

ИССЛЕДОВАНИЕ ЖЕСТКОГО ТОРМОЗНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАДИАЦИОННО-ПУЧКОВОМ КОМПЛЕКСЕ «ТЕМП»

*А.Б. Батраков, Е.Г. Глушко, А.М. Егоров, А.А. Зинченко, В.В. Литвиненко,
Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, А.В. Рыбка, С.И. Федотов, В.Т. Уваров*
Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
Харьков, Украина
E-mail: batrakov@kipt.kharkov.ua

Приведен расчет основных параметров жесткого тормозного рентгеновского излучения (ТРИ) для микросекундных ускорителей релятивистских электронных пучков (РЭП) «ТЕМП». Проведена оптимизация конверторов для этих целей. Экспериментально получены максимальные дозы ТРИ на пучково-радиационном комплексе «ТЕМП». Сняты диаграммы направленности ТРИ в зависимости от энергий пучков и форм электродов.

ВВЕДЕНИЕ

Создание и внедрение специальных источников гамма-излучения, а также разработка радиационно-пучкового метода – актуальное направление в высокоэнергетической ускорительной технике. Стимуляция этих исследований вызвана широким спектром работ по изучению физико-механических свойств конструкционных материалов, металлов и сплавов при помощи РЭП [1, 2]. Исследование радиационного воздействия на материалы реакторостроения, моделирование условий реакторной зоны, изучение поведения и стойкости, существующих и разрабатываемых материалов для ядерной энергетики – второе направление в исследованиях жесткого тормозного рентгеновского излучения (ТРИ).

Генерация ТРИ осуществляется на двух высокоэнергетических ускорителях релятивистских электронных пучков «Темп-А» и «Темп-Б» [3], которые и входят в радиационно-пучковый комплекс «ТЕМП» (РПК «ТЕМП»).

Целью данной работы было: создание источников ТРИ на РПК «ТЕМП»; построение и изучение диаграмм направленности тормозного рентгеновского излучения; изучение зависимости ТРИ от энергии РЭП, формы электродов вакуумного диода, материала и толщины конвертера.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

В данном разделе приведен оценочный расчет параметров тормозного рентгеновского излучения для ускорителя «Темп-Б» ($E \approx 0,5 \dots 1,0$ МэВ, $I \approx 10 \dots 25$ кА, $\tau \approx 1,5$ мкс) и ускорителя «Темп-А» ($E \approx 0,3 \dots 0,5$ МэВ, $I \approx 2 \dots 3$ кА, $\tau \approx 4$ мкс).

Расчет дозовых величин для сплошного РЭП проводился по упрощенным эмпирическим формулам [4]:

$$D = 0,8 \cdot 10^{-3} \frac{W_e}{R^2} \cdot E^{1,7} \cdot \sqrt{\frac{Z_M}{13}}, \quad [P], \quad (1)$$

$$\dot{D} = 0,8 \cdot 10^3 \frac{i_e}{R^2} \cdot E^{2,7} \cdot \sqrt{\frac{Z_M}{13}}, \quad [P/c], \quad (2)$$

где W_e – энергия пучка электронов (Дж); E – энергия электронов (МэВ); R – расстояние от мишени (м); i_e – ток пучка (А); Z_M – атомный номер мишени.

Результаты расчетов экспозиционной дозы D и ее мощности \dot{D} на различных расстояниях R от вольфрамовой мишени ($Z_M = 74$) для различных энергий пучка приведены в Табл. 1.

Таблица 1

Ускоритель «Темп-Б» (0,75 МэВ)							
$R, \text{ мм}$	5	15	25	50	80	100	120
$D, \text{ P}$	$5,6 \cdot 10^4$	$6,3 \cdot 10^3$	$2,3 \cdot 10^3$	$5,6 \cdot 10^2$	$2,2 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^2$	$9,8 \cdot 10^1$
$\dot{D}, \text{ P/c}$	$3,7 \cdot 10^{10}$	$4,2 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^9$	$3,7 \cdot 10^8$	$1,5 \cdot 10^8$	$9,4 \cdot 10^7$	$6,5 \cdot 10^7$
Ускоритель «Темп-А» (0,4 МэВ)							
$R, \text{ мм}$	5	15	50	70			
$D, \text{ P}$	$4,8 \cdot 10^3$	$5,4 \cdot 10^2$	$4,8 \cdot 10^1$	$2,5 \cdot 10^1$			
$\dot{D}, \text{ P/c}$	$3,2 \cdot 10^9$	$3,6 \cdot 10^8$	$3,2 \cdot 10^7$	$1,6 \cdot 10^7$			

При взаимодействии потока жестких фотонов с веществом осуществляется ослабление излучения, при этом поглощенное излучение приводит к определенным изменениям в самом веществе [5]. Очевидно, что характер взаимодействия существенно зависит от интенсивности излучения.

Интенсивность тормозного излучения для мишени из вещества с порядковым номером Z , в которых электроны полностью тормозятся при напряжениях до 1 МэВ, приблизительно равна [6]:

$$I_{ТОРМ} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot i \cdot Z \cdot U^{1,75} \quad [\text{Вт}], \quad (3)$$

где i – ток пучка (мА); U – ускоряющее напряжение (кВ).

Относительный интегральный энергетический выход тормозного излучения при полном торможении электронов в мишенях из материалов с атомным номером Z , согласно [6], равен:

$$\eta = \frac{I_{ТОРМ}}{i \cdot U} = 3 \cdot 10^{-6} \cdot Z \cdot U^{0,75}. \quad (4)$$

Толщина мишени-конвертера оказывает существенное влияние на интенсивность ТРИ. Оптимальная толщина мишени определяется исходя из максимальной величины проникновения электронов в вещество [7].

$$\delta = 10^{-5} \cdot E^{3/2} / \rho, \quad (5)$$

где E – энергия электронов (кэВ); ρ – плотность вещества (г/см^3).

Результаты расчета интенсивности тормозного излучения $I_{ТОРМ}$, относительного энергетического выхода – η , величины проникновения электронов в вещество – δ , для мишеней из вольфрама ($Z = 74$), тантала ($Z = 73$) и молибдена ($Z = 42$) при различных значениях ускоряющего напряжения электронов U приведены в Табл. 2.

Таблица 2

Параметры	Материал конвертера					
	вольфрам		тантал		молибден	
U , кВ	400	750	400	750	400	750
$I_{ТОРМ}$, Вт	$4,8 \cdot 10^7$	$4,44 \cdot 10^8$	$2,72 \cdot 10^7$	$4,44 \cdot 10^8$	$2,72 \cdot 10^7$	$2,52 \cdot 10^8$
η	0,016	0,030	0,009	0,0298	0,009	0,017
δ , мкм	27	96,2	31,2	110	50,8	180

Экспериментально измеренный максимальный относительный энергетический выход ТРИ составил $\approx 1,6\%$, так как учитывалась только часть излучения, соответствующая направлению транспортировки пучка.

Глубина, на которую электроны проникают в мишень, оказывается намного меньше, чем их пробег внутри мишени. С увеличением атомного номера вещества уменьшается глубина проникновения электронов вглубь мишени, но увеличивается интенсивность глубоко проникающего тормозного излучения.

При выборе конвертера необходимо учитывать эффективность преобразования энергии электронов в ТРИ [8, 9], механические и теплофизические свойства материала, которые должны обеспечивать высокую стойкость и долговечность под воздействием экстремальных импульсных нагрузок на него РЭП. Выбор конструкции конвертера сводится к выбору материала, который при минимальной толщине выдерживает максимальное количество импульсов.

Одним из возможных путей продления срока службы конвертеров является их охлаждение. На ускорителе «Темп-А» испытывались конвертеры, выполненные по принципу тепловой трубы. Как известно, такая система охлаждения весьма эффективна для стационарных процессов.

Экспериментально установлено, что для высокоэнергетических РЭП с энергией $E=0,3 \dots 0,8$ МэВ предпочтительней использовать конвертеры из тантала и молибдена.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Экспериментальные исследования проводились на микросекундных ускорителях релятивистских электронных пучков «Темп-А» и «Темп-Б».

Основные исследования были направлены на изучение параметров радиационной составляющей РПК «ТЕМП». Были измерены диаграммы направленности ТРИ для различной геометрии электронного пучка (трубчатого и сплошного цилиндрического). Схема эксперимента по получению сплошного цилиндрического (Рис. 1,а) и трубчатого (Рис. 1,б) электронных пучков приведены ниже.

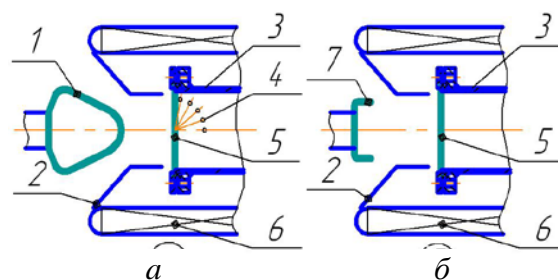


Рис. 1. Схема эксперимента для получения сплошного пучка (а); трубчатого пучка (б): 1 – конусный катод; 2 – анодная вставка; 3 – вакуумный ввод; 4 – рентгенодатчики; 5 – конвертер; 6 – магнитное поле; 7 – крошечный катод

Измерения доз тормозного рентгеновского излучения производились с помощью термолюминесцентных датчиков. Они позволяют измерять дозы в широком интервале энергий, при соответствующей их градуировке.

Термолюминесцентные датчики на основе LiF имеют диаметр 3,5 мм и толщину 2 мм. Они располагались непосредственно за конвертером на различных расстояниях для определения пространственного распределения рентгеновского излучения. В качестве мишеней-конвертеров использовались фольги из различных материалов (W, Mo, Ta) толщиной до 300 мкм. Каждое значение дозы получено в результате усреднения серии измерений из пяти выстрелов.

Для определения углового распределения тормозного рентгеновского излучения, полученного взаимодействием сплошного электронного пучка с мишенью, применялся полупроводниковый детектор [10]. Типичные осциллограммы исследований приведены на Рис. 2.

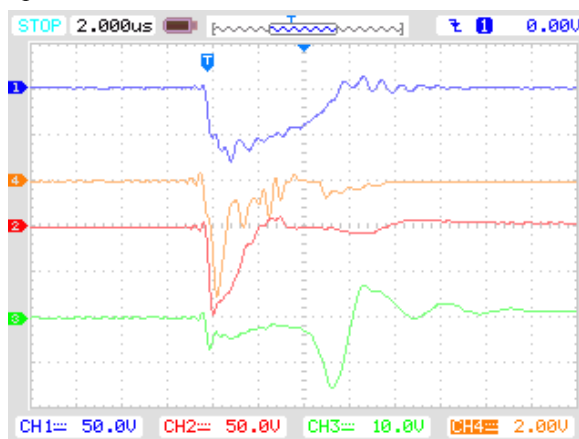


Рис. 2. Осциллограммы исследований: 1 – напряжение пучка; 2 – ток пучка; 3 – общий ток ускорителя; 4 – сигнал рентгеновского зонда

Габаритные размеры датчика $5 \times 5 \times 15$ мм, его сопротивление составляет $\approx 10^9$ Ом. Сигнал с выхода полупроводникового детектора представляет собой ток, возникающий в результате ионизации в детекторе, который линеен по отношению к мощности дозы независимо от температуры.

Для получения сплошного релятивистского электронного пучка использовались

ной 68 мм; анодная вставка с углом раскрыва 51° и длиной конуса 40 мм; камера дрейфа длиной 135 мм и диаметром 70 мм. Расстояние анод-катодного промежутка составляло 25 мм. За камерой дрейфа располагался вакуумный ввод с конвертером. Диаметр отпечатка пучка на мишени составлял 25 мм. Полупроводниковый датчик устанавливался непосредственно за конвертером под различными углами (0°, 20°, 40°, 60°, 80°) по радиусу ≈ 30 мм (см. Рис. 1,а).

В Табл. 3 приведены результаты измерений, представленные в относительных единицах выходного сигнала. Измерения проводились при энергии пучка 400 и 700 кэВ.

Таблица 3

Энергия пучка, кэВ	Углы, °				
	0	20	40	60	80
400	3,5	2,6	2	1,6	1,5
700	12	8,4	6,1	4,8	3,4

График углового распределения тормозного рентгеновского излучения, построенного по результатам измерений, показан на Рис. 3.

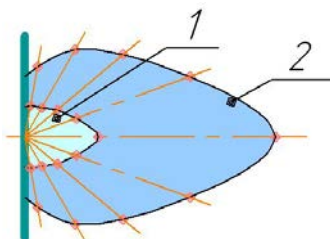


Рис. 3. График углового распределения ТРИ от сплошного пучка с энергией электронов: 1 – 400 кэВ; 2 – 700 кэВ

Полученное угловое распределение ТРИ в дальнейшем использовалось для построения диаграмм направленности ТРИ трубчатого РЭП.

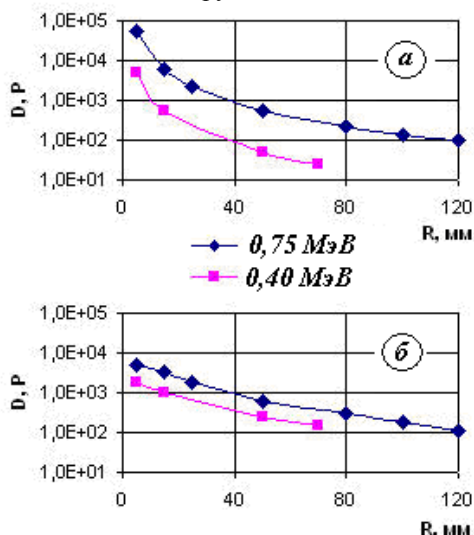


Рис. 4. Распределение доз ТРИ от сплошного электронного пучка: а – расчетное; б – измеренное

На Рис. 4 представлены графики распределения как расчетных, так и измеренных доз D ТРИ от сплошного пучка с энергией электронов 0,75 и 0,4 МэВ. Термолюминесцентные датчики и полупроводниковый детектор располагались по оси пучка на различных расстояниях R от конвертера. Как

видно из графиков на Рис. 4 расчетные и экспериментально измеренные данные находятся в хорошем соответствии.

Используя за основу угловое распределение ТРИ для сплошного цилиндрического электронного пучка, нами были измерены диаграммы направленности ТРИ для трубчатых пучков на двух ускорителях РЭП.

На микросекундном ускорителе «Темп-А» (Рис. 5,а) при токе пучка 3...4 кА; энергии электронов 0,35 МэВ; $\tau = 5$ мкс; диаметре катода 55 мм диаметр отпечатка пучка составлял ≈ 45 мм.

Для получения трубчатого пучка на ускорителе «Темп-Б» (Рис. 5,б) использовался цилиндрический кромочный катод диаметром 96 мм, высотой кромки 15 мм и толщиной кромки 1 мм. Катод-анодный промежуток составлял 25 мм. Диаметр отпечатка пучка на мишени 54 мм. Параметры пучка: $I=21,5$ кА, $E = 750$ кэВ, длительность импульса 1,5 мкс.

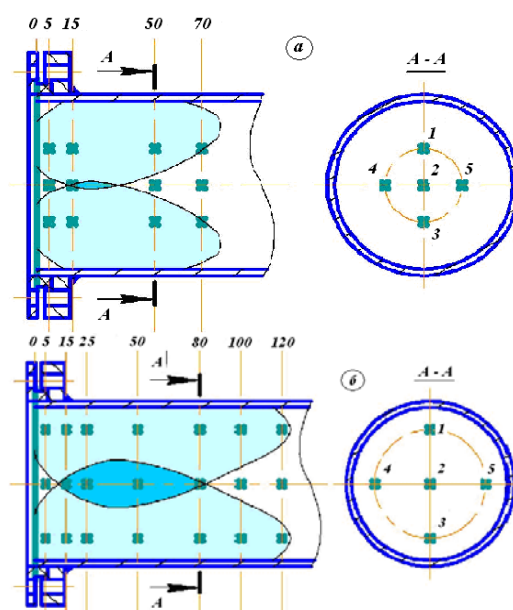


Рис. 5. Диаграммы направленности ТРИ для трубчатых пучков с энергией: а – $E \approx 350$ кэВ; б – $E \approx 750$ кэВ

Результаты измерений экспозиционных доз тормозного рентгеновского излучения трубчатого пучка на различных расстояниях от конвертера и для различных энергий ($E \approx 350$ кэВ и $E \approx 750$ кэВ) представлены в таблицах 4 и 5 соответственно.

Как видно из таблиц 4 и 5, для датчиков №2 из LiF, находящихся на осях обоих ускорителей на расстоянии 15 мм от конвертера, наблюдается увеличение дозы ТРИ за счет кольцевой геометрии пучка.

Таблица 4

Датчик	Расстояние от конвертера, мм				Доза, P
	5	15	25	70	
1	$6,6 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^2$	$3,3 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^2$	
2	$2,9 \cdot 10^2$	$9,6 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^2$	
3	$6,0 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^2$	
4	$6,3 \cdot 10^3$	$5,1 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^2$	
5	$5,9 \cdot 10^3$	$4,0 \cdot 10^2$	$3,0 \cdot 10^2$	$2,8 \cdot 10^2$	

Таблица 5

№ датчика	Расстояние от конвертера, мм							Доза, Р
	5	15	25	50	80	100	120	
1	$9,1 \cdot 10^3$	$1,2 \cdot 10^3$	$8,4 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^2$	$3,5 \cdot 10^2$	$2,0 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^2$	
2	$6,2 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$	$4,1 \cdot 10^3$	$9,5 \cdot 10^2$	$6,1 \cdot 10^1$	$2,3 \cdot 10^1$	
3	$9,9 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	$8,0 \cdot 10^2$	$5,8 \cdot 10^2$	$4,2 \cdot 10^2$	$2,7 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^2$	
4	$8,8 \cdot 10^3$	$1,3 \cdot 10^3$	$7,9 \cdot 10^2$	$6,3 \cdot 10^2$	$3,7 \cdot 10^2$	$1,8 \cdot 10^2$	$1,0 \cdot 10^2$	
5	$9,4 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$	$8,5 \cdot 10^2$	$6,8 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^2$	$2,9 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^2$	

На графике распределения дозы ТРИ (Рис. 6,а,б), построенного по данным Табл. 4 и 5, кривая 1 соответствует распределению дозы ТРИ по усредненным значениям показаний датчиков № 1, № 3 - 5 на радиусе пучка, а кривая 2 – по значениям дозы ТРИ с датчиков № 2, расположенных по оси ускорителя. Из приведенных кривых видно, что зоны и области повышенной дозы ТРИ для трубчатого пучка существенно зависят от энергии электронов.

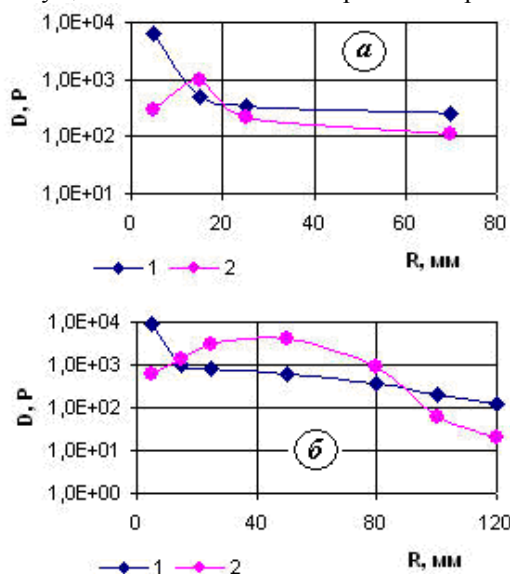


Рис. 6. Распределение доз ТРИ от трубчатого пучка для электронов с энергией:
а – 0,35 МэВ; б – 0,75 МэВ

ВЫВОДЫ

1. Определены величины доз жесткого ТРИ за один импульс РЭП для сильноточных ускорителей «Темп-А» и «Темп-Б».
2. Вычислены и экспериментально измерены различными методами диаграммы направленности ТРИ для различной геометрии электронного пучка (сплошного и трубчатого).
3. Величина и область, занимаемая дозой ТРИ, существенным образом зависит от величины ускоряющего напряжения.
4. Эксперименты показали, что на оси ускорителя при трубчатой конфигурации РЭП наблюдается увеличение дозы ТРИ в два раза на расстоянии

50 ± 20 мм от конвертера по сравнению с пучком сплошной конфигурации.

5. Полученные диаграммы направленности ТРИ с разработанным рентгеновским вакуумным вводом площадью 45 см^2 увеличивают возможности по исследованию воздействия ТРИ на различные материалы в радиационно-пучковом комплексе «ТЕМП».

Работа выполнена в рамках проекта ЯМРТ X-5-527 и проекта НАНО № 62/15. Н.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.В. Пашенко, А.Г. Пономарев, В.Т. Уваров и др. Дистанционное нанесение покрытий сильноточными релятивистскими электронными пучками // *Физика и химия обработки материалов*. 2006, № 3, с. 24-28.
2. Ю.Ф. Лонин, В.В. Литвиненко, В.Т. Уваров и др. Использование сильноточного РЭП микросекундной длительности для формирования упрочняющих покрытий // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, № 5, с. 91-95.
3. Ю.Ф. Лонин, И.И. Магда. Сильноточные релятивистские ускорители ИПЭНМУ ННЦ ХФТИ и их применение // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2008, № 5, с. 85-90.
4. В.М. Федотов. *Измерение энергии электронов сильноточных мегавольтных пучков по жесткости рентгеновского излучения из толстой мишени*: Препринт ИЯФ 86-40, Новосибирск, Институт ядерной физики СО АН СССР, 1986, 14 с.
5. В.Н. Бойко, А.Н. Валяев, А.Д. Погребняк. Модификация металлических материалов импульсными мощными пучками частиц // *УФН*. 1999, т. 169, № 11, с. 1243-1271.
6. Р. Егер. *Дозиметрия и защита от излучений*. М.: «Госатомиздат», 1961.
7. В.Ф. Коваленко. О расчете глубины проникновения электронов // *Электроника СВЧ*. 1972, № 1, с. 3-11.
8. Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, Г.Э. Саруханян и др. Исследование выхода тормозного излучения на сильноточных ускорителях релятивистских электронных пучков ИПЭНМУ // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2012, № 4, с. 163-166.
9. А.Б. Батраков, С.П. Бондаренко, Ю.Ф. Лонин и др. Оптимизация параметров релятивистских электронных пучков для генерации мощного рентгеновского тормозного излучения // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Плазменная электроника и новые методы ускорения»*. 2010, №4, с. 21-24.
10. А.В. Рыбка, И.М. Прохорец, И.Н. Шляхов и др. Дозиметрические характеристики детекторов рентгеновского и гамма-излучения на основе (CdZnTe) // *Вопросы атомной науки и техники. Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение»*. 2000, в. 4, с. 208-211.

Статья поступила в редакцию 26.10.2015

STUDY OF HARD BRAKING X-RAY RADIATION ON THE RADIATION-BEAM COMPLEX "TEMP"

A.B. Batrakov, E.G. Glushko, A.M. Yegorov, A.A. Zinchenko, V.V. Litvinenko, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, A.V. Rybka, S.I. Fedotov, V.T. Uvarov

A calculation over of basic parameters of the hard brake x-rayed radiation for the microsecond accelerating of relativistic electronic beam "TEMP". Optimization of converters is conducted for these aims. Maximal doses are experimentally got brake x-rayed radiation on beam-radiation complex "TEMP". The diagrams of orientation of the brake x-rayed radiation are taken off depending on energies of bunches and forms of electrodes.

ДОСЛІДЖЕННЯ ЖОРСТКОГО ГАЛЬМІВНОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ НА РАДІАЦІЙНО-ПУЧКОВОМУ КОМПЛЕКСІ «ТЕМП»

О.Б. Батраков, Е.Г. Глушко, О.М. Єгоров, А.О. Зінченко, В.В. Литвиненко, Ю.Ф. Лонін, А.Г. Пономарьов, А.В. Рыбка, С.І. Федотов, В.Т. Уваров

Наведено розрахунок основних параметрів жорсткого гальмівного рентгенівського випромінювання (ГРВ) для мікросекундних прискорювачів релятивістських електронних пучків «ТЕМП». Проведена оптимізація конвекторів для цього. Експериментально отримані максимальні дози ГРВ на радіаційно-пучковому комплексі «ТЕМП». Зняті діаграми напрямку ГРВ в залежності від енергії пучків та форми електродів.