ВЫВОД ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА ИЗ КАМЕРЫ БЕТАТРОНА

Л. С. Соколов

(Представлено профессором, доктором А. А. Воробьевым)

Основная задача вывода ускоренных электронов из бетатрона состоит в том, чтобы извлечь электроны из сильного магнитного поля, в котором они вращаются в процессе ускорения, в виде узкого пучка и с наименьшими потерями.

До сих пор это решалось при помощи выводящего устройства, расположенного около внешнего края зоны ускорения.

В настоящей статье сообщается об экспериментальном осуществлении вывода пучка электронов с энергией 10 Мэв из бетатрона. Предла-

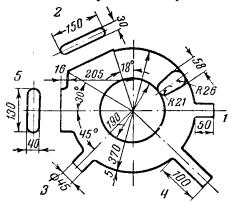


Рис 1. Эскиз вакуумной камеры для вывода электронов с энергией 15 *Мэв* из бетатрона.

гаемый метод вывода электронов из бетатрона не включает в себя наличие выводящего устройства, расположенного внутри вакуумной камеры бетатрона.

Его можно рассматривать, по существу, как предельный случай смещения равновесной орбиты электронов с ее исходных позиций. В известной нам литературе этот метод не описан и осуществлен нами впервые.

Для вывода пучка электронов из бетатрона мы применили керамическую вакуумную камеру, изготовленную на Ленинградском фарфоровом заводе имени М. В. Ломоносова по нашему чертежу (рис. 1).

В патрубок 1 помещен инжектор. Он располагается в плоскости равновесной орбиты на окружности, где показатель спадания магнитного поля $n\!=\!1$. На тыльной стороне инжектора имеется вольфрамовая мишень. Выводное окно 2 закрыто медной фольгой толщиной 0,2 мм, которая припаяна к латунному фланцу. В патрубки 3 и 5 помещены отдельные вольфрамовые мишени. Патрубок 4 использован для откачки вакуумной камеры. Вид на вакуумную камеру, установленную в бетатрон, представлен на рис. 2. На переднем плане — выводное окно, слева — инжектор, справа — механизм для передвижения мишени, установленной в патрубке 5 (рис. 1).

Для удобства в проведении опытов смещающие обмотки выполнены в виде 24 катушек по четыре витка в каждой катушке, которые прикреплены к двум тонким (толщиной 0,5 мм) текстолитовым дискам (рис. 3). Один из дисков укладывается под , другой над вакуумной камерой. Каждая пара противолежащих катушек образует смещающую обмотку азимутальной протяженностью $\Theta_1 = 30^\circ$. Отдельные смещающие обмотки можно соединять последовательно в любых сочетаниях, получать различные углы Θ_1 и различные азимутальные положения обмотки в межполюсном пространстве бетатрона. Имеются также обмотка (десять витков) на центральных вкладышах («галетах») и

специальная обмотка (рис. 4), позволяющая изменять величину нару-

шения магнитного поля бетатрона по радиусу.

Первые эксперименты были проведены со смещающей обмоткой протяженностью $\Theta_1 = 135^\circ$, расположенной так, как показано на рис. 5. Импульсный ток, протекающий по смещающей обмотке, производит своим магнитным полем ослабление управляющего магнитного поля

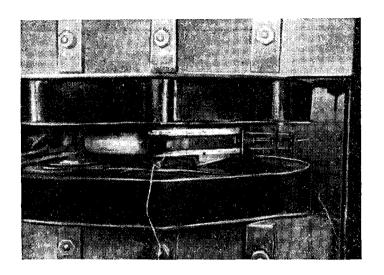


Рис. 2. Установка вакуумной камеры в бетатроне.

бетатрона. Орбита электронов смещается наружу, в направлении патрубка 5 (рис. 5 и 1) до тех пор, пока электроны не освободятся из-подвлияния фокусирующих сил к орбите.

Не менее чем 1/5 часть пучка попадает в выводное окно и через мед-

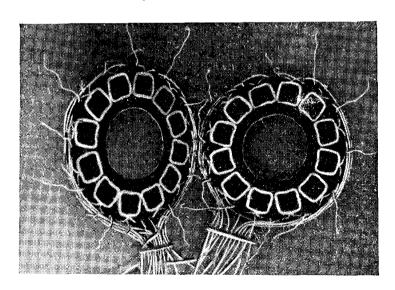


Рис. 3. Обмотки для смещения равновесной орбиты.

ную фольгу выходит из вакуумной камеры. Эффективность вывода получается в 2 раза выше эффективности, достигнутой Скагсом [1] при выводе электронов магнитным шунтом, и почти равна эффективности вывода электронов при помощи электростатического конденсатора, достигнутой Гундом [2] без применения рассеивающей фольги.

На рис. 6 представлены фотографии пучка электронов, сделанные перпендикулярно оси пучка непосредственно у выводного окна (верхний снимок) и на расстоянии 10 *см* от него (нижний снимок). Горизон-

тальный размер пучка при выходе электронов из окна составляет 6 см и равен горизонтальному размеру выводного окна. При помощи наперстковой ионизационной камеры типа «Пион» мы измерили распределение ионизации по горизонтальному сечению пучка. Это распределение показано на рис. 6 над фотографией пучка. В таблице приведены численные значения интенсивности ионизации.

		 I	1		
r, cm	19	20,5	22	23,5	25
J, $p/мин$	1 000	1 100	920	640	300

Плотность электронов распределена по горизонтальному сечению пучка неравномерно. Имеет место максимум плотности электронов.

На расстоянии 10 *см* от окна сечение пучка значительно больше. По сравнению с размерами пучка непосредственно у окна камеры радиальный размер пучка на расстоянии 10 *см* от окна увеличивается в 1,5 раза, а высота пучка — в 5 раз. Увеличение размеров пучка обусловлено рассеянием электронов при прохождении их через медную фольгу и в воздухе.

Для определения траектории освобожденного пучка внутри вакуумной камеры был поставлен следующий опыт. Ионизационная камера

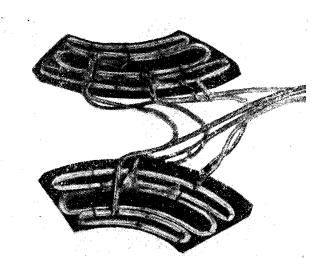


Рис. 4. Специальная смещающая обмотка.

200 см³ устанавливается в том месте, где производится максимальная ионизация (точка 1 на рис. 5). Вольфрамовая мишень, установленная в патрубке 3 (рис. 1), вдвигается постепенно внутрь вакуумной камеры. Для каждого положения мишени отмечается излучение, регистрируемое камерой 200 см³ (рис. 7). При вдвижении мишени внутрь вакуумной камеры излучение сначала не меняется. Это значит, что электроны выходят из вакуумной камеры, не задевая мишени. Затем интенсивность несколько увеличивается (на 5%). Увеличение интенсивности обусловлено тем, что часть электронов рассеивается на краю мишени. Угол выхода их наружу увеличивается. Наконец, наступает резкое уменьшение интенсивности излучения: мишень перехватывает выходящий электронный пучок. Интервал перемещения мишени, соответствующий полному преграждению выхода электронов мишенью, можно принять равным радиальному размеру пучка на азимуте мишени.

Теперь мы можем представить себе общую схему вывода (рис. 5), откуда нетрудно определить средний угол φ_{cp} выхода пучка наружу и угол ψ расходимости пучка внутри вакуумной камеры, если расстояние по оси пучка от мишени 3 (рис. 1) до фольги окна 2 (рис. 1) составляет $32\ cm$: $\varphi_{cp}\approx 9^\circ$, $\psi\approx 10^\circ$.

Расхождение пучка в воздухе составляет приблизительно 17° по горизонтали.

Величина тока ускоренных электронов, измеренная цилиндром Фарадея на расстоянии 3 cm от выводного окна, равна $2 \cdot 10^{-10}$ a. Эффективность вывода составляет не менее 22%.

В соответствии с полученными результатами целесообразно ввести понятие о наружных и внутренних потерях электронов, при этом элек-

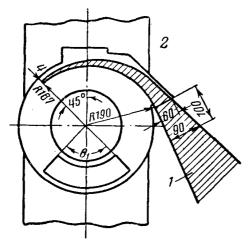


Рис. 5. Общая схема вывода электронного пучка с энергией 10 *Мэв* из бетатрона.

1 и 2 — ионизационные камеры.

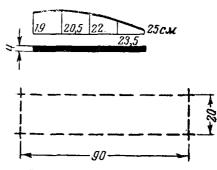


Рис. 6. Изображения пучка.

троны, составляющие внутреннюю часть выходящего пучка и не попавшие в выводное окно из-за столкновения со стенками вакуумной камеры, определяют внутренние потери, а электроны, те-

ряющиеся снаружи от оси выходящего пучка, определяют наружные потери. Относительную величину наружных потерь мы измеряли при помощи ионизационной камеры 2 (рис. 5).

Работы по повышению эффективности вывода целесообразно начать с изучения воздействий на процессы смещения орбиты и освобождения электронов из-под влияния фокусирующих сил при изменениях размеров, формы и положения смещающей обмотки. Выясним значение составляющих вынужденного движения электронов под действием неоднородности в управляющем магнитном поле бетатрона. Относительная величина ε_m составляющих вынужденного движения зависит от порядка гармоники m и азимутальной протяженности Θ_1 неоднородности в управляющем магнитном поле бетатрона.

В линейном приближении [3]:

$$\varepsilon_{0} = \frac{\Theta_{1}}{2(n-1)};$$

$$\varepsilon_{m} = \frac{2\sin\frac{m\Theta_{1}}{2}}{m(m^{2}+n-1)},$$
(1)

где n— показатель спадания магнитного поля бетатрона по радиусу; m— порядок гармоники вынужденных колебаний (m=1, 2, 3,...). При изменении $\Theta_1 \varepsilon_0$ и ε_m изменяются в соответствии с формулами (1). Например, когда $\Theta_1 = \pi$, первая гармоника имеет максимальную величину, а вторая гармоника отсутствует. Когда $\Theta_1 = \frac{\pi}{2}, \frac{3}{2}\pi$, вторая гармоника имеет максимальные положительное или отрицательное значе-

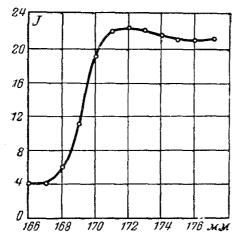
ние, а первая гармоника значительно меньше своего максимального значения (при $\Theta_1 = \pi$) и т. д.

Возникает вопрос, как будет изменяться эффективность вывода электронов из камеры ускорителя при изменении азимутальной протяженности обмотки Θ_1 .

Опыт проведен следующим образом.

Смещающая обмотка и ионизационная камера 1, регистрирующая интенсивность выходящего из вакуумной камеры пучка ускоренных электронов, были установлены так, как показано на рис. 5.

Не меняя азимутального положения середины смещающей обмотки, мы изменяли азимутальную протяженность обмотки Θ_1 . Всего было испытано пять обмоток: $\Theta_1 = 90$, 150, 210, 270, 330°. Для каждой обмотки измеряли интенсивность выходящего из камеры электронного пучка. Результаты опыта показаны на рис. 8, из которого следует, что изменение азимутальной протяженности смещающей обмотки в пределах 90—



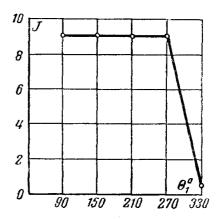


Рис. 7. Изменение интенсивности ионизации в точке 1 при изменении радиальной координаты мишени 3 (рис. 1).

Рис. 8. Влияние азимутальной протяженности смещающей обмотки Θ_1 на эффективность вывода J.

 270° и соответствующее изменение относительной величины составляющих вынужденного движения не приводят к изменению эффективности вывода. При $\Theta_1 = 270^{\circ}$ выход электронов прекращается, поскольку первая гармоника вынужденных колебаний сильно уменьшается, и смещение орбиты становится симметричным.

При изменении Θ_1 остаются также неизменными средний угол φ_{cp} выхода электронного пучка наружу и угол ψ расходимости пучка внутри вакуумной камеры.

Эксперимент показывает, что перед освобождением электронов из-под влияния фокусирующих сил возникает такой режим вынужденных колебаний, который не зависит от азимутальной протяженности смещающей обмотки. Отсюда следует, что какие бы комбинации смещающих обмоток мы ни создавали, лишь бы относительная величина є первой гармоники вынужденных колебаний не получалась меньше некоторой критической величины, эффективность вывода электронов из ускорителя изменить не удается.

Азимутальную протяженность смещающей обмотки Θ_1 можно принять такой, при которой требуется минимальная реактивная энергия для полного удаления ускорснных электронов из рабочей зоны бетатрона [4].

Обратимся снова к рис. 5. Возьмем $\Theta_1 = 90^\circ$ и будем считать, что середина смещающей обмотки находится на азимуте, равном нулю.

Как будет изменяться эффективность вывода ускоренных электронов из вакуумной камеры, если ту же самую смешающую обмотку помещать в различных азимутальных положениях относительно выводного окна?

Ответ на этот вопрос дает график рис. 9, который представляет собой зависимость интенсивности выходящего из камеры электронного пучка от азимутального положения середины смещающей обмотки протяженностью 90°. Из рис. 9 видно, что для получения максимальной эффективности вывода надо подобрать оптимальное положение смещающей обмотки относительно выводного окна камеры.

Рассмотрим ряд опытов с изменением формы смещающей обмотки. Эскиз обмотки, при помощи которой можно изменять закон наруше-

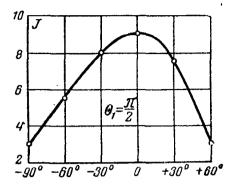


Рис. 9. Влияние азимутального расположения смещающей обмотки относительно выводного окна на эффективность вывода.

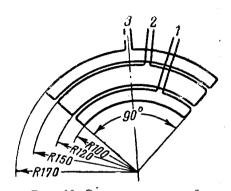


Рис. 10. Эскиз смещающей обмотки.

ния магнитного поля бетатрона по радиусу, показан на рис. 10, а ее общий вид—на рис. 4.

При последовательном соединении обмоток 1, 2 и 3 (рис. 10) получаем секторную обмотку. При соединении обмоток 2 и 3 (с отключением обмотки 1) получаем заорбитную обмотку, а соединяя обмотки

1 и 2 (с отключнием обмотки 3),—внутриорбитную смещающую обмотку. Обмотки секторная и заорбитная действуют одинаково, а секторная обмотка нами уже рассмотрена. Исследуем внутриорбитную обмотку в процессе ее превращения в секторную.

Процесс превращения одной обмотки в другую можно представить себе следующим образом. Пусть обмотки 1 и 2 соединены последовательно и образуют внутриорбитную смещающую обмотку. При действии такой обмотки интенсивность выходящего из камеры электронного пучка составляет примерно $^2/_3$ интенсивности, получаемой с использованием секторной смещающей обмотки. Подключим обмотку 3 к дополнительной импульсной схеме, которая действует

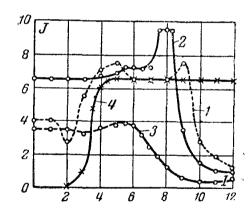


Рис. 11. Изменение эффективности вывода электронов J из камеры в зависимости от изменения амплитуды тока I.

1 — в обмотке 3 (рис. 10); 2 — в центральной обмотке; 3 — то же при увеличении тока; 4 — в обмотках 1, 2 и 3.

синхронно с основной схемой смещения и выдает импульс тока с регулируемой амплитудой и шириной, равной ширине основного смещения импульса. Постепенно увеличивая амплитуду дополнительного импульса тока (в обмотке 3), можно в некоторый момент времени осуществить действие на электроны, эквивалентное действию секторной обмотки

Интересно проследить изменение эффективности вывода электронов из камеры при изменении амплитуды тока в обмотке 3 (рис. 10), показанном на кривой I (рис. 11). Зависимость I (рис. 11) имеет сложный характер и не поддается полному объяснению. Сравним ее с зависимостью I (рис. 11), которая характеризует изменение эффективности вы-

вода электронов при изменении амплитуды смещающего тока в секторной обмотке. Изменением формы обмотки, приводящим к изменению величины нарушающего магнитного поля по радиусу, можно добиться увеличения эффективности вывода электронов из камеры в 1,15 раза. Такое повышение эффективности вывода нельзя считать приемлемым, поэтому необходимо искать новые способы воздействия на процесс освобождения электронов из-под влияния фокусирующих сил.

Смещающую обмотку можно выполнять в виде обычной секторной обмотки с радиальным размером, равным радиальному размеру межпо-

люсного пространства бетатрона.

Известно, что действие смещающей обмотки, расположенной на центральных вкладышах (галетах)¹, приводит не только к увеличению радиуса равновесной орбиты, но и к одновременному уменьшению радиуса окружности освобождения (наружной неустойчивой орбиты). Применением такой обмотки совместно с секторной смещающей обмоткой можно добиться ограничения колебаний и одновременного перемещения точки освобождения электронов внутрь вакуумной камеры.

Совместное синхронное действие двух смещающих обмоток на электронный пучок было нами осуществлено. Применение двух смещающих обмоток, питаемых от отдельных импульсных схем, привело

к очень хорошим результатам.

На рис. 11 зависимость 2 характеризует изменение эффективности вывода электронов из камеры при изменении амплитуды тока в центральной обмотке. При этом в секторной обмотке протекает ток с неизменной амплитудой. По сравнению с величиной эффективности вывода, достигнутой при использовании одной секторной обмотки, эффективность вывода при совместном использовании секторной и центральной смещающих обмоток увеличивается в 1,5 раза.

Практически увеличение эффективности вывода обусловлено главным образом уменьшением наружных потерь, изменение которых при увеличении тока в центральной обмотке характеризует зависимость 3 (рис. 11).

Опыты, описанные выше, были проведены при скоростях смещения **ра**вновесной орбиты 1—3 *мм/мксек*. Чтобы повысить скорость смещения орбиты, надо увеличивать скорость нарастания смещающего магнитного поля по времени.

С технической стороны задача по увеличению скорости смещения орбиты встречает ряд трудностей. Эта задача была решена в ТПИ студентом-дипломником т. Бизенковым под руководством канд. техн. наук В. М. Разина. Усовершенствованная импульсная схема смещения принципиально не отличается от прежней схемы смещения [5], если не считать замены игнитрона U-100/1000 шариковым разрядником. Однако за счет повышения напряжения u, до которого заряжается емкость C, и уменьшения паразитных индуктивностей скорость смещения орбиты удалось довести до 30 mm/mkcek.

Параметры новой схемы смещения $C\!=\!0,\!5$ мк $\phi;$ $w\!=\!1;$ $\Omega\!=\!0,\!8\cdot\!10^6$ $\frac{1}{ce\kappa}$ ·

Для смещения орбиты применялись предельно возможные в нашей схеме величаны

$$u = 5 \ \kappa в$$
 и $I = 1000 \ a$.

. Увеличение скорости смещения орбиты электронов от 2 до 30 мм/мксек приводит к увеличению эффективности вывода ускоренных электронов из вакуумной камеры в 2 раза за счет уменьшения внутренних потерь электронов.

Интересно отметить, что, применяя синхронное действие секторной и центральной обмоток в том случае, когда под действием секторной

¹ В дальнейшем мы будем называть центральной обмоткой.

обмотки орбита смещается со скоростью 30 мм/мксек, мы все равно получаем увеличение эффективности вывода еще в 1,5 раза.

В итоге мы добились повышения эффективности вывода до 75%.

Максимальная величина тока ускоренных электронов, измеренная цилиндром Фарадея на расстоянии 3 см от выводного окна, равна $6 \cdot 10^{-10} a$.

Форма поперечного сечения пучка остается без изменения. Она по-

казана на рис. 6.

Из всех известных нам методов вывода пучка заряженных частиц из циклических ускорителей предлагаемый метод наиболее эффективен и наиболее прост. Его недостатком является неудовлетворительная фо-

кусировка выходящего пучка частиц.

Автор выражает благодарность профессору, доктору техн. наук А. А. Воробьеву за представление темы и руководство научно-исследовательской работой, а также кандидатам технических наук В. А. Москалеву и В. М. Разину за всестороннюю техническую помощь в работе, многочисленные консультации и советы.

Литература

1. Skaggs L. S. et al., Development of the Betatron for Electron Therapy, Radiology, 50, 167-173, 1948.
2. Gund K., Paul W., Experiments with a 6-MeV Betatron, Nucleonics, 7, 36-

46, 1950.

3. Goward F. K., Effect of Azimuthal Inhomogeneities in the Magnetic Field of a Betatron, Proc. Phys. Soc., 61, 234, 1948.

4. Goward F. K., Dain J., Optimum Disturbing Field for Synchrotron Beam

Ejection, Nat., 159, 639, 1947.
5. Соколов Л. С., Исследование электронного пучка внутри вакуумной камеры бетатрона, Изв. ТПИ, т. 94.