

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РЕЛЯТИВИСТСКИХ ЭЛЕКТРОННЫХ ПУЧКОВ ДЛЯ ГЕНЕРАЦИИ МОЩНОГО РЕНТГЕНОВСКОГО ТОРМОЗНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

А.Б. Батраков, С.П. Бондаренко, Ю.Ф. Лонин, А.Г. Пономарев, Г.В. Сотников
**Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт»,
 Харьков, Украина**
E-mail: batrakov@e-mail.ua

Представлены результаты сравнительного анализа баланса тока для оптимизации параметров релятивистских электронных пучков (РЭП) микросекундной длительности. Рассчитана и изготовлена магнитная система для транспортировки электронных пучков. Приведены результаты численного моделирования генерации и транспортировки релятивистского электронного пучка по камере дрейфа с инъекцией его на коллектор при различных формах анодных вставок с острым кромочным катодом.

ВВЕДЕНИЕ

Области науки и техники, в которых применяются пучки ускоренных частиц, постоянно расширяются. Экспериментальные исследования параметров сверхжесткого рентгеновского излучения на микросекундном ускорителе «Темп-Б» связаны с использованием его как моделирующего устройства реакторной зоны. Параметры жесткого тормозного излучения зависят от энергии и тока релятивистских электронных пучков. Для успешного решения вышеуказанных задач необходимы сильноточные пучки с током в десятки килоампер и энергией частиц порядка мегаэлектронвольт. Актуальной задачей физики пучков заряженных частиц является увеличение длительности их импульса, а также тока и энергии. Значит должны меняться методы формирования и ускорения пучков.

Одной из важных задач, решаемых при транспортировке пучка электронов, является его фокусировка [1, 2]. Возможности для фокусировки пучка довольно разнообразны. Однако наибольшее распространение получили методы магнитной фокусировки. Неизбежное влияние на траекторию движения электронов оказывают следующие факторы: рассеяние на остаточных газах, искажения силовых линий магнитного поля, связанные с наличием скин-эффекта, которые даже, если и сами незначительны, могут существенно исказить движение частиц при транспортировке по камере дрейфа. Целью данной работы являлось создание эффективной формирующей и ускоряющей линии для генерации и транспортировки высокоэнергетичного релятивистского электронного пучка к мишени для получения мощного тормозного рентгеновского излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Внешний вид импульсного ускорителя релятивистских электронов «Темп-Б» с камерой взаимодействия, предназначенной для экспериментального исследования параметров мощного импульсного тормозного рентгеновского излучения, приведен на Рис.1. Ускоритель состоит из генератора Маркса с вакуумной изоляцией и вакуумного диода с Т-образной геометрией.

Пучок релятивистских электронов, который сталкивается с мишенью (т.е. конвертером), генерирует жесткое тормозное рентгеновское излучение.

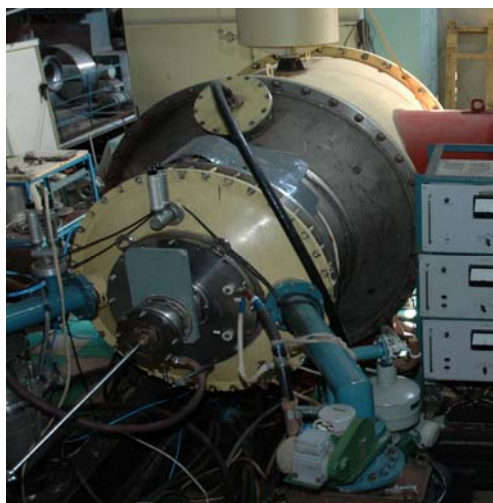


Рис.1. Внешний вид ускорителя «Темп-Б»

Схема сильноточного ускорителя «Темп-Б» и генерации пучка приведена на Рис.2.

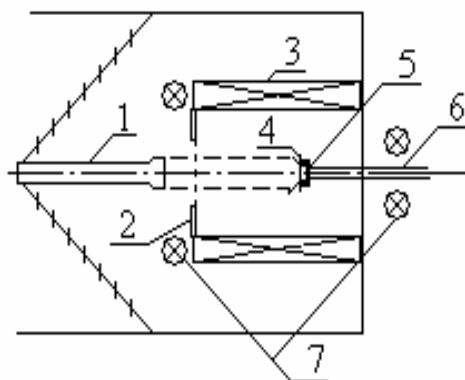


Рис.2. Сильноточный ускоритель «Темп-Б»:

1 – катод; 2 – анод; 3 – магнитное поле;
 4 – конвертер; 5 – детектор γ -излучения;
 6 – коллектор; 7 – пояс Роговского

Анализируя физические и электротехнические характеристики генератора импульсных напряжений (ГИН) ускорителя «Темп-Б», можно получить релятивистские электронные пучки с такими параметрами:

- энергия ускоренных пучков $E_n \approx 0,5 \dots 1,0$ МэВ;
 - ток пучка $I_n \approx 10 \dots 50$ кА;
 - длительность импульса тока пучка [3]
- $t_n \approx 1,5 \dots 2,5$ мкс.

Такой пучок при взаимодействии с конвертером (мишенью) может генерировать сверхжесткое тормозное рентгеновское излучение в пределах $400 < \gamma < 750$ кэВ [4].

Исследования проводились для различных конфигураций диода с кромочным катодом. Для измерения напряжения на выходе генератора использовался емкостной делитель напряжения, расположенный у основания катодной ножки в масле. Ток пучка измерялся поясом Роговского. Для измерения напряженности магнитного поля использовался изготовленный нами датчик.

Транспортировка сильнооточного электронного пучка требует применения фокусирующего продольного магнитного поля достаточно высокой напряженности, при которой ларморовский радиус электронов пучка, движущегося в таком поле, существенно меньше его диаметра (поперечных размеров пучка). При наличии поперечной энергии электронов пучка, которая может достигать нескольких килоэлектронвольт, и поперечном размере пучка от 50 до 70 мм напряженность продольного фокусирующего магнитного поля должна составлять несколько килоэртстед.

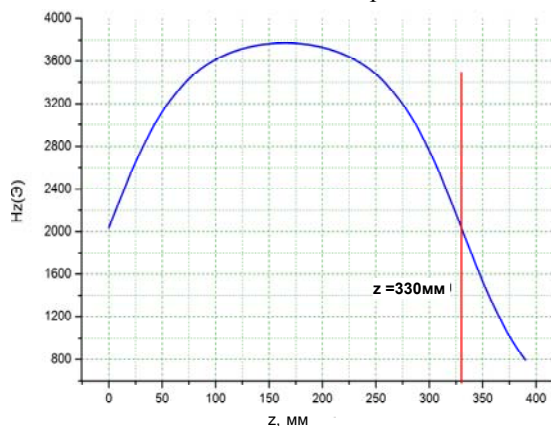


Рис. 3. Расчетные значения напряженности магнитного поля на оси соленоида длиной 330 мм

Для оценки величины магнитного поля в экспериментальной установке и дальнейшего применения распределения магнитного поля в численных расчетах нами был рассчитан его профиль на оси соленоида. Напряженность магнитного поля рассчитывалась, как суперпозиция напряженностей от всех витков соленоида [5]. На Рис.3 приведены расчетные значения напряженности магнитного поля при токе в обмотке соленоида 1 кА. Двойная намотка соленоида имеет 110 витков на длине соленоида 330 мм. Максимальное значение напряженности магнитного поля равно 3,7 кЭ, в середине соленоида и на концах оно уменьшается почти в два раза и равно 2,02 кЭ.

На Рис.4 приведены экспериментальные значения распределения напряженности магнитного поля. Как видно из сравнения Рис.3 и 4, результаты моделирования и эксперимента совпадают, за исключением краевых эффектов.

Искажения силовых линий напряженности магнитного поля, связанные с наличием скин-эффекта, приводят к расхождению результатов счета и эксперимента по краям магнитного поля.

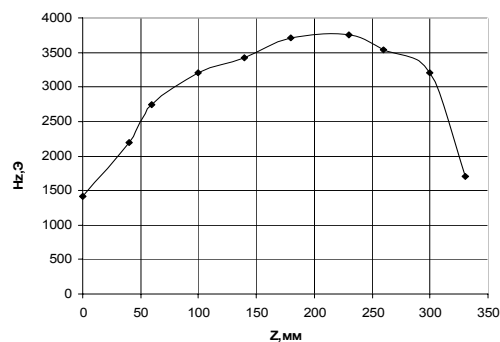


Рис. 4. Экспериментальные значения напряженности магнитного поля на оси соленоида длиной 330 мм

Предварительные оценки возможности генерации мощных релятивистских электронных пучков показали, что существующей напряженности магнитного поля не хватает для формирования и транспортировки пучка к коллектору. Нами был спроектирован новый соленоид с увеличенной в два раза напряженностью магнитного поля (Рис.5).

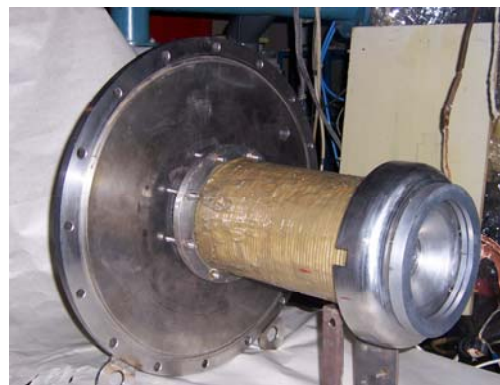


Рис. 5. Соленоид магнитного поля с анодной вставкой

Параметры спроектированного и изготовленного магнитного поля следующие. Длина камеры дрейфа, на которую намотана секция нового соленоида, составляет $L_0=330$ мм, ее наружный диаметр равен 210 мм. Общее число витков $N=220$. В обмотке соленоида магнитного поля использовался медный провод диаметром 5 мм. Индуктивность соленоида $L=2,887$ мГн и полное сопротивление соленоида $R=9,41$ Ом.

Вопрос охлаждения и механической прочности соленоида очень важен. Для эффективного рассеяния тепла в магнитной системе должны выполняться следующие условия:

- 1) тепловое сопротивление между каркасом магнитного поля и обмоткой соленоида должно быть достаточно низким, т.е. примененная изоляция не должна препятствовать отводу тепла;
- 2) частота импульсов должна быть такой, чтобы соленоид успевал остывать.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДА С Т-ОБРАЗНОЙ АНОДНОЙ ВСТАВКОЙ

Электронный пучок формировался в вакуумном диоде с магнитной изоляцией и через анодную вставку инжектировался в трубу дрейфа. Электроны эмитировались взрывоэмиссионным цилиндрическим кромочным катодом диаметром 54 мм, высотой кромки 20 мм и толщиной кромки 1 мм. Катод размещался в области 50...60% от максимума на-

пряженности продольного магнитного поля. Длина анодной вставки и радиус отверстия в ней составляли 47 и 26 мм соответственно. Длина трубы дрейфа в экспериментах составляла 175 мм и значительно превышала ее радиус (26 мм). Геометрия эксперимента приведена на Рис.4.

Результаты траекторного численного анализа генерации и транспортировки электронного пучка в камере дрейфа с цилиндрической анодной вставкой приведены на Рис.6. Расчеты выполнены с использованием CST Particle Studio. В качестве эмиссионной модели была выбрана модель с эмиссией, ограниченной пространственным зарядом. Для расчета расстояние от кромки катода до камеры дрейфа (катод-анодный промежуток) равнялось 32 мм. При этом к катоду было приложено напряжение -600 кВ, анод находился под нулевым потенциалом. Распределение магнитного поля, использованное при моделировании, соответствовало экспериментально измеренному (см. Рис.4), с амплитудой, увеличенной в два раза, т.е. максимальное значение напряженности магнитного поля равнялось $7,4$ кЭ. Разные цвета траекторий соответствуют различным энергиям электронов в системе. Максимальная энергия электронов равнялась ~ 620 кэВ. Для указанного анод-катодного промежутка, как следует из Рис.6, при указанном анод-катодном зазоре удается устойчиво транспортировать электронный пучок с током $7,456$ кА.

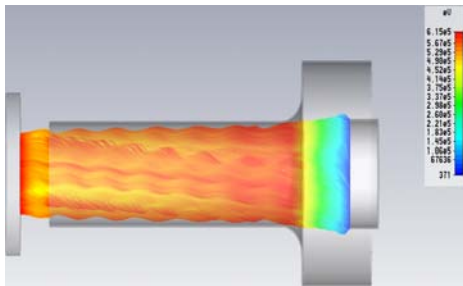


Рис.6. Результаты численного моделирования движения релятивистского электронного пучка по камере дрейфа с инжекцией его на коллектор

Распределение тока пучка в зависимости от размера анод-катодного промежутка приведено в Табл.1.

Таблица 1

Z, мм	$I_{ТП}$, кА	$I_{ТС}$, кА
22	7,55	0,7
27	6,805	0,36
32	6,456	0

Таблица 2

Z, мм	$I_{ТП}$, кА	$I_{ТС}$, кА
35	13,08	0
30	15,1	1,4
25	14,8	0,86
15	17,14	0,52
10	17,17	0,42

В Табл.2 показаны результаты численного моделирования по получению предельного тока пучка. Мы видим, оптимальный анод-катодный промежуток равен 22 мм, но при этом растут потери тока. В Табл.2 приняты следующие обозначения: Z, мм – расстояние между торцом кромочного катода и

анодным кольцом; $I_{ТП}$, кА – ток пучка, пришедший на коллектор; $I_{ТС}$, кА – ток пучка, высадившийся на стенку анодной вставки. Из приведенного выше можно сделать выводы о нецелесообразности использования анодной вставки такого профиля.

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИОДА С КОНУСООБРАЗНОЙ АНОДНОЙ ВСТАВКОЙ

Максимальный ток пучка можно получить, используя взрывоэмиссионный кромочный катод. Форма анодной вставки была выбрана нами конусообразной с углом раскрытия 51° .

Электронный пучок формировался в вакуумном диоде с магнитной изоляцией и через анодную вставку инжектировался в трубу дрейфа. Электроны эмиттировались взрывоэмиссионным цилиндрическим кромочным катодом диаметром 74,5 мм, высотой кромки 15 мм и толщиной кромки 1 мм. Длина анодной вставки 40 мм, угол ее раскрытия 51° , диаметр отверстия 70 мм, длина камеры дрейфа 170 мм. Ток в диоде варьировался изменением расстояния между анодом и катодом.

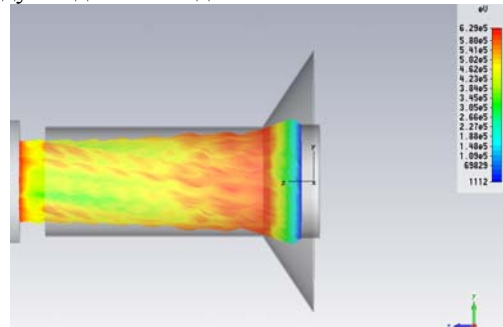


Рис.7. Результаты численного моделирования генерации и транспортировки релятивистского электронного пучка с конусной анодной вставкой

Результаты траекторного численного анализа генерации и транспортировки электронного пучка в камере дрейфа с конусной анодной вставкой приведены на Рис.7. Численные расчеты выполнены с использованием CST Particle Studio. В качестве эмиссионной модели была выбрана эмиссия, ограниченная пространственным зарядом. Для приведенного рисунка расстояние от кромки катода до камеры дрейфа (катод-анодный промежуток) равнялось от 10 до 35 мм. При этом к катоду было приложено напряжение -600 кВ, анод находился под нулевым потенциалом. Распределение магнитного поля, использованное при моделировании, соответствовало экспериментально измеренному (см. Рис.4), с амплитудой, увеличенной в два раза, т.е. максимальное значение напряженности магнитного поля равнялось $7,4$ кЭ. Разные цвета траекторий соответствуют различным энергиям электронов в системе. Максимальная энергия электронов равнялась ~ 620 кэВ. Для указанного анод-катодного промежутка, как следует из Рис.5, удается устойчиво транспортировать электронный пучок с током $17,17$ кА.

На Рис.8 приведены результаты численного моделирования транспортировки релятивистского электронного пучка на коллектор. Пучок на коллекторе имеет трубчатую форму со средней толщиной ~ 15 мм.

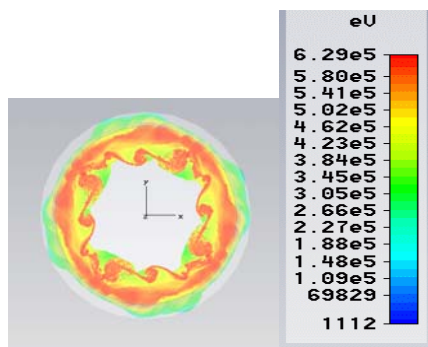


Рис.8. Расчетная форма отпечатка пучка на коллекторе

Результаты траекторного численного анализа генерации и транспортировки полного тока в камере дрейфа с конусной анодной вставкой для различных значений диаметра катода приведены в Табл.3.

Таблица 3

Z, мм	R кат., мм	I _{пт} , кА
30	36	21,4
40	36	11,88
40	40	16,48
50	40	10,27
40	32	8,8
40	28	6,62

В Таблице приняты следующие обозначения: I_{пт}, кА – полный ток пучка; R_{кат.} – радиус кромочного катода; Z, мм – расстояние между кромкой катода и анодной вставкой. Для приведенных в таблице расчетов расстояние от кромки катода до камеры дрейфа (катод-анодный промежуток) изменялось от 30 до 50 мм. При этом к катоду было приложено напряжение –600 кВ, анод находился под нулевым потенциалом. Распределение магнитного поля, использованное при данных расчетах, было такое как в предыдущих случаях (см. Рис.4 и 5). Для указанных анод-катодных промежутков с радиусами кромочных катодов от 28 до 40 мм удается получить максимальный полный ток пучка 21,4 кА.

Из приведенных результатов в Табл.3 можно сделать вывод о том, что увеличивать диаметр катода, а также расстояние между анодной вставкой и катодом не следует. Оптимальным зазором для дан-

ной геометрии является расстояние в 30 мм при диаметре кромочного катода в 72 мм.

ВЫВОДЫ

1. На основании экспериментальных результатов и численного моделирования определены геометрические размеры и форма катодов и анодных вставок для получения максимального тока пучка.

2. Численное моделирование генерации и транспортировки пучка в камеру дрейфа с рассчитанным магнитным полем позволило определить расположение катода и анодной вставки в диоде. Показано, что напряженность магнитного поля на кромке катода должна составлять 50...60% от максимального значения поля.

3. Численное моделирование показало возможность увеличения тока пучка ускорителя в два раза – до 21 кА. На основании проведенных расчетов был спроектирован и изготовлен узел формирования пучка с новым соленоидом магнитного поля.

Ожидается, что изготовленная магнитная система позволит транспортировать рассчитанный ток пучка на мишень для генерации мощного тормозного рентгеновского излучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Н.Ф. Ковалев, М.И. Петелин, М.Д. Райзер, А.В. Сморгонский. *Релятивистская высокочастотная электроника*. Горький: ИПФ АН СССР, 1979, с.76.
2. А.Н. Диденко, В.П. Григорьев, Ю.П. Усов. *Мощные электронные пучки и их применение*. М.: «Атомиздат», 1977.
3. М.А. Власов, О.В. Никонов // *Радиотехника и электроника*. 1983, т.28, в.5, с.965.
4. А.Б. Батраков, Б.В. Серeda, А.М. Егоров и др. Создание импульсного источника тормозного излучения на базе наносекундного и микросекундного ускорителей РЭП // *ВАНТ. Серия «Ядерно-физические исследования»*. 2004, №2, с.206-207.
5. Г. Кнопфель. *Сверхсильные импульсные магнитные поля*. М.: «Мир», 1972, с.291.

Статья поступила в редакцию 03.06.2010 г.

OPTIMIZATION OF PARAMETERS OF RELATIVISM ELECTRONIC BUNCHES FOR THE GENERATION OF POWERFUL X-RAY PHOTOGRAPHY BRAKE RADIATION

A.B. Batrakov, S.P. Bondarenko, Yu.F. Lonin, A.G. Ponomarev, G.V. Sotnikov

The results of comparative statement of current analysis are presented for optimization of parameters of relativism electronic beams (REB) of the microsecond duration. Expected and made magnetic system for transporting of electronic bunches. The results of numeral design of generation and transporting of relativism electronic bunch are resulted on the chamber of drift with the injectia of him on a collector at the different forms of anodal insertions with blading by an edge cathode.

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ РЕЛЯТИВІСТСЬКИХ ЕЛЕКТРОННИХ ПУЧКІВ ДЛІА ГЕНЕРАЦІЇ МОГУТНЬОГО РЕНТГЕНІВСЬКОГО ГАЛЬМІВНОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ

О.Б. Батраков, С.П. Бондаренко, Ю.Ф. Лонін, А.Г. Пономарьов, Г.В. Сотніков

Представлено результати порівняльного аналізу балансу струму для оптимізації параметрів релятивістських електронних пучків (РЕП) мікросекундної тривалості. Розрахована і виготовлена магнітна система для транспортування електронних пучків. Приведено результати чисельного моделювання генерациі і транспортування релятивістського електронного пучка по камері дрейфу з інжекцією його на колектор при різних формах анодних вставок з острийним катодом кромки.