

УДК 539.1.03(621.384.6+533.9.07:533.952)

Оценка дозовых параметров излучения электрофизической установки «Гамма-4»

**Н. В. Завьялов, В. С. Гордеев,
С. Ю. Пучагин, А. Л. Мозговой,
А. В. Гришин, К. В. Страбыкин,
Д. О. Мансуров, М. А. Моисеевских,
Е. С. Бердников**

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается электрофизическая установка «Гамма-4» (2,0 МВ, 3,0 МА, 6,0 ТВт). На первом этапе установку предполагается использовать в режиме, когда все модули полностью автономны и каждый работает на свой вакуумный диод. Параметры излучения установки можно оценить по параметрам излучения ее отдельного модуля. Показано, что экспериментальные данные, полученные на отдельном модуле, с относительной погрешностью 13 % описываются полем излучения точечного косинусоидального источника. Проведена реконструкция пространственного распределения экспозиционной дозы тормозного излучения установки «Гамма-4».

Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается электрофизическая установка «Гамма-4» (2,0 МВ, 3,0 МА, 6,0 ТВт), предназначенная для генерации мощных импульсов тормозного излучения (ТИ) длительностью ~ 50 нс. Установка будет состоять из четырех однотипных ускорительных модулей, выполненных на основе сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» [1, 2]. На первом этапе установку предполагается использовать в режиме, когда все модули полностью автономны и каждый работает на свой вакуумный диод. В данном режиме работы результирующее поле излучения установки определяется как суперпозиция полей излучения, генерируемых ее отдельными модулями. Таким образом, задача оценки параметров для поля излучения четырехмодульной установки сводится к задаче построения математической модели, описывающей поле излучения одного модуля, и использования затем этой модели для реконструкции поля излучения многомодульной установки.

Математическая модель

В работе [3] в результате анализа расчетов методом Монте-Карло была показана возможность построения аналитических моделей, описывающих пространственное распределение, по крайней мере, для трех интегральных по времени характеристик поля ТИ, формируемого сильноточным импульсным ускорителем электронов «Гамма-1» – экспозиционной дозы, поглощенной дозы в кремнии и флюенса энергии излучения. Указанные характеристики удовлетворительно описываются полем точечного источника, смещенного на некоторое расстояние по оси симметрии относительно центра мишени ускорителя. Для описания пространственного распределения перечисленных характеристик поля была использована зависимость

$$D(\theta, r) = A_0 (\cos \theta)^\alpha e^{-\mu r} / r^\beta, \quad (1)$$

где A_0 – нормировочный множитель, (θ, r) – координаты точки наблюдения в полярной системе координат, связанной с центром мишени ускорителя, α, β, μ – свободные параметры.

В данной формуле сомножитель $(\cos \theta)^\alpha$ является показателем изотропии излучения. Сомножитель $1/r^\beta$ выражает зависимость физической величины D от расстояния до точки наблюдения. Как показали результаты расчетов, эта зависимость близка к классической, т. е. $\beta \approx 2,0$. Сомножитель $e^{-\mu r}$ выражает затухание физической величины D при отдалении от источника. Значение коэффициента затухания μ оказывается чрезвычайно малым, так что данный сомножитель оказывается близким к единице. Согласно результатам расчетов методом Монте-Карло [3], максимальное значение погрешности интерполяционной формулы (1) на расстоянии от мишени 10 см составляет 12 %. В диапазоне расстояний от мишени от 15 до 100 см максимальное значение погрешности интерполяционной формулы (1) не превышает 6 %.

Постановка экспериментов

Для получения экспериментальных данных о пространственном распределении дозы ТИ была проведена серия включений ускорителя «Гамма-1». Конфигурация ускорителя в этих включениях была следующей: к выходу формирующей системы ускорителя пристыковывалась водяная передающая линия с диаметром внешнего электрода 1,6 м и волновым сопротивлением 2,9 Ом; выходная часть ускорителя состояла из ускорительной трубки с секционированным вакуумным изолятором диаметром 0,8 м и сильноточного вакуумного диода (рис. 1).

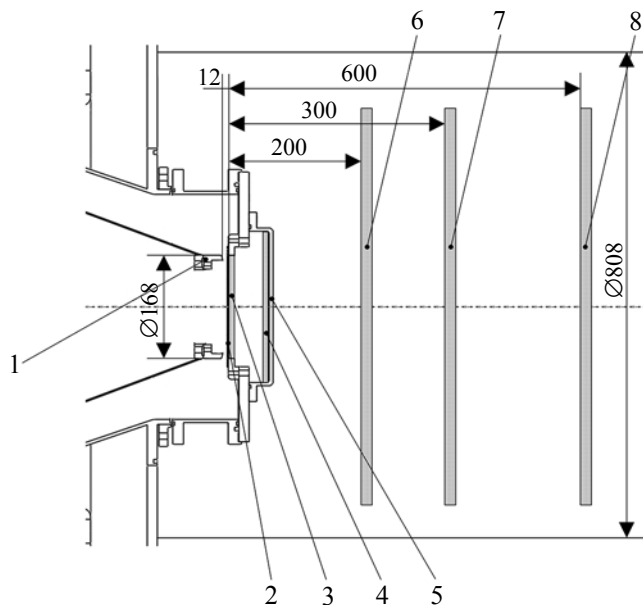


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – катод; 2 – мишень; 3, 4 – фильтр деградированных электронов; 5 – алюминиевая крышка; 6, 7, 8 – матрицы дозиметров ИКС

В качестве нагрузки использовался сильноточный вакуумный пинч-диод с полым кольцевым катодом 1 и плоским анодом-мишенью 2. Диаметр эмитирующей кромки катода из нержавеющей стали составлял 168 мм. Ускоряющий зазор между эмитирующей кромкой катода и мишенью составлял 12 мм. В качестве мишеней использовались диски из танталовой фольги диаметром 180 мм, толщиной 0,1 мм. В качестве фильтра деградированных электронов использовались два диска 3, 4 из полиэтилена толщиной 6 мм каждый. Для защиты матрицы с детекторами от металлических осколков мишени были установлены дополнительно несколько слоев кевларовой ткани. Излучение выводилось через алюминиевую крышку 5 толщиной 6 мм в биологическую защиту, представляющую собой цилиндр из свинца с диаметром полости 0,8 м. В биологической защите на расстоянии 200, 300 и 600 мм вдоль оси ускорителя устанавливались матрицы с дозиметрами ИКС в стандартных корпусах 6, 7, 8 для измерения экспозиционной дозы ТИ в различных точках пространства. Всего в рамках данной работы было проведено 5 включений ускорителя. В первых четырех включениях были получены достаточно стабильные результаты по дозе ТИ, в пятом включении из-за электрических пробоев в ускорительной трубке доза была существенно ниже. Поэтому для определения параметров модели использовались экспериментальные данные, полученные в первых четырех включениях ускорителя.

Результаты экспериментов

В результате проведенных экспериментов были получены данные о пространственном распределении экспозиционной дозы ТИ ускорителя «Гамма-1». На рис. 2 представлены экспериментальные данные (точки) и их аппроксимация по формуле (1). Параметры A_0 , α , β определялись методом наименьших квадратов.

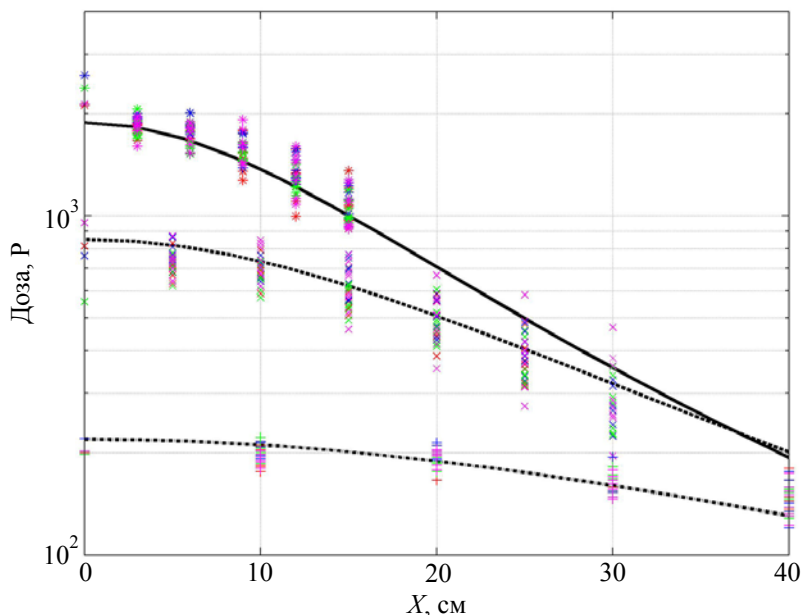


Рис. 2. Распределение экспозиционной дозы ТИ в плоскостях 20 (—), 30 (---) и 60 (- · -) см от мишени (точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимация) (см. цветную вкладку)

В результате вычислений были получены следующие значения параметров модели: $A_0 = (6,62 \pm 0,29) \cdot 10^5$ [Р·см^β], $\alpha = 0,87 \pm 0,06$, $\beta = 1,96 \pm 0,01$.

Относительная погрешность экспериментальных данных (1σ) составила ~13%. Экстраполяция полученных результатов на ближнюю к мишени зону показывает, что на облучательной позиции 15 см от мишени ускорителя максимальная доза составляет $3,3 \pm 0,2$ кР, площадь пятна облучения с неоднородностью по дозе 50 % составляет 440 ± 15 см².

Реконструкция полей излучения установки «Гамма-4»

Модель, описывающая пространственное распределение экспозиционной дозы ТИ, генерируемого одним модулем, использовалась для реконструкции поля излучения установки «Гамма-4». В установке «Гамма-4» диоды модулей располагаются в центрах квадрата со стороной 25 см (рис. 3). Энергия подводится к диодам по цилиндрическим магнитоизолированным линиям (МИПЛ), при этом угол между осью МИПЛ и нормалью к плоскости матрицы диодов составляет 18°. Диоды фокусируют свое излучение на ось системы на расстоянии 54 см от плоскости матрицы.

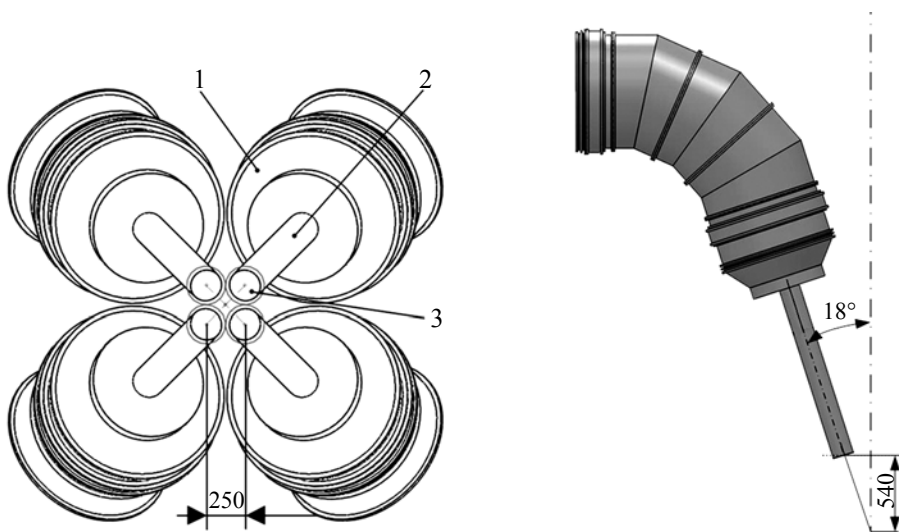


Рис. 3. Расположение излучателей установки «Гамма-4»: 1 – ускорительная трубка, 2 – магнитоизолированная передающая линия, 3 – вакуумный диод

Для определения параметров излучения установки «Гамма-4» был проведен численный эксперимент, в котором, используя значения стандартных отклонений параметров модели, полученных выше, была смоделирована 1000 импульсов установки «Гамма-4». На облучательной позиции 15 см от мишеней модулей значения экспозиционных доз ТИ составили $5,2 \pm 0,2$ кР, площади пятен облучения с неоднородностью 50 % – 1950 ± 30 см².

На рис. 4,а показано распределение экспозиционной дозы ТИ в плоскости, проходящей через общую ось симметрии. В ближней зоне пятно с неоднородностью 50 % состоит из четырех отдельных участков. По мере отдаления от плоскости излучателей они сливаются в единое пятно.

На рис. 4,б показано распределение экспозиционной дозы ТИ в плоскости наблюдения, перпендикулярной к общей оси симметрии установки, на расстоянии 15 см от мишеней.

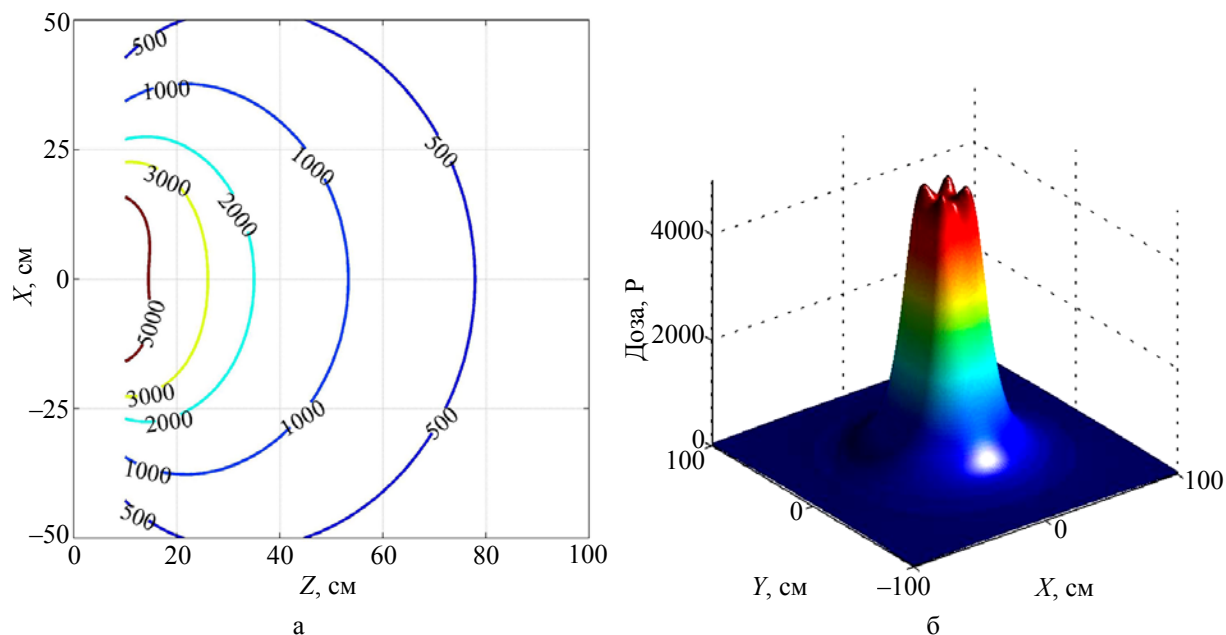


Рис. 4. Пространственное распределение экспозиционной дозы ТИ установки «Гамма-4»: а – в осевой плоскости; б – в плоскости, перпендикулярной оси симметрии, на расстоянии 15 см от мишени (см. цветную вкладку)

Выводы

По данным, полученным в экспериментах на сильноточном импульсном ускорителе электронов «Гамма-1», выполнены оценки параметров пространственного распределения поля экспозиционной дозы ТИ установки «Гамма-4». В результате показано, что на позиции 15 см от матрицы диодов модулей, в режиме фокусировки излучения, на установке реализуется поле облучения с максимальным значением экспозиционной дозы ТИ $5,2 \pm 0,2$ кР на площади (1950 ± 30) см² при неоднородности 50 %.

Список литературы

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. и др. Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» // XII научные Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии (сборник докладов). – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2010. С. 49–54.
2. Гордеев В. С., Гришин А. В., Назаренко С. Т. и др. Результаты экспериментальных исследований системы передачи энергии типового модуля установки «Гамма» // XIV научные Харитоновские чтения. Мощная импульсная электрофизика (сборник докладов). – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ. 2013. С. 112–117.

3. Лазарев С. А., Гордеев В. С., Донской Е. Н. и др. Расчет динамических характеристик поля тормозного излучения сильноточных ускорителей электронов // Сборник докладов IX межотраслевой конференции по радиационной стойкости. – Снежинск. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИТФ». 2010. Т. 1. С. 278–287

Evaluation of dose output of pulsed power facility «Gamma-4»

N. V. Zavyalov, V. S. Gordeev, S. Yu. Puchagin, A. L. Mozgovoy, A. V. Grishin,
K. V. Strabykin, D. O. Mansurov, M. A. Moiseevskikh, E. S. Berdnikov

Pulsed power facility «Gamma-4» (2.0 MV, 3.0 MA, 6 TW) aimed at generation powerful bremsstrahlung pulses with duration 50 ns is now being built at RFNC-VNIIEF, Sarov, Russia. At first stage the facility will be used in the mode when four its modules work onto autonomous pinch-diode loads. In this case the radiation field generated by facility is determined as the sum of fields generated by its modules. And its dose output can be evaluated on the base of experimental data obtained on one module. It was shown that accuracy of approximation of these experimental data by point source field with cosine angle distribution is about 13 %. Using obtained model the reconstruction of exposure dose distribution generated by four-module facility was made.