

РАСЧЕТЫ ДОЗОВЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ В БЛИЖНЕЙ ЗОНЕ

*Р. П. Трунцева, С. Ю. Пучагин, К. В. Страбыкин, В. С. Гордеев,
Е. А. Чернышев, А. Н. Залялов*

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

Введение

В Институте ядерной и радиационной физики РФЯЦ-ВНИИЭФ создана четырехмодульная электрофизическая установка, предназначенная для формирования импульсов тормозного излучения (ТИ) длительностью на полувысоте ~ 50 нс [1].

На этапе экспериментальной отработки режимов функционирования установки проверяется работоспособность всех ее узлов и систем, при этом для сохранения ресурса установки включения проводятся не в предельных режимах. В частности, большинство включений установки проводятся при пониженном зарядном напряжении генераторов Аркадьева-Маркса ГИН-1000 [2], также используются неоптимальные по выходу ТИ мишени. Тем не менее, для каждого такого режима нам необходимо иметь оценки параметров излучения для сравнения с экспериментальными данными.

В настоящей работе приводятся результаты расчетов экспозиционной дозы ТИ, формируемого установкой в режиме автономных модулей для зарядных напряжений конденсаторов ГИН-1000 70, 80 и 90 кВ. Расчеты проводились в соответствии с методикой, предложенной в [3]. Согласно данной методике, на первом этапе методом «частиц-в-ячейке» рассчитываются характеристики пучка электронов, формируемого в диодной нагрузке модуля. На втором этапе методом Монте-Карло рассчитываются интересные характеристики поля тормозного излучения, при этом полученные на первом этапе характеристики пучка электронов задаются в качестве входных данных.

1. Режим работы установки

Электрофизическую установку планируется использовать в нескольких режимах. Первым из них является режим, в котором модули установки полностью автономны, и нагрузкой каждого из них является отдельный высокопоточный вакуумный диод. Данный режим предназначен для облучения объектов большой площади (>1000 см²). Диоды образованы полым кольцевым катодом диаметром 168,3 мм и плоским анодом-мишенью с зазором между ними 8–10 мм. Такая конфигурация обеспечивает близкий к согласованному режим работы диода с импедансом

$\sim 2,9$ Ом. Оси диодов расположены под углом 18° к центральной вертикальной оси симметрии. Центры мишеней расположены в углах квадрата со стороной 250 мм (диагональ 354 мм). Конфигурация выходной части установки показана на рис. 1. В данном режиме поле излучения, формируемое установкой, является суперпозицией полей излучения ее отдельных модулей.

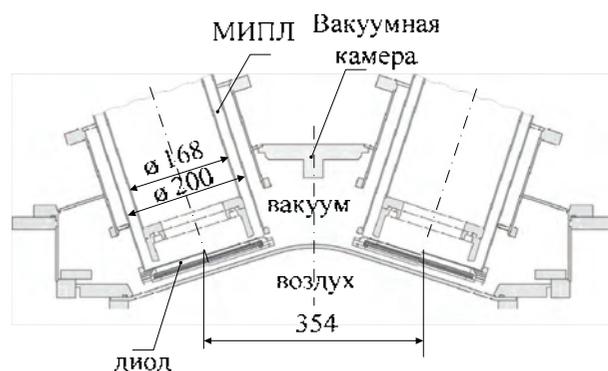


Рис. 1. Конфигурация выходной части установки

Мишенинные узлы каждого диода состоят из собственно мишени (на этапе пуско-наладочных работ используется мишень из нержавеющей стали толщиной 1 мм, в рабочем режиме — мишень из тантала толщиной 0,1 мм), защитного экрана из нескольких слоев ткани типа «кевлар» суммарной толщиной 1,1 мм и фильтра электронов из полиэтилена толщиной 3 мм. Вывод излучения в атмосферу осуществляется через алюминиевую крышку вакуумной камеры толщиной 6 мм. Суммарная массовая толщина всех поглотителей электронов составляет 1,95 г/см².

Характеристики источников электронов (пространственное, угловое и энергетическое распределения), соответствующие зарядным напряжениям ГИН-1000 70, 80 и 90 кВ, предварительно рассчитывались методом «частиц-в-ячейке» в программе BEAM25 [4]. Согласно результатам расчетов, во всех случаях в диоде формируется электронный пучок кольцевой формы с внешним диаметром ~ 16 см (примерно равным наружному диаметру катода) и шириной около 1,5 см. Энергия пучка в импульсе составляет, соответственно, 47, 61 и 75 кДж. Граничная энергия электронов в пучке изменяется от 1,7 до 2,2 МэВ, средний угол падения электронов на мишень во всех случаях составляет $\sim 50^\circ$.

2. Описание расчетов

Для расчета пространственного распределения экспозиционной дозы использовалась программа С-007, разработанная в РФЯЦ-ВНИИЭФ [5]. В качестве исходных данных задавались расчетные распределения электронов, геометрия мишенных узлов, вакуумной камеры и воздушного пространства за выходным окном вакуумной камеры. Расчетная геометрия представлена на рис. 2.



Рис. 2. Расчетная геометрия

Для расчета экспозиционной дозы использовалось соотношение:

$$D = 1,14 D_{\text{погл.возд.}} = 1,82 \cdot 10^{-17} \sum_i [\mu_{eni} \Delta \Phi_{Ei}], \quad (1)$$

где D – экспозиционная доза в кР, $D_{\text{погл.возд.}}$ – поглощенная доза в воздухе, крад; $\Delta \Phi_{Ei}$ – групповые флюенсы энергии квантов, эВ/см²; μ_{eni} – массовые коэффициенты поглощения энергии, см²/г.

Значения коэффициентов поглощения для воздуха взяты из [6].

На рис. 3 показана схема, используемая для расчета экспозиционной дозы.

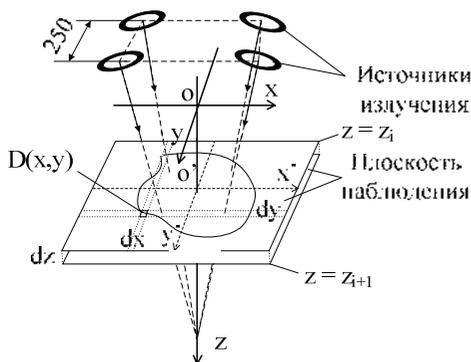


Рис. 3. Схема расчета экспозиционной дозы

Начало координат совпадает с точкой пересечения центральной оси симметрии с внешней плоской поверхностью выходного окна установки. Оси X , Y расположены горизонтально, ось Z направлена вертикально вниз вдоль центральной оси симметрии. Центры источников излучения расположены в плоскости $Z = -7$ см. Оси источников фокусируются в точку с координатой $Z = 47,4$ см. Для расчета экспо-

зиционной дозы используется набор плоскостей, перпендикулярных оси Z , с координатами $Z = 0..20$ см с шагом $dz = 1$ см. В каждой из этих плоскостей наблюдения рассчитывается распределение дозы $D(x, y)$. Для этого плоскость накрывается декартовой сеткой с шагом по осям $dx = dy = 1$ см. Выходным результатом программы СМК является распределение потока энергии гамма-квантов в плоскости наблюдения $F(x,y)$. Деля $F(x,y)$ на площадь элемента поверхности $dx dy$, получаем распределение плотности потока энергии (флюенса энергии) гамма-квантов $\Phi(x,y)$. Затем по формуле (1) рассчитывается распределение экспозиционной дозы $D(x,y)$ в плоскости наблюдения. Повторяя данную процедуру для каждой плоскости наблюдения, получаем распределение экспозиционной дозы в пространстве $D = D(x,y,z)$.

3. Результаты расчетов

Поскольку излучение, выходящее из мишени, по мере прохождения через поглотители рассеивается на достаточно большой угол, максимальные значения флюенса и экспозиционной дозы реализуются в ближней к источникам излучения плоскости наблюдения ($z = 0$ см), и убывают по мере удаления от мишеней.

Расчетное распределение экспозиционной дозы в ближней плоскости, нормированное на максимальное значение дозы, показано на рис. 4а. Утолщенными сплошными линиями обозначены контуры площадей, внутри которых доза превышает, соответственно, 0,5 и 0,7 от максимального значения. На рис. 4б показано распределение дозы вдоль оси OX , на рис. 4в – вдоль диагонали $x=y$. Видно, что уже в данной плоскости пятно облучения занимает сплошную область. Участки с максимальной дозой соответствуют проекциям источников на плоскость наблюдения.

Согласно результатам расчетов форма распределения экспозиционной дозы практически не изменяется при переходе от режима к режиму, изменяются лишь максимальные значения дозы. В таблице приведены максимальные значения экспозиционной дозы D_{max} и площади пятна облучения с неоднородностью 30 и 50 % в плоскости $Z = 0$ см в рассматриваемых режимах функционирования установки.

Увеличение максимальной дозы при переходе от первого режима к последнему составляет ~3,5 раза. Площадь пятна облучения с неоднородностью 50 и 30 % слабо зависит от режима работы установки и составляет около 2000 и 1600 см².

На рис. 5 показано расчетное распределение дозы в диагональной плоскости, проходящей через центры двух источников и ось OZ , нормированное на максимальное значение экспозиционной дозы. На рис. 5 видно, что максимальная доза уменьшается в 2 раза на расстоянии ~10 см от выходного окна. На расстоянии 20 см максимальная доза уменьшается в ~3,5 раза.

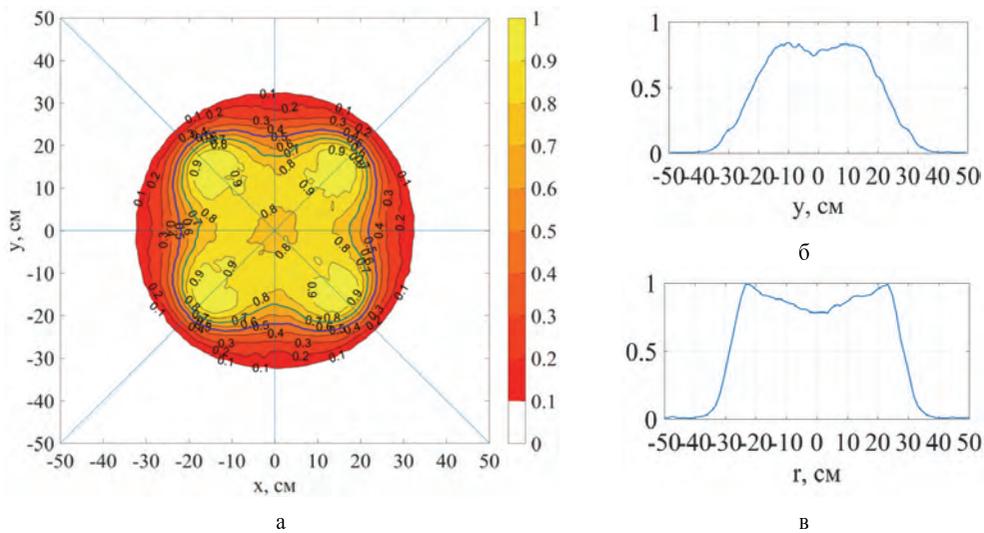


Рис. 4. Распределение дозы в плоскости $Z = 0$ см: а – двумерное распределение; б – одномерное распределение, вдоль оси OX ; в – одномерное распределение, вдоль диагонали $X = Y$

Максимальные значения экспозиционной дозы и площади пятна облучения в плоскости $Z = 0$ см

Наименование режима	Максимальная экспозиционная доза, кР	Площадь пятна с неоднородностью по дозе 50%, см ²	Площадь пятна с неоднородностью по дозе 30%, см ²
Fe, 70 кВ	2,8	1970	1590
Fe, 80 кВ	4,3	1975	1590
Fe, 90 кВ	5,9	1990	1580
Ta, 90 кВ	9,9	2040	1610

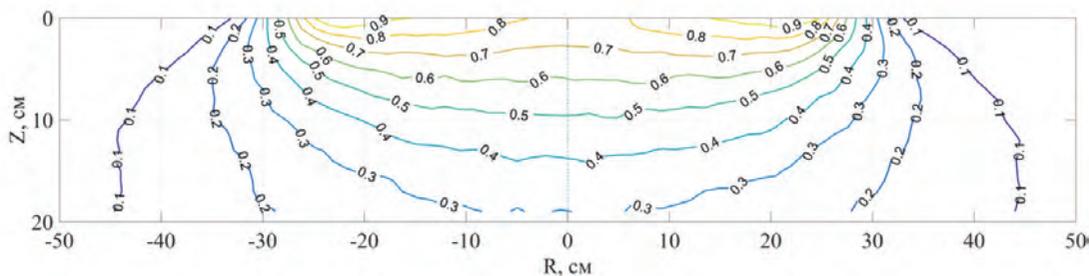


Рис. 5. Нормированное распределение дозы в диагональной плоскости

На рис. 6 показаны зависимости максимальной дозы и площади облучения с неоднородностью по дозе 30 и 50 % от координаты z (расстояние от выходного окна до плоскости наблюдения) для указанных режимов работы установки.

При переходе от конфигурации, с мишенью из Fe и зарядным напряжением 70 кВ, к конфигурации, с мишенью из Ta и зарядным напряжением 90 кВ, максимальная доза увеличивается: от 2,8 до 10,0 кР при $Z = 0$ см (отношение 3,5), и от 1,0 до 3,1 кР при $Z = 19$ см (отношение 3,1).

Площадь облучаемой поверхности слабо зависит от параметров установки, при этом по мере удаления от мишеней площадь облучения с неоднородностью 50 % растет линейно в диапазоне от 2000 до 3300–3500 см², площадь облучения с неоднородностью 30 % остается примерно постоянной на уровне 1600–1800 см².

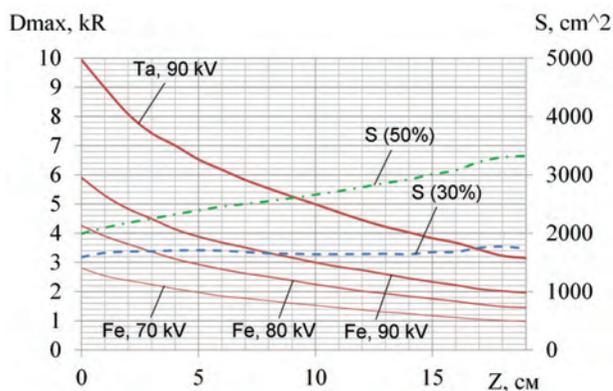


Рис. 6. Зависимость дозы и площади от расстояния от мишени

Выводы

Выполнены расчеты пространственного распределения экспозиционной дозы ТИ для четырех режимов работы электрофизической установки: со стальной мишенью и зарядным напряжением конденсаторов ГИН-1000 70, 80 и 90 кВ, и с танталовой мишенью и зарядным напряжением 90 кВ.

Максимальная доза при переходе от первого режима к последнему растет от 2,8 до 10,0 кР, площадь пятна с неоднородностью по дозе 50 % составляет во всех случаях $\sim 2000 \text{ см}^2$, с неоднородностью 30 % – $\sim 1600 \text{ см}^2$. По мере удаления от источников максимальная доза падает в ~ 2 раза на расстоянии 10 см и в $\sim 3,5$ раза на расстоянии 20 см.

Представленные здесь результаты будут использоваться для сравнения с экспериментальными данными, получаемыми в процессе отработки режима функционирования электрофизической установки с автономными диодами.

Литература

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. Avdeeva A. V., Basmanov V. F., Gordeev V. S. et al. Marx generator GIN-1000 with 1 MV output voltage and 80 kJ energy stored // Proceeding of 15-th International Conference on High-Power Particle Beams, BEAMS'2004, Saint-Petersburg, Russia, July 18–23, 2004. P. 327–329.

3. Гордеев В. С., Донской Е. Н., Залялов А. Н., Лазарев С. А., Михайлов Е. С., Ткачук Д. В. Расчет динамики поля тормозного излучения сильноточных ускорителей 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. Житник А. К., Донской Е. Н., Огнев С. П. и др. 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.

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