

ВЫВОД ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ БЕТАТРОНА ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИМ СПОСОБОМ

Часть I

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕКОТОРЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ПУЧКА УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ В КАМЕРЕ БЕТАТРОНА

Б. А. Кононов

(Представлено профессором, доктором А. А. Воробьевым)

Электронный пучок с энергией $5 \div 25$ Мэв для исследований в физике, биологии, медицине может быть получен от индукционного ускорителя — бетатрона. Предложено несколько методов вывода электронов из бетатрона [1—10], описание и анализ которых сделаны нами ранее [11]. В Томском политехническом институте вывод электронов из бетатрона на 15 Мэв осуществлен несколькими методами [12]. Техника вывода электронов электростатическим способом уже достаточно подробно изложена [13]. В настоящей статье мы хотим остановиться на некоторых предварительных экспериментах по выводу электронного пучка из бетатрона, которые определили конструкцию всего выводного устройства.

При решении проблемы вывода электронов из камеры бетатрона необходимо знать следующие характеристики пучка электронов, движущихся в вакуумной камере ускорителя: геометрические размеры пучка электронов в конце ускорения, положение электронного пучка в вакуумной камере, поведение пучка при включении расширительной (смещающей) обмотки, а именно шаг развертывающейся спиральной траектории электронов. Эти параметры пучка наложат определенные требования на размеры и конструкцию выводящего устройства и место расположения его в ускорительной камере. Действительно, если пучок электронов имеет значительный вертикальный размер в конце ускорительного цикла при расширении орбиты, то вертикальный размер отклоняющего конденсатора необходимо взять по крайней мере не меньшим высоты пучка, чтобы избежать потери электронов. Однако если вертикальный размер пучка окажется малым, то совершенно не нужно делать отклоняющий конденсатор большим, излишне загромождать рабочую зону в ускорительной камере.

Известно несколько методов исследования пучков в ускорителях [14—16]. Мы исследовали пучок ускоренных электронов в камере бетатрона при помощи щупов из кристаллов KCl и NaCl. Окрашивание кристаллов является следствием образования F -центров в щелочногалоидных кристаллах под действием электронов и выделением коллоидного щелочного металла внутри кристалла [17—19]. В наших опытах кристаллы имели форму прямоугольного параллелепипеда размерами от $35 \times 25 \times 5$ до $15 \times 15 \times 8$ мм; поверхности кристаллов полировались.

Схема опыта по исследованию электронного пучка кристаллами представлена на рис. 1. Кристалл установлен на латунном стержне-держателе, который может перемещаться без нарушения вакуума с точностью до 0,05 мм. Чтобы избежать бомбардировки кристалла в момент инъекции неускоренными электронами, также вызывающими окрашивание кристалла, кристалл закрыт со всех сторон алюминиевой фоль-

гой толщиной 30 мк. В начале опыта кристалл убирается в патрубок камеры на время настройки ускорителя на номинальное излучение, после чего кристалл вдвигается на необходимую глубину и производится экспозиция. Для получения четкого рисунка на кристалле длительность экспозиции менялась от 60 мин при энергии ускоренных электронов 5 Мэв до 30 мин при 10 и 13 Мэв. Экспозиция связана с общей дозой, получаемой кристаллом за сеанс, и зависит, следовательно, от интен-

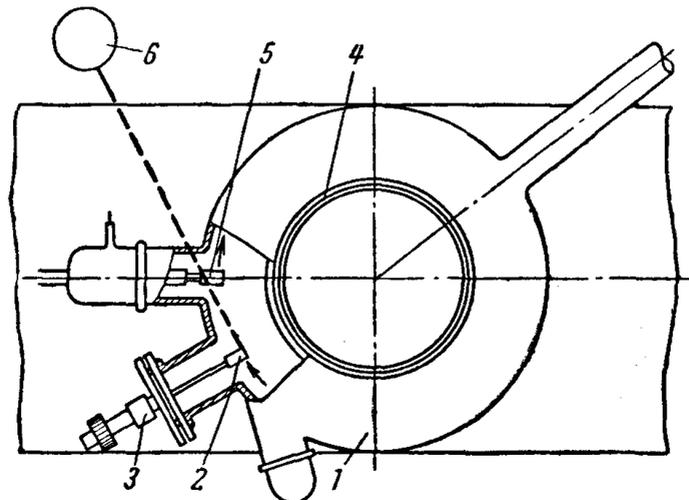


Рис. 1. Определение размеров электронного пучка кристаллами.

1 — вакуумная камера; 2 — кристалл; 3 — механизм для перемещенной кристалла; 4 — расширительная обмотка; 5 — надорбитный инжектор; 6 — ионизационная камера.

сивности излучения данного бетатрона. По условиям опыта интенсивность излучения, измеренная на расстоянии 1 м от вольфрамовой мишени, равнялась лишь 0,7 рентген/мин. При облучении кристалла вольфрамовая мишень убиралась — поднималась вместе с инжектором над плоскостью равновесной орбиты, так что пучок ускоренных электронов падал на кристалл, и рентгеновское излучение от кристалла контролировалось ионизационной камерой (рис. 1). Смена кристаллов производится через разборное соединение с резиновым уплотнением без разборки электромагнита бетатрона и перестановки вакуумной камеры, и, следовательно, орбита электронов занимает одно и то же пространственное положение в каждом случае.

Фотографии отпечатков электронного пучка на кристаллах, приведенные на рис. 2, являются типичными картинками, по которым можно судить о размерах пучка и шаге его спиральной траектории. Вертикальный размер пучка во всех случаях лежит в пределах 9—11 мм. На радиусах, меньших $R=159$ мм (радиус, где $n=1$), пучок однороден по высоте и имеет шаг, близкий к 1 мм. При $R>159$ мм происходят значительное увеличение шага спиральной траектории смещаемого пучка и заметное разделение его на три части по вертикали. Наиболее интенсивный средний пучок электронов имеет в то же время и наибольший шаг. Интенсивность окрашивания кристал-

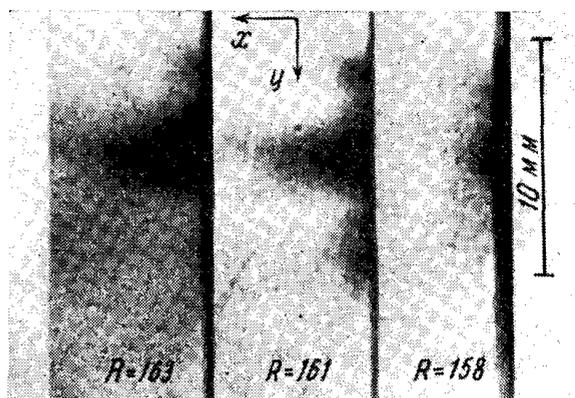


Рис. 2. Типичные отпечатки электронного пучка на различных радиусах.

лов определялась при помощи микрофотометра типа МФ-4. При этом сняты зависимости оптической плотности почернения $S=f(x)$ и $S=f(y)$:

$$S = \lg \frac{I_1}{I_2},$$

где S — оптическая плотность почернения;
 I_1 — интенсивность падающего света;
 I_2 — интенсивность прошедшего света.

Направления x и y показаны на рис. 2. Из кривой $S=f(x)$ определяется шаг спиральной траектории электронов, из $S=f(y)$ — вертикальный размер пучка. При этом предполагается линейная зависимость плотности почернения кристалла от количества электронов, бомбарди-

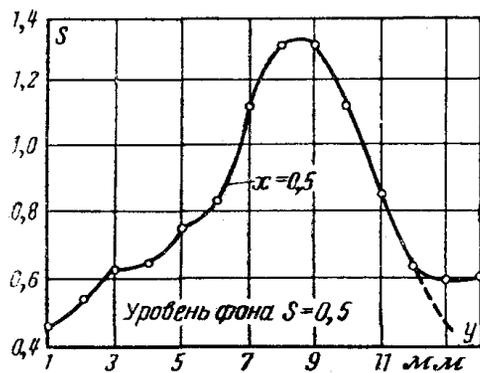


Рис. 3. Определение вертикального размера пучка.

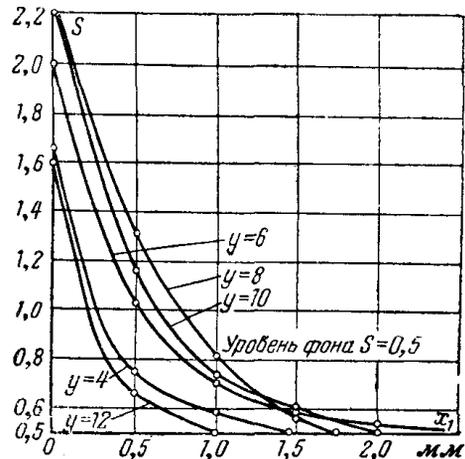


Рис. 4. Определение шага спиральной траектории на $R=158$ мм.

ровавших кристалл, т. е. что окрашивание кристалла далеко от области насыщения, когда дальнейшая бомбардировка не увеличивает плотности почернения. В области насыщения кристалл NaCl имеет сине-пурпуро-

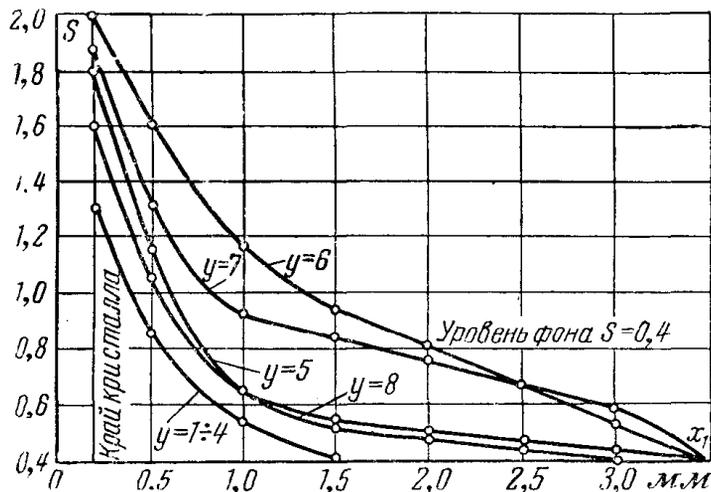


Рис. 5. Определение шага спиральной траектории на $R=165$ мм.

вую окраску [17]. В наших опытах кристаллы имели желтую и коричневую окраску.

Типичные кривые $S=f(x)$ и $S=f(y)$ представлены на рис. 3—5. Вертикальный размер пучка, как видно из рис. 3, равен $9 \div 12$ мм. По кривым рис. 4 и 5 можно оценить шаг электронной траектории. Он равен примерно 2 мм на $R=158$ мм и 3,5 мм на $R=165$ мм. Для более точного определения шага, знание которого необходимо для определения места расположения отклоняющего конденсатора, применялось графическое интегрирование этих кривых, т. е. была построена простран-

ственная картина $S=f(x,y)$ (рис. 6) и подсчитан объем фигуры. Для вычисления объема фигура разбивается плоскостями (z,y) на отдельные слои (I, II, III и т. д.), а каждый слой делится на части плоскостями (z,x) . В результате вычисляется объем получающихся элементов — параллелепипедов и пирамид, суммирование которых дает объем всей фигуры V_{Σ} . Принимая $V_{\Sigma}=100\%$, находим долю каждого слоя V_I , V_{II} и т. д. в общем объеме V_{Σ} в процентах. Объем фигуры в функции расстояния $V=f(x)$ представлен на рис. 7. Зависимость показывает процент электронов, который может попасть в щель отклоняющего конденсатора, и процент электронов, потерянных на лобовой поверхности отсекающей пластины конденсатора. Как видно из кривых рис. 7, если расстояние между пластинами отклоняющего конденсатора равно 2 мм, то почти все электроны будут захвачены конденсатором. Однако если толщина отсекающей пластины равна 0,05 мм (заштрихованная область в начале графика

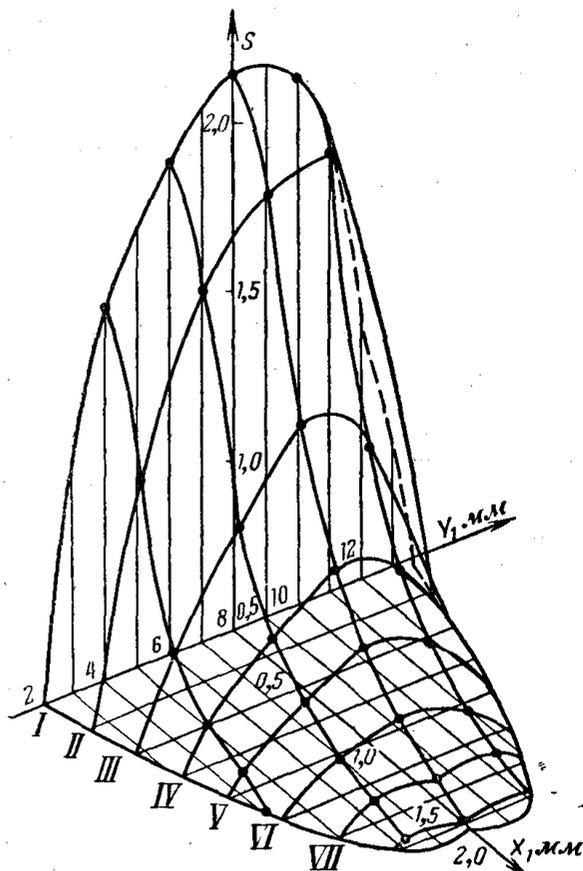


Рис. 6. Распределение электронов в пучке на $R=158$ мм.

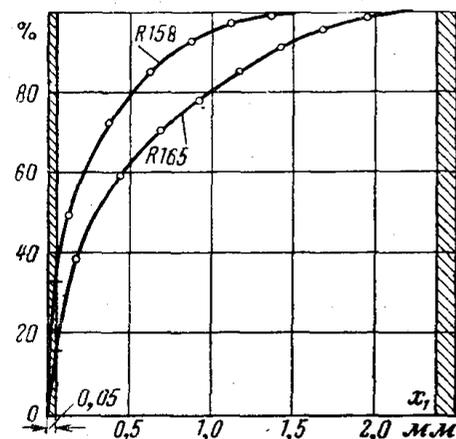


Рис. 7. Шаг спиральной траектории и потеря электронов на отсекающей пластине толщиной 0,05 мм.

ка), то до 33% электронов будет потеряно на лобовой поверхности пластины при установке конденсатора на $R=158$ мм и до 16% при установке его на $R=165$ мм. Если все электроны, попавшие в щель отклоняющего конденсатора, будут выведены из ускорительной камеры, то процент выведенных электронов, или эффективность вывода, не будет превышать 84% при установке конденсатора на $R=165$ мм.

Установка его на меньших радиусах невыгодна вследствие увеличения потери электронов на лобовой поверхности отсекающей пластины за счет малого шага спиральной траектории (рис. 7, кривая $R=158$ мм).

Таким образом, для исследованного бетатрона характеристики пучка получаются следующими.

1. Высота электронного пучка в момент расширения электронной орбиты не более 12 мм. Следовательно, высота пластин отклоняющего конденсатора должна быть более 12 мм.

2. Шаг спиральной траектории электронов, малый до $R=158$ мм, резко возрастает вблизи граничной окружности — окружности, на которой электроны выходят из области действия фокусирующих сил магнитного поля ускорителя $R=163$ мм. Шаг спиральной траектории не превышает 2,5 мм в пределах вакуумной камеры ускорителя. Следовательно,

расстояние между пластинами отклоняющего конденсатора должно быть порядка 2—2,5 мм.

3. Распределение электронного потока на данном шаге спиральной траектории таково, что большее число электронов имеет меньший шаг и потому на лобовой поверхности довольно тонкой отсекающей пластины — 50 мк — будет теряться 15—20% электронов.

4. Отклоняющий конденсатор должен устанавливаться на $R=163$ —165 мм.

5. Электронная орбита находится в средней плоскости межполюсного пространства. Орбита может выходить из этой плоскости, если при сборке электромагнита профилированные полюсы смещены относительно друг друга. В этом случае при помощи кристаллов можно определить отклонение орбиты от средней плоскости и указать причину, вызывающую искажение орбиты.

Автор выражает благодарность профессору Воробьеву А. А., под руководством которого выполнена настоящая работа.

Литература

1. Skaggs L. S. et al., Development of the Betatron for Electron Therapy Radiology, 50, 2, 167 (1948).
2. Skaggs L. S. et al., Technique at Producing an Electron Beam from the Betatron, Phys. Rev., 73, 10, 1233 (1948).
3. Fawcett S. L. and Crittenden E. C., Ejection of the Electron Beam from a Betatron, RSJ, 21, 11, 935 (1950).
4. Crittenden E. C., Parkins W. E., Methods for Betatron or Synchrotron Beam Removal, Journ. of Appl. Phys., 17, 6, 444 (1946).
5. Lawson J. D. et al., Extraction of the Electron Beam from a 30 MeV Synchrotron, Nature, 166, 4214—234 (1950).
6. Foote R. S. and Petree B. A., Pulsed Magnetic Extraction for Removing the Electron Beam from a Betatron, RSJ, 25, 7, 694 (1954).
7. Gund K., Paul W., Experiments with a 6 MeV Betatron, Nucleonics, 7, 1, 36 (1950).
8. Gund K., Reich H., Herausführung des Elektronenstrahls aus der Electronscheuler, Zeitschrift für Physik, Bd 126, S. 383 (1949).
9. Courant E. D. and Bethe H. A., Electrostatic Deflection at a Betatron or Synchrotron Beam, RSJ, 19, 10, 632 (1948).
10. Wideroe R., On Bringing the Beam out of a Betatron, Phys. Rev., 71, 6, 376 (1947).
11. Кононов Б. А., Вывод электронов из бетатрона на 15 Мэв электростатическим способом. Диссертация, ТПИ, Томск, 1957.
12. Воробьев А. А., Кононов Б. А., Москалев В. А., Соколов Л. С., Получение пучка сверхбыстрых электронов для медицинских целей, Изв. ТПИ, т. 82.
13. Кононов Б. А., Вывод электронов из бетатрона на 15 Мэв электростатическим способом, Изв. ТПИ, т. 87, стр. 322, 1957.
14. „Циклотрон“, сб. статей. Перевод под ред. П. А. Черенкова, ОГИЗ, ТТЛ, 1948.
15. RSJ, 22, 773—776 (1951).
16. RSJ, 22, 176—182 (1951).
17. McLennan D. E., Study of Ionic Crystals under Electron Bombardment, Canadian Journal of Physics, 29, 2, 122 (1951).
18. Westervelt D., Radiation Damage in Sodium Chloride, Phys. Rev., 86, 643 (1952).
19. Захаров А. И., Действие излучения на твердое тело, УФН, т. VII, вып. 4.