

## РАСЧЕТ ДОЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ УСТАНОВКИ «ГАММА-4»

### PREDICTIONS OF BREMSSTRAHLUNG DOSE OUTPUT OF «GAMMA-4» FACILITY

С. Ю. Пучагин, К. В. Страбыкин, В. С. Гордеев, Р. П. Трунцева, Е. А. Чернышев, А. Н. Залялов  
S. Yu. Puchagin, K. V. Strabykin, V. S. Gordeev, R. P. Truntseva, E. A. Chernyshev, A. N. Zalyalov

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

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

Объектом исследований является электрофизическая установка «Гамма-4», предназначенная для генерации импульсов тормозного излучения длительностью на полувысоте  $\sim 50$  нс. Представлены результаты расчетов пространственного распределения поглощенной дозы в ближней к источнику излучения зоне для двух режимов работы установки – режима автономных модулей и единой диодной нагрузки. Расчеты выполнены в программе СМК, разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ.

The subject under study is electro-physical facility «Gamma-4» aimed at producing bremsstrahlung pulses with duration  $\sim 50$  ns FWHM. The results of calculations of absorbed dose distribution in the near-field are presented for two operating modes of the facility – fully autonomous modules and common vacuum diode load. The calculations have been made with the aid of SMK Monte-Carlo code designed in RFNC-VNIIEF.

#### Введение

В РФЯЦ-ВНИИЭФ создана четырехмодульная электрофизическая установка «Гамма-4», предназначенная для генерации импульсов тормозного излучения (ТИ) длительностью на полувысоте  $\sim 50$  нс [1]. Расположение ускорительных модулей установки показано на рис. 1. Установку планируется использовать в двух режимах. В первом из них модули установки полностью автономны, и нагрузкой каждого из них является отдельный высоковольтный вакуумный диод. При этом диоды расположены вплотную друг к другу, образуя матрицу из четырех дискретных излучателей. Поле излучения, формируемое установкой, является суперпозицией полей излучения ее отдельных модулей. Во втором режиме планируется включать модули установки параллельно на единую диодную нагрузку [2] с целью увеличения плотности энергии излучения по сравнению с режимом автономных модулей. В настоящей работе представлены результаты расчетов пространственного распределения поглощенной дозы ТИ в ближней к источнику излучения зоне, где реализуются максимальные плотности энергии излучения, для двух указанных режимов работы установки. Расчеты

выполнялись в соответствии с методикой, предложенной в [3].

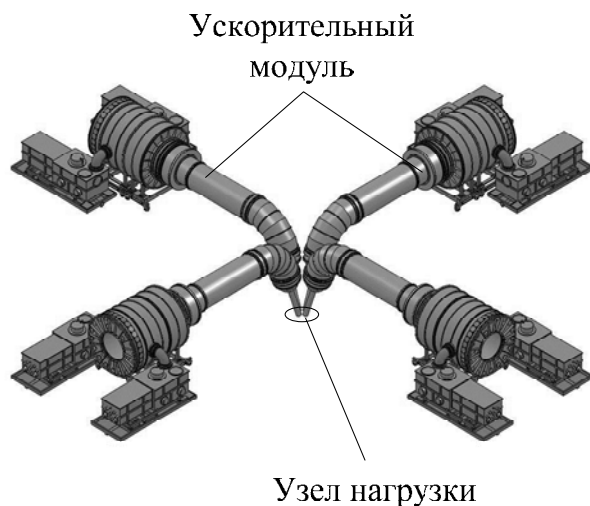


Рис. 1. Расположение ускорительных модулей установки «Гамма-4»

#### 1. Режимы работы установки «Гамма-4»

##### а. Режим автономных модулей

В режиме автономных модулей (режим 1) излучение формируется четырьмя высоковольтными

вакуумными диодами, центры мишеней которых расположены в углах квадрата со стороной 250 мм (диагональ 354 мм). Оси симметрии диодов расположены под углом  $18^\circ$  к вертикали. Конфигурация выходной части установки показана на рис. 2.

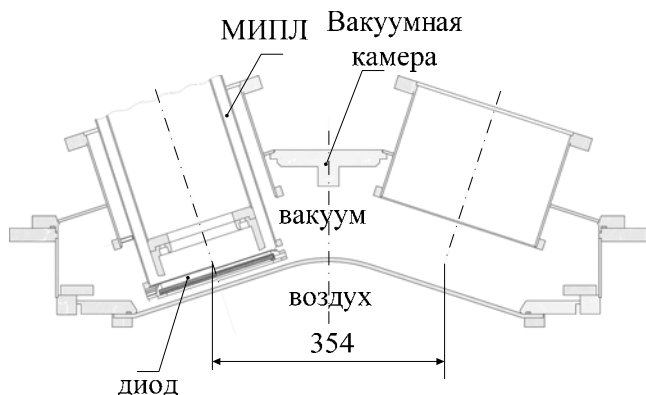


Рис. 2. Конфигурация выходной части установки в режиме автономных модулей

Мишенные узлы каждого диода состоят из конвертора ТИ (диск из тантала толщиной 0,1 мм диаметром 200 мм), защитного экрана (несколько слоев ткани типа «кевлар» суммарной толщиной 1,1 мм) и фильтра электронов (полиэтилен, 3 мм). Вывод излучения в атмосферу осуществляется через алюминиевую крышку вакуумной камеры толщиной 6 мм. Суммарная массовая толщина всех поглотителей электронов составляет  $1,95 \text{ г/см}^2$ .

Характеристики источников электронов (пространственное, угловое и энергетическое распределения) предварительно рассчитывались методом «частиц-в-ячейке» в программе BEAM25 [4]. Согласно результатам расчетов, в каждом из четырех диодов формируется электронный пучок кольцевой формы с внешним диаметром 16 см (примерно равным диаметру катода) и шириной около 1,5 см с энергией в импульсе  $\sim 64 \text{ кДж}$ . Граничная энергия электронов в пучке составляет  $\sim 2,0 \text{ МэВ}$ , средний угол падения на мишень  $\sim 50^\circ$ .

### б. Режим единой диодной нагрузки

Конфигурация выходной части установки в режиме единой диодной нагрузки (режим 2) показана на рис. 3. В данном режиме энергия, поступающая от модулей по вакуумной магнитоизолированной передающей линии (МИПЛ), сводится на один общий высокопоточный вакуумный диод, который образован кольцевым катодом с наружным и внутренним диаметром 250 мм и 230 мм и плоским мишенным узлом. Состав мишенного уз-

ла аналогичен используемому в режиме автономных модулей.

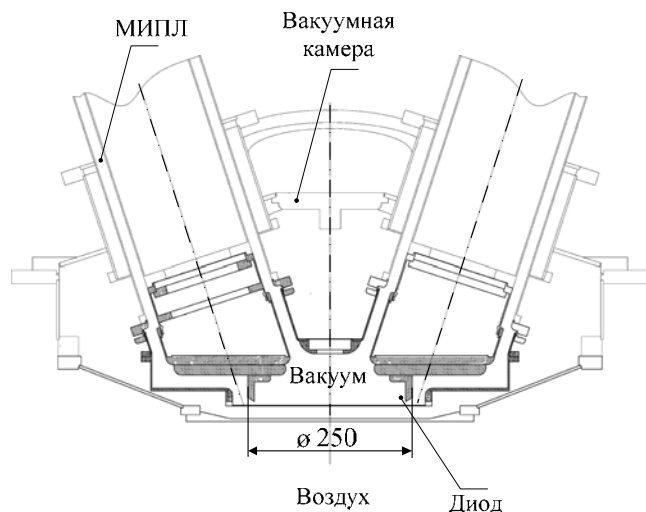


Рис. 3. Конфигурация выходной части установки в режиме единой диодной нагрузки

Согласно результатам расчетов в программе BEAM25, на мишень диода падает кольцевой пучок электронов с внешним диаметром 24,6 см шириной  $\sim 1 \text{ см}$  с энергией в импульсе  $\sim 190 \text{ кДж}$ . Граничная энергия электронов в пучке составляет  $\sim 2,1 \text{ МэВ}$ , средний угол падения частиц на мишень  $\sim 50^\circ$ .

## 2. Описание расчетов

Для расчета пространственного распределения поглощенной дозы использовалась программа СМК, разработанная в РФЯЦ-ВНИИЭФ [5]. Расчеты проводились на декартовой сетке  $100 \times 100 \times 20 \text{ см}$  с шагом по осям 1 см. В качестве исходных данных задавались расчетные распределения электронов, геометрия мишенных узлов, вакуумной камеры и воздушного пространства за алюминиевой крышкой вакуумной камеры.

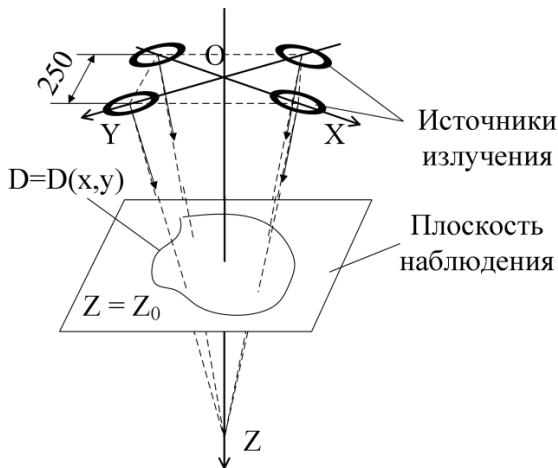
Для расчета поглощенной дозы использовалось соотношение:

$$D = 1,6 \cdot 10^{-17} \sum_i \Delta \Phi_{E_i} [\text{эВ/см}^2] \cdot \mu_{eni} [\text{см}^2/\text{г}],$$

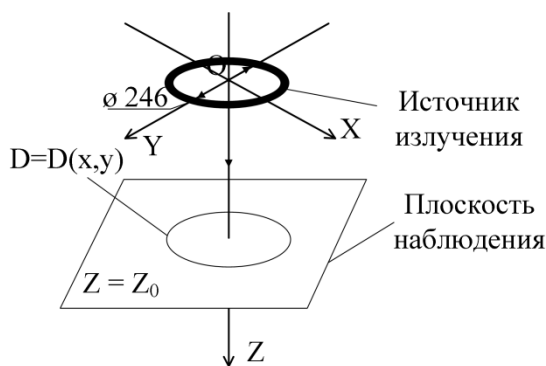
где  $D$  – поглощенная доза в крад;  $\Delta \Phi_{E_i}$  – групповые флюенсы энергии квантов;  $\mu_{eni}$  – коэффициенты поглощения энергии.

Значения коэффициентов поглощения для воздуха взяты из [6].

На рис. 4 показаны схемы расчета поглощенной дозы для представленных режимов установки. Оси X, Y расположены в горизонтальной плоскости, ось Z направлена вдоль вертикальной оси симметрии установки. Для расчета распределения поглощенной дозы использовался набор плоскостей, перпендикулярных оси Z, расположенных на расстояниях от 0 до 20 см от наружной поверхности крышки вакуумной камеры.



а



б

Рис. 4. Схема расчета поглощенной дозы: а – режим 1; б – режим 2

В ходе расчетов контролировался баланс энергии, который для двух указанных расчетов представлен в табл. 1.

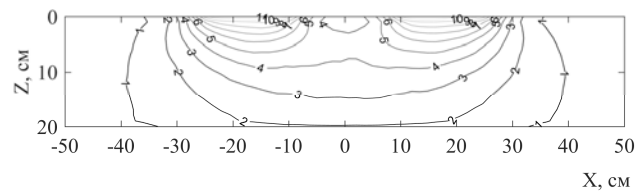
Согласно полученным результатам, в обоих случаях в фотонное излучение конвертируется около 2 % энергии источника, при этом в переднее полупространство выходит 1,2 %. Средняя энергия фотонов в расчетах составила ~0,24 МэВ в режиме 1 и ~0,26 МэВ в режиме 2.

Таблица 1

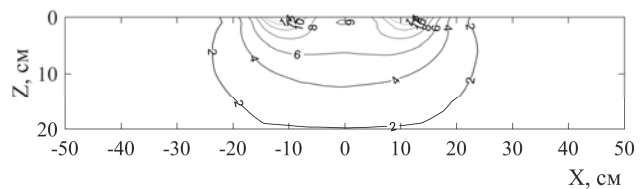
Баланс энергии, кДж(%)

Параметр	Расчет 1 (автономные диоды)	Расчет 2 (единая на- грузка)
Электроны, отраженные от мишени назад	110 (42,8)	81,3 (42,9)
Гамма-кванты в заднее полупространство	2,45 (1,0)	1,78 (0,9)
Энергия, поглощенная в мишени	86,8 (33,8)	59,3 (31,3)
Энергия, поглощенная в защитном экране	15,4 (6,0)	11,2 (5,9)
Энергия, поглощенная в фильтре электронов	34,2 (13,3)	27,2 (14,4)
Энергия, поглощенная в крышке вакуумной камеры	4,8 (1,9)	6,36 (3,4)
Гамма-кванты в переднее полупространство	3,1 (1,2)	2,36 (1,2)
Итого:	256 (100)	190 (100)

На рис. 5 представлено распределение поглощенной дозы в плоскости XOZ.



а



б

Рис. 5. Распределение поглощенной дозы в плоскости XOZ: а – режим 1; б – режим 2

Как видно по рис. 5 для достижения максимальных величин поглощенной дозы необходимо размещать облучаемый объект в непосредственной близости к источнику ( $Z = 0$ ). Однако в этом случае не обеспечивается требование по неоднородности не хуже 50 %, поскольку в середине пятна имеется зона с меньшими значениями дозы. Поэтому для обеспечения указанных требований приходится удаляться от источников, при этом максимальные значения поглощенной дозы уменьшаются. Так, для режима 1 расстояние, на котором

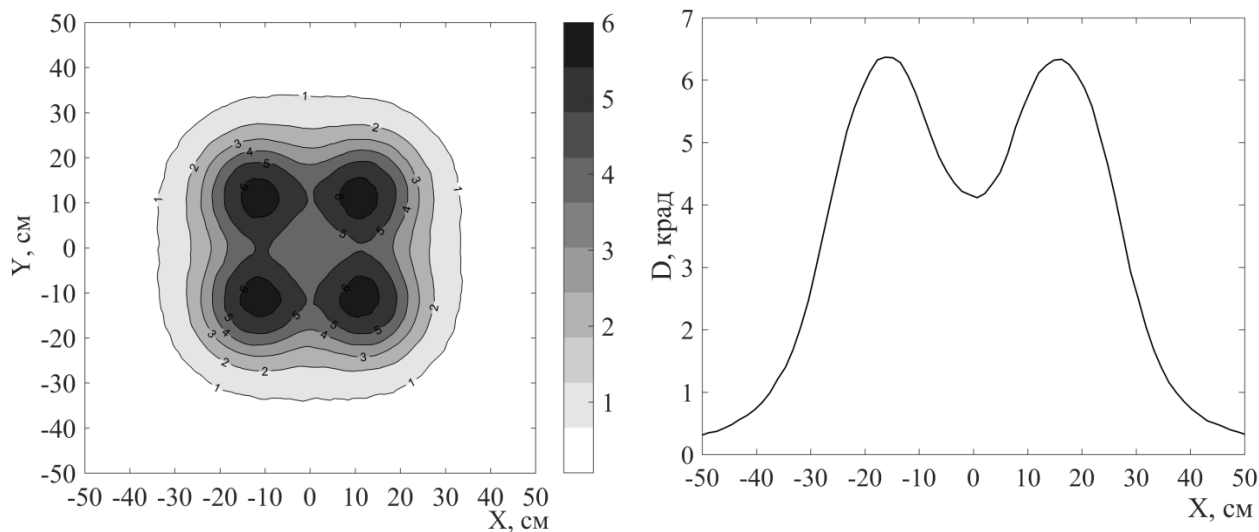


Рис. 6. Распределение поглощенной дозы в плоскости  $Z = 5$  см (режим 1)

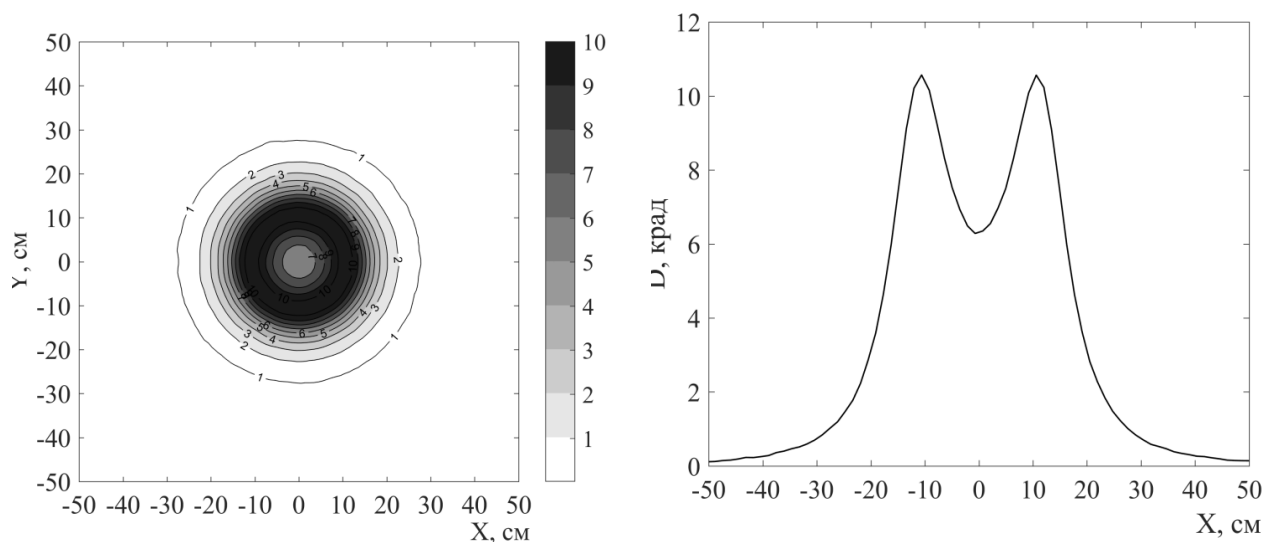


Рис. 7. Распределение поглощенной дозы в плоскости  $Z = 3$  см (режим 2)

пятно облучения с неоднородностью 50 % занимает сплошную область, составляет  $Z = 5$  см, а для режима 2 –  $Z = 3$  см. Соответствующие распределения поглощенной дозы показаны на рис. 6, 7.

Для режима 1 на облучательной позиции  $Z = 5$  см максимальное значение дозы  $D_{\max}$  составляет 6,7 крад, площадь пятна с неоднородностью 50 %  $S = 1930$  см<sup>2</sup> (квадрат со стороной ~44 см). Для режима 2 на позиции  $Z = 3$  см максимальное значение дозы  $D_{\max}$  составляет 10,8 крад, площадь пятна  $S = 890$  см<sup>2</sup> (круг диаметром ~34 см). Таким образом, согласно проведенным расчетам, в режиме единой диодной нагрузки должно обеспечиваться увеличение поглощенной дозы в ~1,6 раза по сравнению с режимом автономных модулей при уменьшении в ~2,2 раза площади облучаемой поверхности.

## Выводы

Проведены расчеты пространственного распределения поглощенной дозы в воздухе для двух режимов функционирования установки «Гамма-4» – автономных диодов и единой диодной нагрузки. Показано, что на предполагаемых облучательных позициях достигаются максимальные дозы 6,7 крад и 10,8 крад на площадях 1930 см<sup>2</sup> и 890 см<sup>2</sup>, соответственно, с неоднородностью по дозе 50 %. Таким образом, в режиме единой диодной нагрузки должно обеспечиваться увеличение дозы в ~1,6 раза по сравнению с режимом автономных модулей при уменьшении площади облучаемой поверхности в ~2,2 раза.

### Список литературы

1. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В. и др. «Проект электрофизической установки «Гамма-4» // Сборник докладов XVI Харитоновских тематических научных чтений «Мощная импульсная электрофизика», г. Саров, 2014. С. 32–37.

2. Завьялов Н. В., Гордеев В. С., Гришин А. В. и др. «Расчетное обоснование единой диодной нагрузки для экспериментальной установки «Гамма-4». Труды международной конференции «XVIII Харитоновские тематические научные чтения». Сборник докладов. г. Саров, 2017. С. 136–139.

3. Гордеев В. С., Донской Е. Н., Залялов А. Н. и др. «Расчет динамики поля тормозного излу-

чения высокоэнергетических электронов». Труды международной конференции «XIV Харитоновские тематические научные чтения». Сборник докладов. г. Саров, 2013. С. 168–175.

4. 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.

5. Свидетельство № 2011610500 о государственной регистрации программы для ЭВМ от 11.01.2011 г.

6. Машкович В. П., Кудрявцева А. В. Защита от ионизирующих излучений: Справочник. – М.: Энергоатомиздат, 1995. С. 496.