

$n=1$. На тыльной стороне инжектора имеется вольфрамовая мишень. Вы-
водное окно 2 закрыто медной фольгой толщиной 0,2 мм, которая при-
паяна к латунному фланцу. В патрубки 3 и 5 помещены отдельные воль-
фрамовые мишени. Патрубок 4 использован для откачки вакуумной камеры.

Для удобства в проведении опытов смещающие обмотки выполнены
в виде 24 катушек, по 4 витка в каждой катушке, которые прикреплены
к двум тонким (толщиной 0,5 мм) текстолитовым дискам (рис. 2). Один
из дисков укладывается под вакуумной камерой, другой—над ней. Каждая
пара противоположных катушек образует смещающую обмотку, азиму-
тальной протяженностью $\Theta_1=30^\circ$. Отдельные смещающие обмотки можно
соединять последовательно в любых сочетаниях, получать различные
углы Θ , и различные азимутальные положения обмотки в междуполюсном
пространстве бетатрона. Имеются также обмотка (10 витков) на централь-
ных вкладышах (галетах) и
специальная обмотка (рис. 3),
позволяющая изменять вели-
чину нарушения магнитного
поля бетатрона по радиусу.

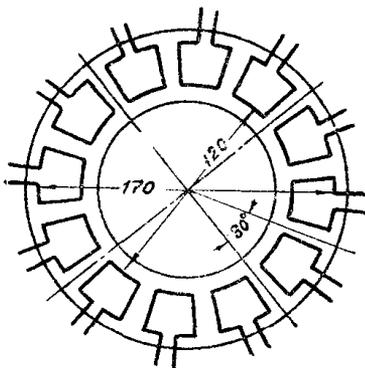


Рис. 2. Обмотки для смещения
равновесной орбиты.

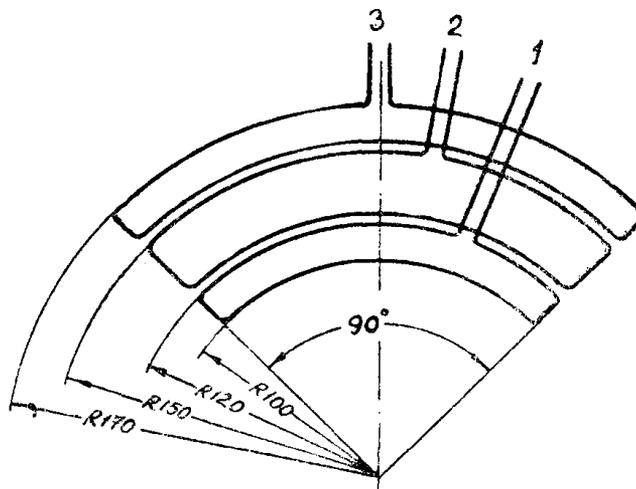


Рис. 3. Специальная смещающая обмотка.

Первые эксперименты были проведены со смещающей обмоткой, про-
тяженностью $\Theta_1=135^\circ$, расположенной так, как показано на рис. 4. Им-
пульсный ток, протекающий по сме-
щающей обмотке, производит своим
магнитным полем ослабление управ-
ляющего магнитного поля бетатро-
на. Орбита электронов смещается
наружу, в направлении патрубка 5
(рис. 4 и 1) до тех пор, пока элект-
роны не освободятся из-под влия-
ния фокусирующих сил к орбите.

Не менее, чем $1/5$ часть пучка
попадает в выводное окно и через
медную фольгу выходит из вакуум-
ной камеры. Эффективность выво-
да получается в 2 раза выше эф-
фективности, достигнутой Скагсом
[1] при выводе электронов магнит-
ным шунтом, и почти равна эффе-
ктивности вывода электронов с по-
мощью электрического конденса-
тора, достигнутой Гундом [2] без при-
менения рассеивающей фольги.

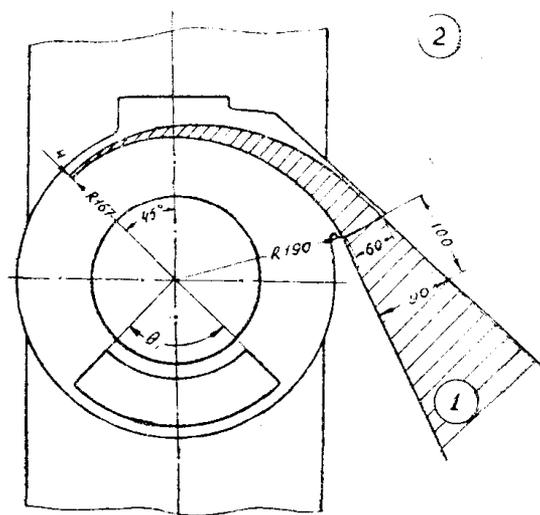


Рис. 4. Общая схема вывода электронного
пучка с энергией 10 Мэв из бетатрона.
1 и 2 - ионизационные камеры.

На рис. 5 представлены фотографии пучка электронов, сделанные перпендикулярно оси пучка непосредственно у выходного окна (верхний снимок) и на расстоянии 10 см от него (нижний снимок). Горизонтальный размер пучка при выходе электронов из окна составляет 6 см и равен горизонтальному размеру выходного окна. С помощью наперстковой иони-

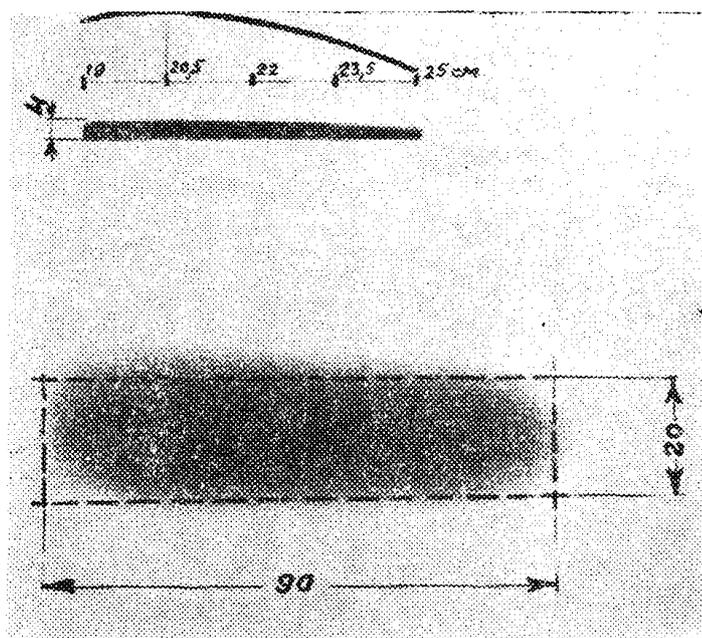


Рис. 5. Фотографии пучка.

зационной камеры типа „Пион“ мы измерили распределение ионизации по горизонтальному сечению пучка. Это распределение показано на рис. 5 над фотографией пучка. В таблице приведены численные значения интенсивности ионизации.

Таблица

Расстояние от окна, см	19	20.5	22	23.5	25
Интенсивность ионизации	1000	1100	920	640	400

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 камер 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 объемом 200 см³ устанавливается в том месте, где производится максимальная ионизация (точка 1 на рис. 4). Вольфрамовая мишень, установленная в патрубке 3 (рис. 1), вдвигается постепенно внутрь вакуумной камеры. Для каждого положения мишени отмечается излучение, регистрируемое камерой 200 см³ (рис. 6). При движении мишени внутрь вакуумной камеры излучение

сначала не меняется. Это значит, что электроны выходят из вакуумной камеры, не задевая мишень. 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. 4), откуда нетрудно определить средний угол $\varphi_{ср}$ 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 см

$$\varphi_{ср} \approx 9^\circ, \quad \psi \approx 10^\circ.$$

Расхождение пучка в воздухе составляет приблизительно 17° по горизонтали.

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

В соответствии с полученными результатами целесообразно ввести понятие о наружных и внутренних потерях электронов, при этом электроны, составляющие внутреннюю часть выходящего пучка и не попавшие в выводное окно из-за столкновения со стенками вакуумной камеры, определяют внутренние потери, а электроны, теряющиеся снаружи от оси выходящего пучка, определяют наружные потери. Относительную величину наружных потерь мы измеряли с помощью ионизационной камеры 2 (рис. 4).

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]

$$\epsilon_0 = \frac{\theta_1}{2(n-1)},$$

$$\epsilon_m = \frac{2 \sin \frac{m \theta_1}{2}}{m(m^2 + n - 1)}.$$
(1)

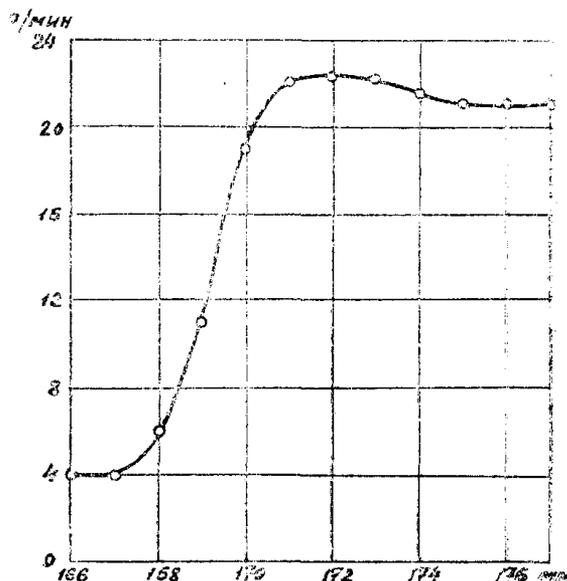


Рис. 6. Изменение интенсивности ионизации в точке 1 (рис. 4) при изменении радиальной координаты мишени 3 (рис. 1)

При изменении Θ_1 изменяются ϵ_0 и ϵ_m 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 положительные или отрицательные значения, 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. 4.

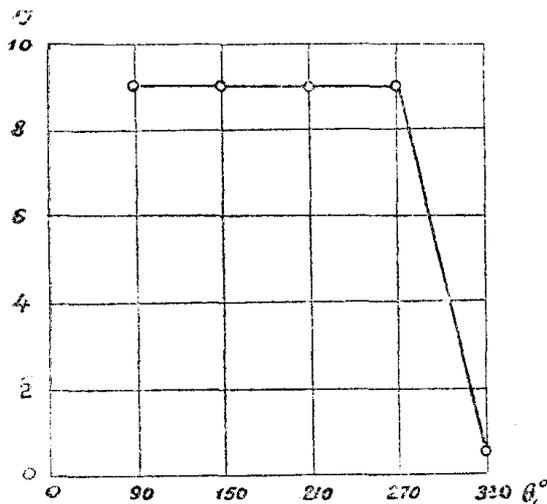


Рис. 7. Влияние азимутальной протяженности смещающей обмотки Θ_1 на эффективность вывода (J).

Не меняя азимутального положения середины смещающей обмотки, мы изменяли азимутальную протяженность обмотки Θ_1 . Всего было испытано 5 обмоток: $\Theta_1 = 90, 150, 210, 270, 330^\circ$. Для каждой обмотки измеряли интенсивность выходящего из камеры электронного пучка. Результатом опыта является график рис. 7, из которого следует, что изменение азимутальной протяженности смещающей обмотки в пределах $90 \rightarrow 270^\circ$ и соответствующее изменение относительной величины составляющих вынужденного движения не приводит 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 $\varphi_{ср}$ 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 ϵ_1 первой гармоники вынужденных колебаний не получалась меньше некоторой критической величины, эффективность вывода электронов из ускорителя изменить не удается.

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

Обратимся снова к рис. 4. 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 смещающую обмотку помещать в различных азимутальных положениях относительно выводного окна?

Ответ на этот вопрос дает график рис. 8, который представляет собой зависимость интенсивности выходящего из камеры электронного пучка от азимутального положения середины смещающей обмотки протяженностью 90° . Из рис. 8 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.

При последовательном соединении обмоток 1, 2 и 3 (рис. 3) получаем секторную обмотку. При соединении обмоток 2 и 3 (с отключением обмотки 1) получаем заорбитную обмотку, а соединяя обмотки 1 и 2 (с отключением 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 $\frac{2}{3}$ интенсивности, получаемой с использованием секторной смещающей обмотки. Подключим обмотку 3 к дополнительной импульсной схеме, которая действует синхронно с основной схемой смещения и выдает импульс тока с регулируемой амплитудой и длительностью, равной длительности основного смещающего

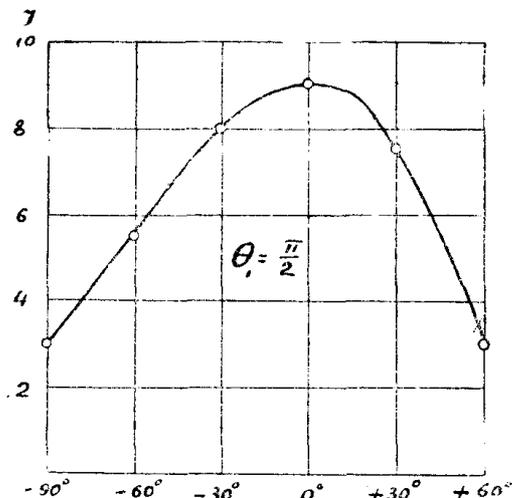


Рис. 8. Влияние азимутального расположения смещающей обмотки относительно выводного окна на эффективность вывода

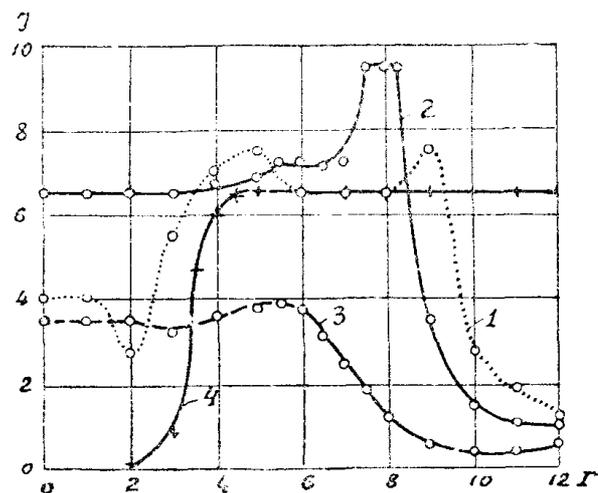


Рис. 9. Изменение эффективности вывода электронов из камеры (J) в зависимости от изменения амплитуды тока (I)
1 — в обмотке 3 (рис. 3), 2 — в центральной обмотке, 3 — изменение наружных потерь электронов, 4 — в обмотках 1, 2 и 3.

магнитного поля по радиусу, можно добиться увеличения эффективности вывода электронов из камеры в 1,15 раза. Такое повышение эффективности

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 (кривая 1 на рис. 9). Зависимость 1 имеет сложный характер и не поддается полному объяснению. Сравним ее с зависимостью 4 (рис. 9), которая характеризует изменение эффективности вывода электронов при изменении амплитуды смещающего тока в секторной обмотке. Изменением формы обмотки, приводящим к изменению величины нарушающего

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 междуполюсного 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. 9 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. 9).

Опыты, описанные выше, были проведены при скоростях смещения равновесной орбиты (1–3 мм/мксек). Чтобы повысить скорость смещения орбиты, надо увеличивать скорость нарастания смещающего магнитного поля во времени.

С технической стороны задача по увеличению скорости смещения орбиты встречает ряд трудностей. Эта задача была решена в Томском политехническом институте студентом-дипломником Бизенковым под руководством кандидата технических наук В. М. Разина. Скорость смещения орбиты удалось довести до 30 мм/мксек.

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.

Применяя синхронное действие секторной и центральной обмоток в том случае, когда под действием секторной 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 $6 \cdot 10^{-10}$ а.

Форма поперечного сечения пучка остается без изменения. Она показана на рис. 5.

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

¹⁾ В дальнейшем мы будем называть центральной обмоткой.

ЛИТЕРАТУРА

1. L. S. Skaggs, G. M. Almy, D. W. Kerst, L. H. Lanzl. *Radiology*, 50, 167-173, 1948.
2. K. Gund, W. Paul, *Nucleonics*, 7, 36-46, 1950.
3. F. K. Goward, *Proc. Phys. Soc.* 61B, 284, 1948.
4. F. K. Goward, J. Dain, *Nature*, 159, 636, 1947.