

УДК 539.1.03(621.384.6+533.9.07:533.952)

## ОЦЕНКА 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

Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики,  
607188 Саров, Россия

E-mails: zavyalov@expd.vniief.ru, gordeev@expd.vniief.ru, Sergey.Puchagin@cern.ch,  
mozgovo@expd.vniief.ru, grishin@expd.vniief.ru, strabykin@expd.vniief.ru,  
mansurov@expd.vniief.ru, moiseevskikh@expd.vniief.ru, berdnikov@expd.vniief.ru

Приведены результаты измерения параметров излучения электрофизической установки “Гамма-4”, предназначенной для генерации мощных импульсов тормозного излучения длительностью  $\approx 50$  нс. Проведено пять включений ускорителя “Гамма-1”, в ходе которых измерены экспозиционные дозы тормозного излучения на расстояниях от мишени ускорителя, равных 20, 30 и 60 см. Показано, что экспериментальные данные соответствуют полю излучения точечного косинусоидального источника с относительной погрешностью 13 %. Восстановлено пространственное распределение экспозиционной дозы тормозного излучения установки “Гамма-4” с учетом пространственной ориентации ее излучателей. Приведены значения экспозиционной дозы тормозного излучения на расстоянии от мишеней модулей, равном 15 см.

Ключевые слова: электрофизическая установка, вакуумный пинч-диод, мишень, тормозное излучение, экспозиционная доза.

**Введение.** В настоящее время разрабатывается электрофизическая установка “Гамма-4”, предназначенная для генерации мощных импульсов тормозного излучения (ТИ) длительностью  $\approx 50$  нс. Установка включает четыре однотипных ускорительных модуля, выполненные на основе сильноточного импульсного ускорителя электронов “Гамма-1” [1, 2]. На первом этапе установку предполагается использовать в режиме, в котором все модули 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, оценка параметров поля излучения четырехмодульной установки сводится к построению математической модели, описывающей поле излучения одного модуля, и восстановлению с помощью этой модели поля излучения многомодульной установки.

**1. Математическая модель.** В работе [3] в результате анализа расчетов методом Монте-Карло 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. Эти характеристики удовлетворительно описываются полем точечного источника, смещенного на некоторое расстояние вдоль оси симметрии относительно центра мишени ускорителя. Для описания пространственного распределения указанных характеристик поля использовалась зависимость вида

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

где  $A_0$  — нормирующий множитель;  $\theta, r$  — координаты точки наблюдения в полярной системе координат, связанной с центром мишени ускорителя;  $\alpha, \beta, \mu$  — свободные параметры.

В формуле (1) множитель  $(\cos \theta)^\alpha$  является показателем изотропии излучения. Множитель  $1/r^\beta$  характеризует зависимость величины  $D$  от расстояния до точки наблюдения. Результаты расчетов показывают, что эта зависимость близка к классической, т. е.  $\beta \approx 2,0$ . Множитель  $e^{-\mu r}$  характеризует уменьшение величины  $D$  по мере удаления от источника. Значение коэффициента затухания  $\mu$  оказывается чрезвычайно малым, поэтому множитель  $e^{-\mu r}$  близок к единице. Согласно результатам расчетов методом Монте-Карло [3] при расстоянии от мишени, равном 10 см, максимальное значение погрешности расчетов по интерполяционной формуле (1) составляет 12 %. В диапазоне расстояний от мишени 15 ÷ 100 см максимальное значение погрешности расчетов по интерполяционной формуле (1) не превышает 6 %.

**2. Постановка экспериментов.** Для получения экспериментальных данных о пространственном распределении дозы ТИ проведена серия включений ускорителя “Гамма-1”, имеющего следующую конструкцию: к выходной части 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).

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

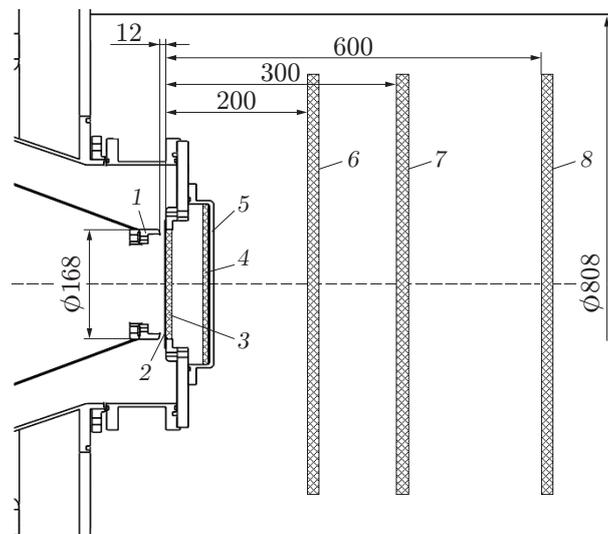


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — катод, 2 — мишень, 3, 4 — фильтр деградировавших электронов, 5 — алюминиевая крышка, 6–8 — матрицы термолюминесцентных дозиметров из алюмофосфатного стекла ИС-7

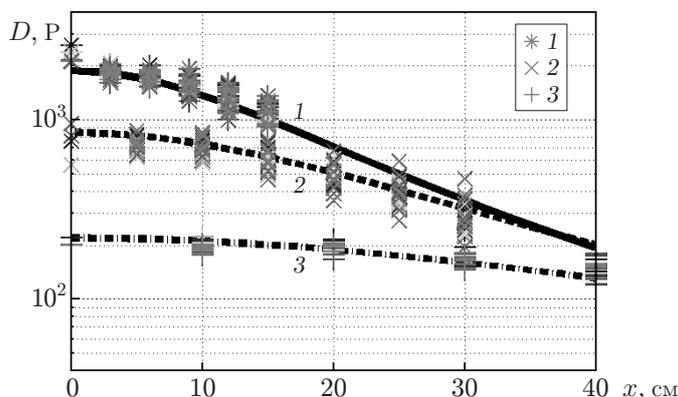


Рис. 2. Распределение экспозиционной дозы ТИ на различных расстояниях  $d$  от мишени: точки — экспериментальные данные, линии — аппроксимация; 1 —  $d = 20$  см, 2 —  $d = 30$  см, 3 —  $d = 60$  см

кромкой катода и мишенью составлял 12 мм. В качестве мишеней использовались диски из танталовой фольги диаметром 180 мм и толщиной 0,1 мм, в качестве фильтра деградировавших электронов — два диска из полиэтилена 3, 4, каждый из которых имел толщину 6 мм. Для защиты матрицы с детекторами от металлических осколков мишени дополнительно было размещено несколько слоев кевларовой ткани. Излучение выводилось через алюминиевую крышку 5 толщиной 6 мм в преграду, предназначенную для биологической защиты и представляющую собой цилиндр из свинца с диаметром полости 0,8 м. В преграде на расстояниях 20, 30 и 60 см вдоль оси ускорителя устанавливались матрицы с термолюминесцентными дозиметрами из алюмофосфатного стекла ИС-7 в стандартных корпусах 6, 7, 8 для измерения экспозиционной дозы ТИ в различных точках пространства. Проведено пять включений ускорителя. В первых четырех включениях были получены достаточно стабильные результаты измерения дозы ТИ, в пятом включении вследствие электрических пробоев в ускорительной трубке доза ТИ была существенно меньше. Поэтому для определения параметров модели использовались экспериментальные данные, полученные в первых четырех включениях ускорителя.

**3. Результаты экспериментов.** В результате проведенных экспериментов получены данные о пространственном распределении экспозиционной дозы ТИ ускорителя “Гамма-1”. На рис. 2 представлены экспериментальные данные и их аппроксимация по формуле (1). Параметры  $A_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$  определялись методом наименьших квадратов. В результате вычислений получены следующие значения параметров модели:  $A_0 = (6,62 \pm 0,29) \cdot 10^5 \text{ Р} \cdot \text{см}^\beta$ ,  $\alpha = 0,87 \pm 0,06$ ,  $\beta = 1,96 \pm 0,01$ . Относительная погрешность экспериментальных данных составила  $\approx 13\%$ . Экстраполяция полученных результатов на окрестность мишени показывает, что на расстоянии от мишени ускорителя, равном 15 см, максимальная доза составляет  $(3,3 \pm 0,2)$  кР, площадь пятна облучения со степенью неоднородности распределения дозы 50 % равна  $(440 \pm 15)$  см<sup>2</sup>.

**4. Восстановление полей излучения установки “Гамма-4”.** Модель, описывающая пространственное распределение экспозиционной дозы ТИ, генерируемого одним модулем, использовалась для восстановления поля излучения установки “Гамма-4”. В установке “Гамма-4” диоды модулей располагаются в центре квадрата, длина стороны которого равна 25 см (рис. 3). Энергия подводится к диодам по цилиндрическим магнитоизолированным линиям, при этом угол между осью такой линии и нормалью к плоскости матрицы диодов составляет  $18^\circ$ . Излучение диодов фокусируется в точку на оси системы, находящуюся на расстоянии 54 см от плоскости матрицы.

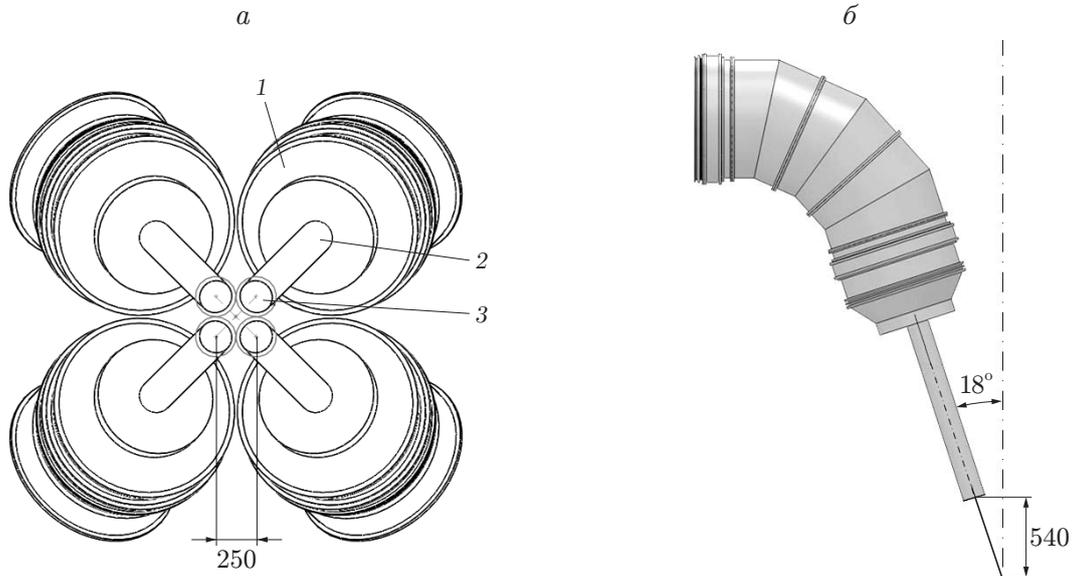


Рис. 3. Излучатели установки “Гамма-4”:  
*a* — схема расположения излучателей, *б* — общий вид излучателя; 1 — ускорительная трубка, 2 — магнитоизолированная передающая линия, 3 — вакуумный диод

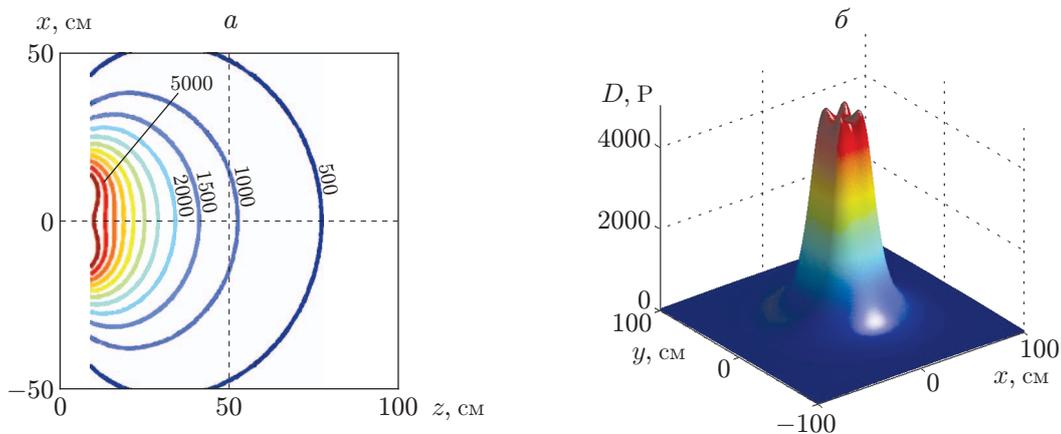


Рис. 4. Пространственное распределение экспозиционной дозы ТИ установки “Гамма-4”:  
*a* — в осевой плоскости, *б* — в плоскости, перпендикулярной оси симметрии и находящейся на расстоянии от мишени, равном 15 см

Для определения параметров излучения установки “Гамма-4” проведен численный эксперимент, в котором с учетом значений стандартных отклонений параметров модели, приведенных в п. 3, смоделированы 1000 импульсов излучения установки “Гамма-4”. На расстоянии от мишеней модулей, равном 15 см, значения экспозиционных доз ТИ составили  $(5,2 \pm 0,2)$  кР, площади пятен облучения со степенью неоднородности распределения дозы 50 % —  $(1950 \pm 30)$  см<sup>2</sup>.

На рис. 4, *a* показано распределение экспозиционной дозы ТИ в плоскости, проходящей через ось симметрии установки. В окрестности мишени пятно с неоднородностью 50 % имеет четыре участка. По мере удаления от плоскости излучателей эти участки сливаются в одно пятно. На рис. 4, *б* показано распределение экспозиционной дозы ТИ в плоскости наблюдения, перпендикулярной оси симметрии установки и находящейся на расстоянии от мишеней, равном 15 см.

**5. Выводы.** С использованием данных, полученных в экспериментах на сильноточном импульсном ускорителе электронов “Гамма-1”, выполнены оценки параметров пространственного распределения экспозиционной дозы ТИ установки “Гамма-4”. Показано, что на расстоянии от матрицы диодов модулей, равном 15 см, в режиме фокусировки излучения установка генерирует излучение с максимальным значением экспозиционной дозы ТИ ( $5,2 \pm 0,2$ ) кР на площади ( $1950 \pm 30$ ) см<sup>2</sup> при степени неоднородности распределения дозы 50 %.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. **Пунин В. Т., Завьялов Н. В., Басманов В. Ф.** Результаты экспериментальных исследований некоторых режимов работы сильноточного импульсного ускорителя электронов “Гамма-1” // Сб. докл. Междунар. конф. “12-е Харитоновские научные чтения по проблемам физики высоких плотностей энергии”, Саров, 19–23 апр. 2010 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 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” // Сб. докл. Междунар. конф. “14-е Харитоновские научные чтения: Мощная импульсная электрофизика”, Саров, 12–16 марта 2012 г. Саров: Всерос. науч.-исслед. ин-т эксперим. физики, 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 // Сб. докл. 9-й Межотраслевой конф. по радиационной стойкости, Снежинск, 12–15 окт. 2010 г. Снежинск: Всерос. науч.-исслед. ин-т техн. физики, 2011. Т. 1. С. 278–287.

*Поступила в редакцию 22/XII 2014 г.*

---