensitive elements (SE) and possessing preferred sensitivity to different spectral bremsstrahlung ranges. The difference between pulse durations, obtained with the aid of semiconductor detectors SPPD10-01 (SE made of CdTe) and silicon detectors SKD (SE made of Si) was 10–15 ns, what qualitative agrees with obtained calculation results.

В течение нескольких последних лет во ВНИИЭФ проводятся работы по созданию мощной электрофизической установки «ГАММА» [1], предназначенной для исследования воздействия на вещество интенсивных потоков энергии ТИ. На завершившемся этапе работ был создан первый

ускорительный модуль установки – «ГАММА-1». Следующим этапом работ является создание установки «ГАММА-4», состоящей из четырех ускорительных модулей. Компоновка установки «ГАММА-4» приведена на рис. 1.

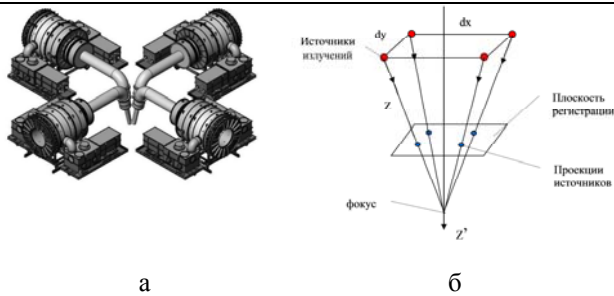


Рис. 1. а – Компонка установки из четырех модулей (а) и схема сложения излучений (б)

Электронный пучок, формируемый в вакуумном диоде ускорительного модуля, попадает на мишень и конвертируется в поток квантов ТИ. Исследование динамических характеристик излучения установки «ГАММА-1» проводилось с использованием технологии сквозных расчетов по программам ВЕАМ25 [2], С-007 (Монте-Карло)[3].

Параметры источника электронов рассчитывались по программе ВЕАМ25. Программа ВЕАМ25 основана на решении системы уравнений Максвелла и уравнения движения макрочастиц с помощью численного моделирования нестационарных электромагнитных процессов в аксиальносимметричных конструкциях. После вычислений по программе ВЕАМ25 (в прямолинейной геометрии) осуществлялось преобразование файлов с численными данными источников электронов для задания в программе Монте-Карло. Данная технология сквозных расчетов ранее была использована в работе [4].

Для проведения расчетов Монте-Карло задавалась геометрия выходной части ускорительного модуля, включающая часть магнитоизолированной линии, диод с мишенью из Та, фильтр электронов из полиэтилена и выходное окно из алюминия. В прилегающем к выходному окну воздушному пространству рассчитывались следующие величины: плотности потоков квантов и энергии; поглощенные дозы в воздухе и ряде материалов.

Нами проведена проверка выполнения в расчетных данных обратно-квадратичной зависимости флюенса энергии квантов от расстояния r до источника:

$$F_w = \frac{A}{r^2}, \quad (1)$$

где A – константа, F_w – флюенс энергии квантов.

Зависимость (1) преобразуется в следующее соотношение:

$$\frac{1}{\sqrt{F_w}} = \frac{1}{\sqrt{A}} r, \quad (2)$$

Выражение (2) представляет собой линейную зависимость, которая легко проверяется визуально на графике. На графике 2 приведены следующие зависимости:

$$f_1(r) = \frac{1}{\sqrt{F_w(r)}}; \quad f_2(r) = A'(r + \Delta r), \quad (3)$$

где Δr – расстояние от мишени до поверхности выходного окна.

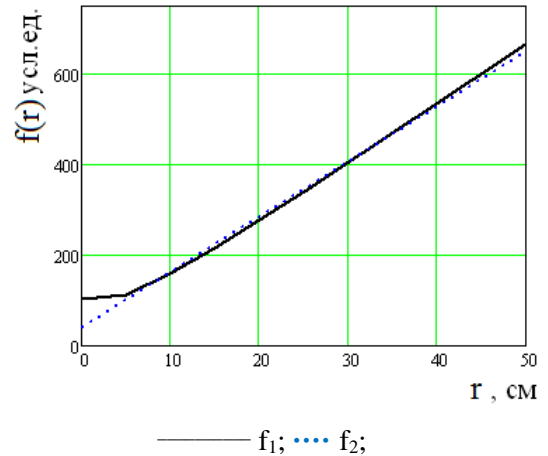


Рис. 2. Зависимости функций f_1 , f_2 (3) от расстояния до мишени

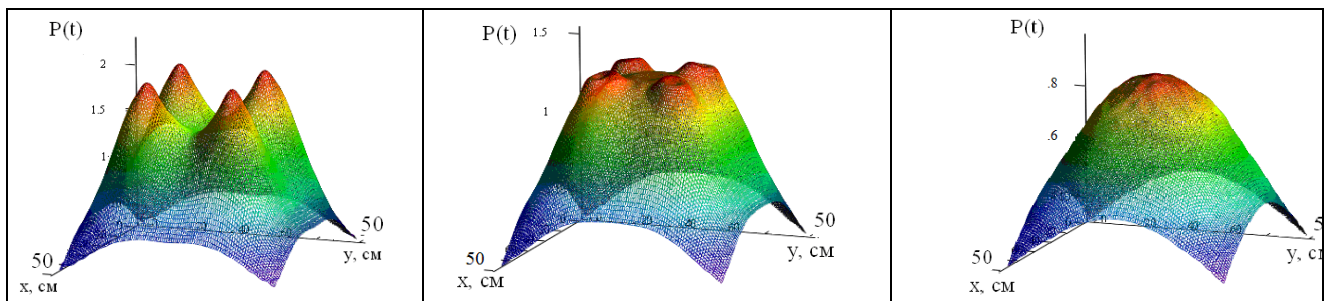
Две зависимости хорошо совпадают для расстояний $r \geq 5$ см. Для этих расстояний не проявляется пространственная структура источника, источник ТИ является точечным и для потоков и флюенсов выполняется зависимость $\sim 1/r^2$.

В расчетах Монте-Карло по программе С-007 для одного модуля нами определялись пространственно-спектрально-временные зависимости плотностей потоков энергии и поглощенных доз для определенного набора расстояний от мишени, как функции косинуса угла с осью Z и времени.

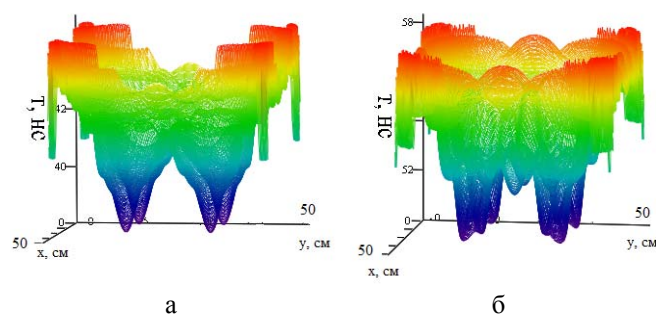
Сложение потоков излучений от четырех модулей, расположенных в соответствии с рис. 1, осуществлялось аналитически. При сложении плотностей потоков энергии или поглощенных доз от четырех модулей использовалась двумерная сплайн-интерполяция кубического типа рассчитываемых характеристик по косинусу угла с осью Z и времени. При этом вводилась поправка, учитывающая разные расстояния r от источника до плоскости измерений, на основе зависимости $1/r^2$.

На рис. 3 приведены примеры расчетных поверхностей мощности поглощенной дозы в кремнии в момент времени, близкий к моменту максимума импульса, для нескольких расстояний от источника.

Таблица 1

Состав и геометрия подкритических сборок (D_H, D_B – внешний и внутренний диаметр)Рис. 3. Поверхности мощности поглощенной дозы в кремнии в момент времени $t = 80$ нс для разных расстояний от источника

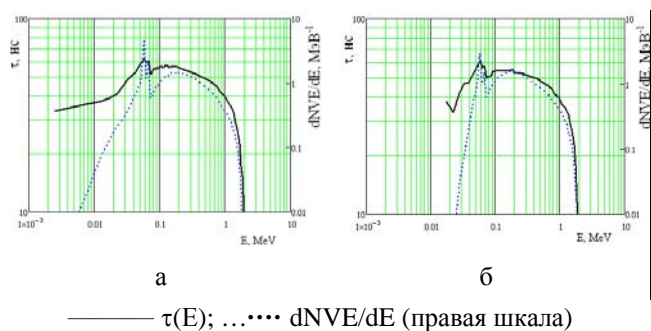
Видно, что проявления пиков от отдельных источников уменьшаются с ростом расстояния от источников и практически исчезают на расстоянии 25 см. На рис. 4 приведены поверхности длительности на полувысоте $\tau_{0.5}$ импульсов плотности потока энергии ТИ и плотности потока энергии квантов с $E < 0,1$ МэВ для расстояния $r = 10$ см от мишени.

Рис. 4. Поверхности длительностей импульсов $\tau_{0.5}$ двух характеристик ТИ, нс, на расстоянии 10 см от источника: а – плотность потока энергии ТИ; б – плотность потока энергии квантов с $E < 0,1$ МэВ

Из рисунка 4 видно, что на поверхностях длительностей наблюдаются впадины на местах, соответствующих проекциям источников. При этом длительность импульса плотности потока энергии излучения с энергией квантов $< 0,1$ МэВ на ~ 10 нс больше, чем длительность импульса плотности потока энергии ТИ. С ростом расстояния до плоскости регистрации проявляется тенденция к уменьшению разброса значений длительностей, $\Delta\tau/\tau$.

В экспериментах на установке «ГАММА-1» используются выходные алюминиевые окна толщиной 6–10 мм. Нами рассмотрены длительности временных зависимостей различных характеристик ТИ от энергии при разных толщинах алюминиевого фильтра. На рис. 5 приведены зависимости дли-

тельности плотности потока энергии квантов ТИ от энергии квантов в сравнении с дифференциальным спектром плотности потока энергии квантов ТИ.

Рис. 5. Зависимость длительности плотности потока энергии квантов ТИ от энергии квантов в сравнении с дифференциальным спектром плотности потока энергии квантов для разных толщин алюминиевого фильтра: а – $t = 0,1$ мм, б – $t = 6$ мм. Мишень Та 0,1 мм

Из рис. 5 следует, что представленные зависимости $\tau(E)$ для плотности потока энергии квантов имеют колоколообразный характер, также как и дифференциальный спектр плотности потока энергии. Видимо можно говорить о корреляции между значением спектра плотности потока энергии и динамикой плотности потока энергии. На обеих зависимостях $\tau(E)$, $dNVE/dE$ заметны пики, соответствующие характеристическому излучению тантала. Рост толщины алюминиевого поглотителя приводит к уменьшению значений в левой части спектра, но слабо влияет на правую часть спектра.

Для проверки полученных расчетных зависимостей длительностей импульса излучения от спектрального состава проведены измерения с помощью детекторов с существенно разными атомными номерами Z чувствительных элементов (ЧЭ). Как известно, коэффициент поглощения энергии μ_a

в области энергий квантов $< 0,1$ МэВ резко растет с ростом атомного номера, рис. 6.

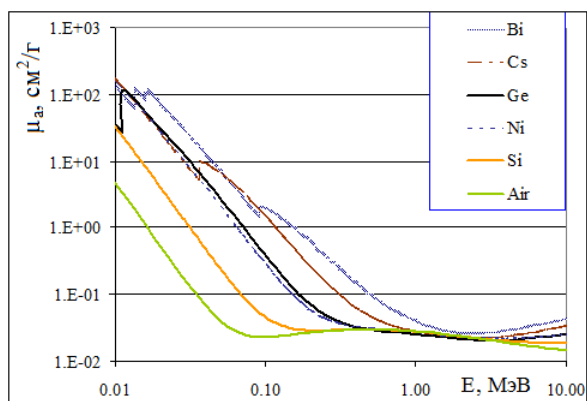


Рис. 6. Зависимости коэффициентов поглощения энергии квантов μ_a в разных материалах от энергии квантов

Поэтому детекторы с легкими ЧЭ более чувствительны к жесткой составляющей спектра ТИ, а детекторы с тяжелым ЧЭ более чувствительны к мягкой составляющей спектра ТИ. Для проведения измерений выбрано два детектора – СКД1 с ЧЭ из Si ($Z = 14$) и СППД10-01 с ЧЭ из CdTe ($Z_{cp} = 50$). Оба типа детекторов изготовлены во ВНИИА. В детекторе СППД10-01 использована технология порошковой металлургии. Основные характеристики детекторов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Основные характеристики детекторов СППД10-01, СКД1

Детектор	Материал ЧЭ	Лин. ток I_n , А	$\tau_{0,5}$, нс
СППД10-01	CdTe	0,5	0,4
СКД1	Si	4	2

Нами был проведен расчет кермы в материалах детекторов по следующей формуле:

$$D = \sum_i \Delta F_{wi} \cdot \mu_{ai}, \quad (4)$$

где ΔF_{wi} – групповые флюенсы энергии квантов.

Расчет кермы удобен тем, что в программе С-007 задана возможность расчета линейной суммы потоков энергии квантов с отдельной задаваемой функцией энергии $\mu_a(E)$. При этом не надо задавать специально геометрию разных детекторов, для которых расчет поглощенной дозы достаточно длителен из-за малых размеров ЧЭ. Расчет кермы по формуле (4) не связан с конкретными

размерами ЧЭ детектора. Это является достоинством, но и одновременно некоторым упрощением данных расчетов.

Нами были проведены расчеты кермы в ЧЭ детекторов с учетом наличия алюминиевых выходных окон для проверки сохранения различий в длительностях откликов детекторов. В табл. 2 приведены значения разности длительности мощности кермы на уровне 0,5 максимальной амплитуды для двух материалов – Si и CdTe. Кроме танталовой мишени рассматривалась также мишень из железа.

Таблица 2

Значения разностей длительностей импульсов мощности кермы в материалах (CdTe-Si) при разных толщинах алюминиевого окна и разных мишенях

Мишень	$\Delta\tau(\text{CdTe-Si})$, нс, для разных толщин алюминиевых окон, мм			
	0,1 мм	2 мм	6 мм	10 мм
Ta 100 мкм	6,12	7,90	8,61	–
Fe 1 мм	3	3,5	4,1	4,3

Результаты расчетов, приведенные в табл. 2, могут быть пояснены на основе анализа рис. 5. При толщинах алюминиевого слоя порядка единиц сантиметров «съедается» только начальная мягкая часть спектра с относительно малыми длительностями. При этом разность длительностей $\Delta\tau(\text{CdTe-Si})$, нс, растет с толщиной алюминия, или, по крайней мере, не уменьшается. Это обстоятельство позволяет надеяться на регистрацию разности длительностей импульсов с двух детекторов – СППД10-01 и СКД1.

При переходе с танталовой мишени на железную максимумы зависимостей рисунка 5 сдвигаются в сторону больших энергий, для которых разница в коэффициентах $\mu_a(E)$ двух материалов становится меньше. Вследствие этого расчетные значения разности длительностей $\Delta\tau(\text{CdTe-Si})$ для железной мишени уменьшаются примерно в два раза.

Перед проведением измерений на ускорителе «ГАММА-1» была проведена проверка работоспособности детекторов на ускорителе «Аргумент-1000» [5]. Длительность основного импульса ТИ ускорителя составляет по паспортным данным 2,5 нс, однако в излучении ускорителя присутствует также второй импульс меньшей амплитуды. Примеры осциллограмм с откликами детекторов приведены на рис. 7.

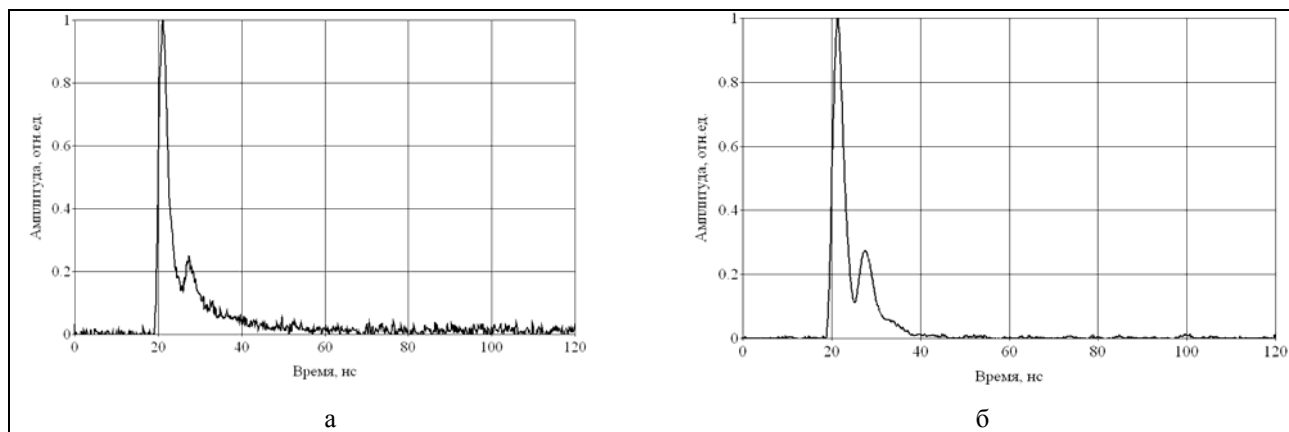


Рис. 7. Осциллограммы с откликами детекторов на излучение «Аргумент-1000»: а – СППД10-01. Фильтр 2 мм Pb, защита свинцом. $\tau_{0,5} = 2,5$ нс; б – СКД1. Нет свинцовой защиты. $\tau_{0,5} = 2,9$ нс

Детекторы СППД10-01 помещались в свинцовую защиту. При установке перед данными детекторами свинцовой фольги толщиной 2 мм длительность отклика детектора на полувысоте уменьшалась с 3,7 нс до 2,5 нс. Это говорит о наличии в излучении ускорителя «Аргумент-1000» мягкой компоненты и о чувствительности детекторов к этой компоненте.

В отклике детектора СППД10-01 заметен затянутый спадающий участок. То есть импульсная характеристика (ИХ) детекторов СППД10-01 состоит из двух составляющих. Первая – быстрая составляющая с длительностью ≤ 1 нс. Вторая – медленная составляющая с длительностью ≥ 100 нс. Возможно, что наличие медленной компоненты связано с технологией порошковой металлургии, обуславливающий более медленный сбор зарядов в ЧЭ. В связи с наличием медленной компоненты нами были проведены расчеты искажения импульса установки «ГАММА-1», используя уравнение типа свертки:

$$\hat{P}(t) = \int_0^t P(t) \cdot g(t - \tau) \cdot d\tau, \quad (5)$$

где $g(t)$ – ИХ детекторов СППД10-01, $P(t)$, $\hat{P}(t)$ – исходная и регистрируемая детектором временная зависимость излучения установки.

В качестве ИХ детекторов взят отклик на излучение «Аргумент-1000». Уширение импульса ускорителя «ГАММА-1» с длительностью на полувысоте ~ 50 нс обусловлено в основном медленной составляющей ИХ. Относительное уширение импульса установки «ГАММА-1» детекторами СППД10-01 по сравнению с детектором СКД1 составляет

$$\Delta\tau_{ИХ} = 4 \div 4,5 \text{ нс}. \quad (6)$$

В целом разность длительностей импульсов детекторов СППД10-01 и СКД1 описывается следующей формулой:

$$\tau_{СППД10-01} - \tau_{СКД1} = \Delta\tau_{ИХ} + \Delta\tau, \quad (7)$$

где $\Delta\tau_{ИХ}$ – уширение импульса за счет присутствия в ИХ затянутого спадающего участка; $\Delta\tau$ – уширение импульса, связанного с различной динамикой выхода спектральных диапазонов ТИ ускорителя «ГАММА-1».

В измерениях на установке «ГАММА-1» использовались два детектора СППД10-01 и один детектор СКД1. Регистрация импульсов с детекторов производилась с помощью цифровых осциллографов TDS (полоса пропускания 0,5 ГГц) и LeCroy (полоса пропускания 1 ГГц). Пример осциллограммы с двух детекторов приведен на рис. 8.

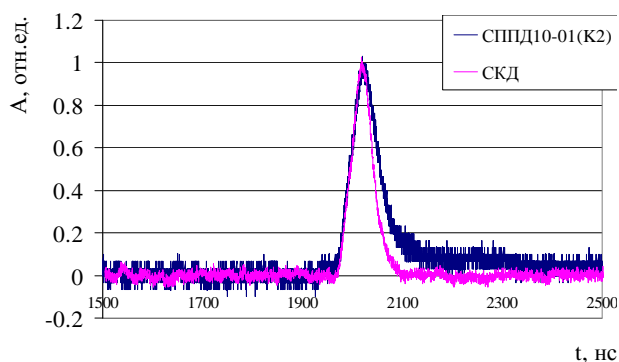


Рис. 8. Осциллограммы импульсов с детекторов установки «ГАММА-1»

На осциллограммах произведено смещение импульсов по временной шкале с целью совмещения передних фронтов. Видно, что длительность

Таблица 3

Значения экспериментальных разностей длительностей откликов двух детекторов в сравнении с расчетными данными, а также параметры работы ускорителя «ГАММА-1» (ФЛ – формирующая линия, r – расстояние установки детекторов)

№ импульса	U, МВ на ФЛ	Мишень	r, см СКД1	r, см СППД10-01	$\Delta\tau(\text{CdTe-Si}), \text{нс}$		
					Расчет	Эксперимент	Эксперимент. Вычет поправки $\Delta\tau_{\text{ИХ}}$
1 (9.10.2015)	1,0	Ta 0,1мм +21ммCH ₂	135	70	9	18±5	14±5
2 (26.10.2015)	0,78	Fe 1мм +21мм CH ₂	130	130	4.3	9±2	5±2
3 (30.10.2015)	0,9	—	130	130	4.3	19,9±4	15,9±4

импульсов детекторов СППД10-01 больше, чем длительность импульсов детекторов СКД1. Для определения экспериментальной разницы в длительностях мощности кермы двух детекторов следует учесть влияние ИХ детекторов на основе соотношений (6), (7).

На рис. 9 приведены экспериментальный и расчетный отклик детекторов СППД10-01 на излучение установки «ГАММА-1». Расчетный отклик получен вычислением интеграла свертки (5) расчетного импульса установки «ГАММА-1» с ИХ детекторов СППД10-01.

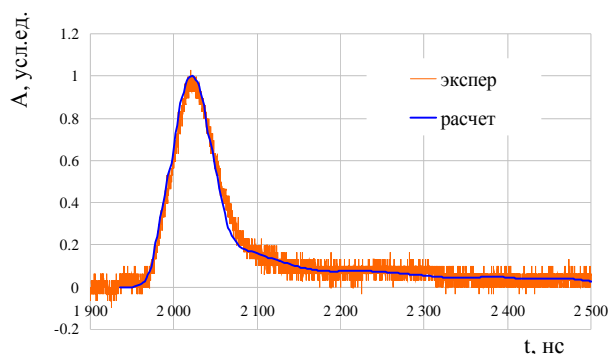


Рис. 9. Сравнение экспериментального и расчетного отклика детекторов СППД10-01 на излучение установки «ГАММА-1»

Из рис. 9 следует, что два отклика – экспериментальный и расчетный достаточно хорошо совпадают.

Экспериментальные и расчетные значения разностей длительностей откликов детекторов СППД10-01 и СКД1 приведены в табл. 3 вместе с данными по режимам работы ускорителя «ГАММА-1».

Можно говорить о совпадении расчетных и экспериментальных данных для двух импульсов из трех – № 1 и 2. В импульсе № 3 отличие расчетных

и экспериментальных значений превышает погрешность измерений. Но в целом можно сделать вывод о качественном совпадении расчетных и экспериментальных данных.

Список литературы

1. Гордеев В. С., Мысков Г. А., Михайлов Е. С., Лаптев Д. В. Проект сильноточного ускорителя электронов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. Научно-исследовательское издание. Вып. 3. – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002. – С. 176–183.

2. Gordeev V. S. et.al. BEAM25 – program for numerical simulation of the processes of high-current electron beams shaping, acceleration and transportation // ВАНТ. Серия: Ядерно-физические исследования. 2001. Вып.39. С. 30–32.

3. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П., Горбунов А. В., Залялов А. Н., Иванов Н. В., Малькин А. Г., Рослов В. И., Семёнова Т. В., Субботин А. Н. Методика С-007 решения методом Монте-Карло связанных линейных уравнений переноса нейтронов, гамма-квантов, электронов и позитронов // ВАНТ Сер. Математическое моделирование физических процессов. 2011. Вып. 1. С. 17–24.

4. Лазарев С. А., Гордеев В. С., Донской Е. Н., Залялов А. Н., Михайлов Е. С., Ткачук Д. В. Расчет динамики поля сильноточных ускорителей электронов // Труды РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2015. Вып. 20. Ч.1. С.194–205.

5. 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, выпуск 10.– С.80–87.