

## 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. Мусеевских, Е. С. Бердников*

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
пр. Мира 37, Саров, Нижегородская область, 607188, Россия

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. На первом этапе установку предполагается использовать в режиме, в котором все модули полностью автономны и каждый работает на свой вакуумный диод. В этом случае результирующее поле излучения установки определяется как суперпозиция полей излучения ее модулей. Параметры излучения установки можно оценить по параметрам излучения ее отдельного модуля.

В рамках данной работы в 5 включениях ускорителя «Гамма-1» измерялись экспозиционные дозы ТИ в плоскостях 20, 30 и 60 см от мишени ускорителя. Показано, что экспериментальные данные с относительной погрешностью 13 % описываются полем излучения точечного косинусоидального источника. С использованием полученной модели была проведена реконструкция пространственного распределения экспозиционной дозы ТИ установки «Гамма-4» с учетом расположения и пространственной ориентации ее излучателей. Приводятся значения экспозиционных доз ТИ и площадей пятен облучения на позиции 15 см от мишеней модулей.

### Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создается электрофизическая установка «Гамма-4» (2,0 МВ, 3,0 МА, 6,0 ТВт), предназначенная для генерации мощных импульсов ТИ длительностью ~50 нс. Установка будет состоять из четырех однотипных ускорительных модулей, выполненных на основе высокопоточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» [1,2]. На первом этапе установку предполагается использовать в режиме, в котором 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 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 высокопоточным импульсным ускорителем электронов «Гамма-1» – экспозиционной дозы, поглощенной дозы в кремнии и флюенса энергии СЖР 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 вида:

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

где  $A_0$  – нормировочный множитель,  $(\theta, r)$  – координаты точки наблюдения в полярной системе координат, связанной с центром мишени ускорителя,  $\alpha, \beta, \mu$  – свободные параметры.

В данной формуле множитель  $(\cos \theta)^\alpha$  является показателем изотропии излучения. Множитель  $1/r^\beta$  выражает зависимость физической величины  $D$  от расстояния до точки наблюдения. Как показали результаты расчетов, эта зависимость близка к классической, т.е.  $\beta \approx 2,0$ . Множитель  $e^{-\mu r}$  выражает затухание физической величины  $D$  при отдалении от источника. Значение

коэффициента затухания  $\mu$  оказывается чрезвычайно малым, так что данный множитель 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 была пристыкована 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).

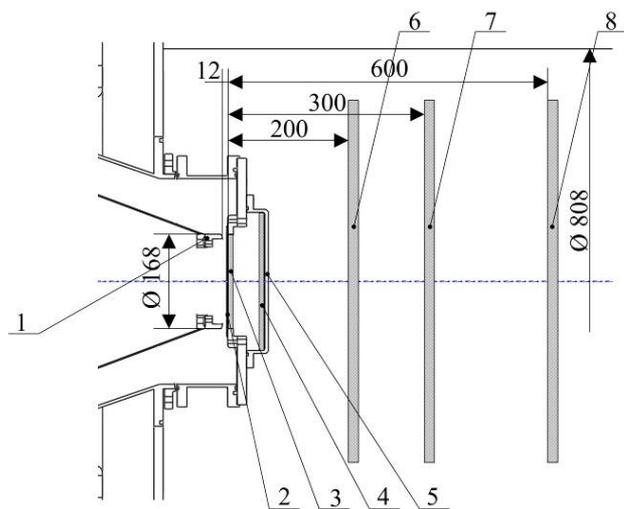


Рис. 1. Схема эксперимента: 1 – катод, 2 – мишень, 3,4 – фильтр деградированных электронов, 5 – алюминиевая крышка, 6, 7, 8 – матрицы дозиметров ИКС

В качестве нагрузки использовался сильноточный вакуумный пинч-диод с полым кольцевым катодом (поз. 1) и плоским анодом-мишенью (поз. 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 из полиэтилена (поз. 3, 4) 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 (поз. 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 (поз. 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  $A_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  определялись методом наименьших квадратов.

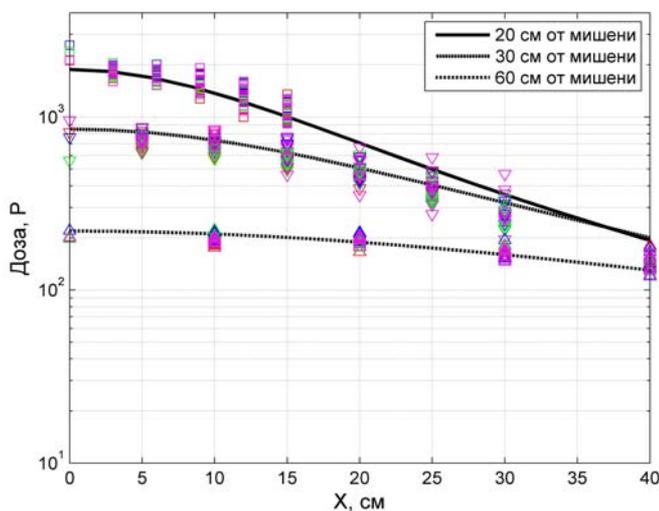


Рис. 2. Распределение экспозиционной дозы ТИ в плоскостях 20, 30 и 60 см от мишени (точки – экспериментальные данные, линии – аппроксимация)

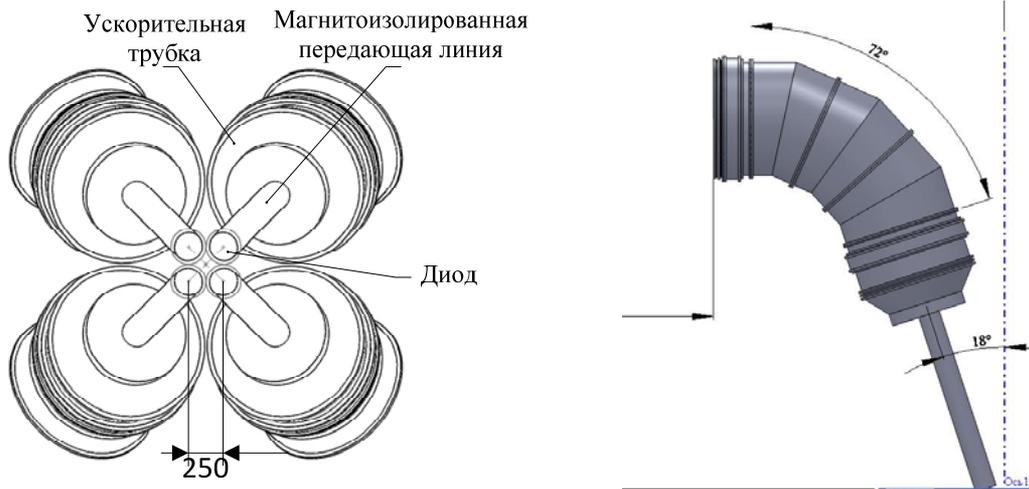


Рис. 3. Расположение излучателей установки «Гамма-4»

В результате вычислений были получены следующие значения параметров формулы (1):

$$A_0 = (6,62 \pm 0,29) \cdot 10^5 [P \cdot \text{см}^{\beta}],$$

$$\alpha = (0,87 \pm 0,06),$$

$$\beta = (1,96 \pm 0,01).$$

Относительная погрешность экспериментальных данных ( $1\sigma$ ) составила  $\sim 13\%$ . 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  $(440 \pm 15)$  см<sup>2</sup>.

### 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 (см. рис. 3). Энергия подводится к диодам по цилиндрическим магнитоизолированным линиям, 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.

Для определения параметров излучения установки «Гамма-4» был проведен численный эксперимент, в котором, используя значения стандарт-

ных отклонений параметров модели, полученных выше, были смоделированы 1000 импульсов установки «Гамма-4». На рис. 4 показаны значения экспозиционных доз ТИ и площади пятен облучения в этих импульсах. 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 % –  $(1950 \pm 30)$  см<sup>2</sup>.

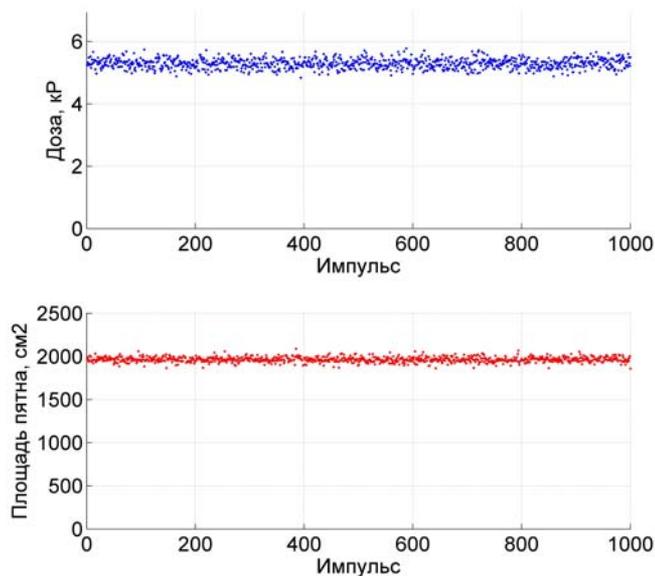
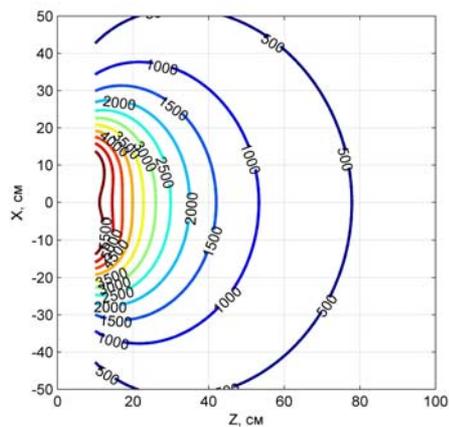
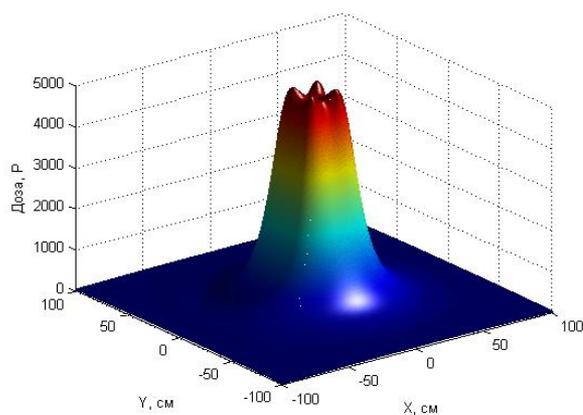


Рис. 4. Параметры излучения установки «Гамма-4» в численном эксперименте (1000 импульсов)



а



б

Рис. 5. Пространственное распределение экспозиционной дозы ТИ установки «Гамма-4»

На рис. 5а 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. 5б показано распределение экспозиционной дозы ТИ в плоскости наблюдения, перпендику-

лярной к общей оси симметрии установки, на расстоянии 15 см от мишеней.

## 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  $(1950 \pm 30)\text{см}^2$  при неоднородности 50 %.

## Список литературы

1. Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф. Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов «Гамма-1» // XII научные Харитоновские чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии 19–23 апреля 2010 г. (сборник докладов). Саров: ФГУП «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. 12–16 марта 2012 г. (сборник докладов). Саров: ФГУП «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». 12–15 октября 2010 г. т. 1. С.278–287.