

ВЫВОД УСКОРЕННЫХ ЭЛЕКТРОНОВ 10 МЭВ ИЗ БЕТАТРОНА С ПОМОЩЬЮ МАГНИТНОГО ШУНТА

Л. С. СОКОЛОВ

(Представлено проф. д-р. физ.-мат. наук А. А. Воробьевым)

Простейший метод вывода электронного пучка из бетатрона основан на создании в управляющем магнитном поле ускорителя с помощью магнитного шунта свободного от поля канала [2]. Шунт располагается снаружи равновесной орбиты по касательной к одной из окружностей, которая может стать близкой к равновесной орбите при определенном изменении управляющего поля или условий ускорения. Такое изменение производится с помощью смещающей обмотки, питаемой импульсным током в момент, когда энергия электронов достигнет желаемой величины. Электроны, вступившие в немагнитный канал, движутся прямолинейно и выходят из него в слабое краевое поле. Свободный от поля канал может быть создан также встречным действием поля импульсных токов (импульсный экстрактор) [3;4].

Отметим, что существуют еще два метода вывода пучка из бетатрона:

1. Фокусирование магнитной линзой пучка, расходящегося в процессе смещения [5].

2. Придание электронам радиального импульса с помощью электрического конденсатора [1].

Для сравнения названных методов введено понятие эффективности вывода, как отношение доли выведенных электронов к общему числу электронов, достигших конца ускорения (табл.).

Т а б л и ц а

Метод вывода	Эффективность
Магнитный шунт	Свыше 10 ⁰ / ₀ при энергии от 17 до 21 Мэв
Импульсный экстрактор	Около 60 ⁰ / ₀ при энергии 24 Мэв
Магнитная линза	Около 50 ⁰ / ₀ при энергии 15 Мэв
Электрический конденсатор	70 ⁰ / ₀ при энергии 6 Мэв

В настоящей статье рассматривается метод вывода с помощью магнитного шунта.

Конструирование магнитного шунта

Вследствие того, что шаг между двумя последовательными траекториями электрона при расширении орбиты вплоть до последней стабильной окружности очень мал и находится в пределах от $1,6 \cdot 10^{-5}$ до $2 \cdot 10^{-3}$ см [6], а колебания, вносимые магнитным шунтом в электронные орбиты, точно неизвестны, было бы рискованно применить железо O-образного сечения, которое обеспечивает наиболее полное отсутствие поля внутри канала. Возможно применить C-образное сечение железа (рис. 1).

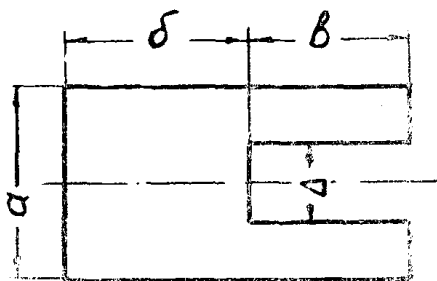


Рис. 1. Поперечное сечение магнитного шунта

Высоту канала Δ желательно было бы взять побольше, чтобы перекрыть не только высоту пучка, но и облегчить вертикальную регулировку шунта, однако с увеличением Δ граница ослабления поля становится нерезкой. Это может повести к тому, что электроны не смогут войти в канал, так как будут сброшены на стенку вакуумной камеры частично ослабленным полем. Наши измерения пучка путем засвечивания кристалла KCl дают величину его высоты 6 мм. При этом края, ограничивающие высоту пучка, оказались нерезкими. Скагс и др. [2] приняли величину $\Delta = 2$ мм.

В выборе глубины канала нельзя исходить только из шага орбиты при её расширении, так как шунт возмущает орбиту задолго до её вступления в канал, вызывая колебание электронов.

Принятые Скагсом и его сотрудниками глубина канала $v = 5$ мм, а также высота $\Delta = 2$ мм оказываются недостаточными для вмещения пучка [2].

Для предварительных экспериментов мы приняли $\Delta = 2,5$ мм и $v = 6$ мм, при этом использовали трансформаторную сталь Э4АА, обладающую прямолинейным участком кривой намагничивания вплоть до индукции 10—11 кгс.

Найдем толщину задней стенки b и козырьков v шунта. Поскольку магнитный поток, падающий на шунт, должен весь пройти через заднюю стенку толщиной b и при этом железо не должно насыщаться, можно написать неравенство:

$$\frac{K(b+v)}{b} < \frac{B_n}{B_0}, \quad (1)$$

где

B_n — индукция, при которой начинает насыщаться железо шунта,
 B_0 — амплитуда индукции магнитного поля в том месте, где должен быть установлен шунт, практически равная амплитуде индукции на орбите,
 K — коэффициент, учитывающий дополнительный отсос магнитных линий шунтом из пространства, смежного шунту.

Величина b подбиралась на опыте. Железные шунты с $\Delta = 2,5$ мм; $v = 6$ мм, $a = 7$ мм и различными b испытывались на насыщение. При этом э.д.с. с катушки, помещенной внутрь канала, подавалась на осциллограф. Отсутствие насыщения определялось по отсутствию „горбов“ на осциллограмме. Таким образом найдено, что граничной толщиной является $b = 6$ мм. Соответствующие величины индукции:

$$B_n = 10000 \text{ гс и } B_0 = 2500 \text{ гс.}$$

Теперь можно определить K из неравенства (1), превратив его в равенство.

В нашем случае

$$\frac{K(6+6)}{6} = \frac{10000}{2500} \text{ и } K = 2.$$

Физический смысл коэффициента K легко видеть. Он характеризует степень возмущения магнитного поля шунтом. Коэффициент K зависит от высоты шунта, от толщины задней стенки, от магнитной проницаемости материала, от режима, в котором работает шунт, и может служить показателем пригодности шунта для вывода, так как слишком малые K связаны с большим остаточным полем внутри канала, а слишком большие K характеризуют неприемлемую границу ослабления поля. Определение K может быть произведено также измерением индукции с шунтом и без шунта.

Найдем теперь предельную высоту шунта. Так как магнитный поток, падающий на козырек, должен весь пройти через его сечение, имеем аналогично неравенству (1)

$$\frac{Kv}{\frac{a-\Delta}{2}} < \frac{B_H}{B_0} \quad (2)$$

При $v = 6 \text{ мм}$; $\frac{B_H}{B_0} = 4$; $\Delta = 2,5 \text{ мм}$ и $K = 2$.

Найдем $a_{\text{предельное}} = 8,5 \text{ мм}$ и высоту козырька $\frac{a-\Delta}{2} = 3 \text{ мм}$.

Длину шунта x определяем по формуле:

$$x^2 = r_1^2 - r_2^2, \quad (3)$$

где r_1 — радиус, на котором находится выходной конец шунта, когда шунт расположен по касательной к окружности радиуса r_2 , причем входной конец находится в точке касания.

Для удобства последующей работы с выведенным пучком желательно вывести электроны в поле половинной напряженности.

В нашем бетатроне окружность, где показатель спадания поля $n = 1$, находится на радиусе $r_2 = 160 \text{ мм}$, круг половинной напряженности на радиусе $r_1 = 190 \text{ мм}$. Отсюда $x = 10 \text{ см}$.

Взаимное расположение шунта и электронной пушки

Можно ожидать, что захват электронов в ускорение будет зависеть от взаимного расположения шунта и электронной пушки при данном радиальном положении шунта. Был поставлен следующий опыт. Тело, набранное из пластинчатого железа С-образной формы, подобное магнитному шунту, но больших размеров ($a = 15 \text{ мм}$, $v = 10 \text{ мм}$, $b = 10 \text{ мм}$, $\Delta = 5 \text{ мм}$), располагалось вплотную к вакуумной камере на различных азимутах.

Результаты опыта представлены на рис. 2.

В последующем было также исследовано действие шунта на захват электронов в ускорение в двух случаях:

1. Внеорбитный инжектор располагался сзади шунта на азимуте 45° .

2. Внеорбитный инжектор располагался сзади шунта на азимуте 135°. Оказалось, что в первом случае также можно получить удовлетворительное излучение, однако, радиальное положение инжектора очень

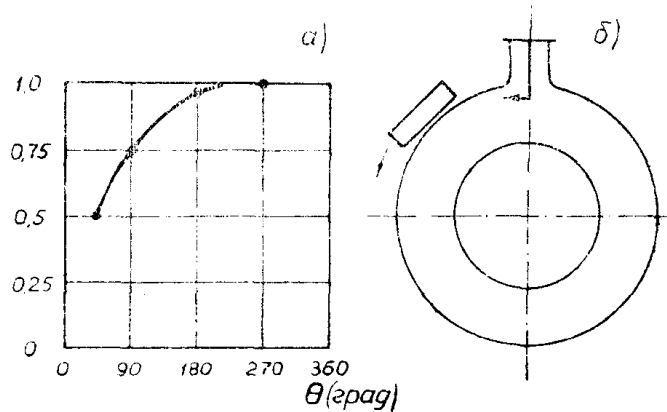


Рис. 2. Схема опыта (б) и график (а), показывающий влияние железного тела на захват электронов в ускорении. Инжектор расположен на азимуте 0°. Ускорение электронов и движение железного тела осуществляется в направлении возрастания азимута. Показатель спада магнитного поля на равновесной орбите $n=0,6$. 1,0 — излучение от мишени без железного тела.

критично в отношении настройки на максимальный выход. Во втором случае выход излучения устойчив и можно пользоваться инжектором без сиффона.

Опыты по выводу электронов с энергией 5 и 10 Мэв

Опыты по выводу пучка были проведены с шунтом, показанном на рис. 3.

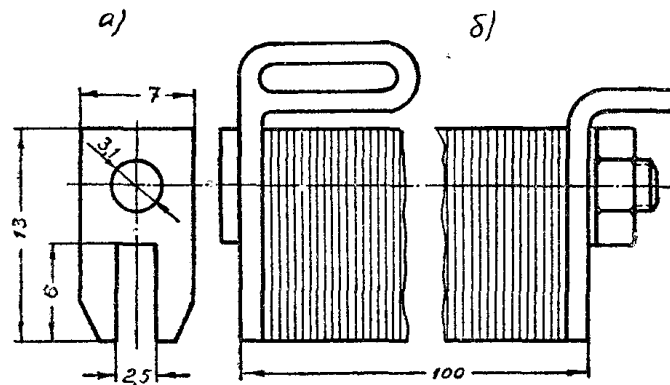


Рис. 3. Конструкция магнитного шунта (б). Шунт набран из пластинок 0,35 мм (а), разделенных запеченной пленкой клея БФ-4.

При движении шунта по радиусу излучение измерялось двумя ионизационными камерами. Схема опыта приведена на рис. 4, а результаты опыта—на рис. 5.

Из рис. 4 видно, что ионизационная камера 1 регистрирует тормозное излучение от электронов, ударяющих в шунт и выходную заглушку,

а ионизационная камера 2 регистрирует электроны, сброшенные шунтом на стенку вакуумной камеры.

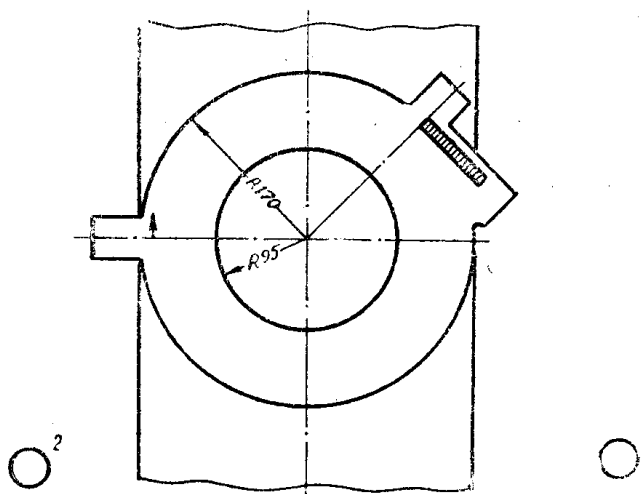


Рис. 4. Схема опыта по выводу электронов. 1 и 2 — ионизационные камеры.

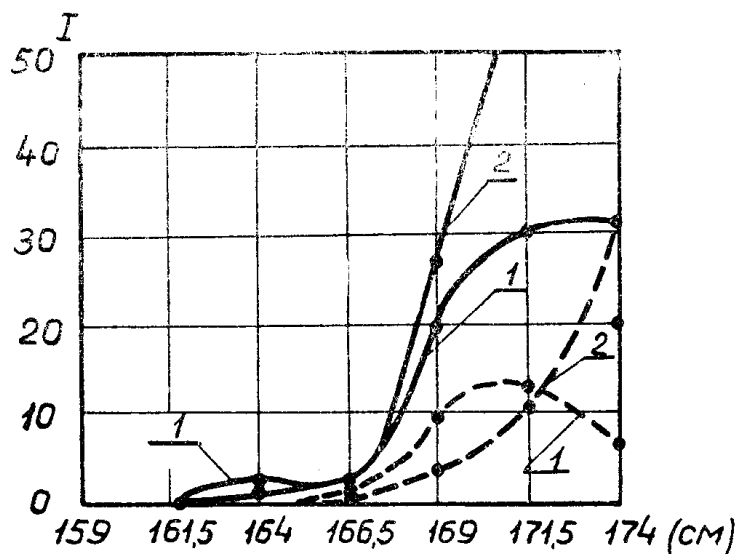


Рис. 5. Выход излучения (I), регистрируемый ионизационными камерами 1 и 2, в зависимости от радиального положения шунта.
 — — — излучение без включения схемы смещения,
 — — — — — показания камер 1 и 2 со смещением.

Из графиков рис. 5 можно сделать следующие выводы:

1. Имеет место автоматическое расширение орбиты шунтом, однако, как показывают осциллограммы тока от фотоумножителя, этот сброс происходит после достижения электронами максимальной энергии. Эти электроны назовем неуправляемыми.

2. Эффективность вывода шунтом, ориентировочно подсчитанная как отношение показаний ионизационной камеры 1 к показаниям ионизационной камеры 2 для электронов с управляемой энергией, увеличивается по мере приближения шунта к области действия фокусирующих сил. Максимум эффективности имеет место на радиусе 162 мм. Для неуправляемых электронов этот максимум находится на радиусе 170 мм.

3. Начиная с радиуса 170 мм и меньше происходит общее падение интенсивности, вызванное влиянием шунта на процесс захвата электронов в ускорение.

Таким образом, вдвигая шунт к области действия фокусирующих сил, мы, хотя и выигрываем в эффективности, проигрываем в полной интенсивности.

Отсюда вытекают два очевидных предложения по улучшению действия шунта.

1. Шунт располагать по возможности ближе к области действия фокусирующих сил (в нашем случае на радиусе 164 мм) и исправлять поле в момент инъекции.

2. Шунт располагать по возможности дальше от равновесной орбиты там, где он не влияет на процесс захвата (в нашем случае, на радиусе 172 мм) и расширять область действия фокусирующих сил в момент смещения.

При использовании первого предложения шунт мало будет отличаться от импульсного экстрактора в смысле сложности аппаратуры и настройки, но проиграет ему в эффективности вывода, так как экстрактор в отличие от шунта почти не вносит колебаний в орбиту до её вступления в свободный от поля канал.

При использовании второго предложения, хотя и остается необходимость дополнительной схемы, отпадает необходимость делать электрические вводы в вакуумную камеру, так как усиление поля на 300–400 э, необходимое для расширения области фокусирующих сил до окружности, на которой установлен шунт, может быть выполнено с помощью токов, текущих вне вакуумной камеры. Поэтому второе предложение кажется более приемлемым.

С помощью магнитного шунта выведен пучок электронов с энергией 10 Мэв. Величина тока ускоренных электронов на расстоянии 5 см окна, измеренная цилиндром Фарадея, оказалась равной $1 \cdot 10^{-11}$ а.

Проводились опыты по смещению электронов 10 Мэв с равновесной орбиты посредством короткой смещающей обмотки, расположенной за орбитой. Найдено, что при смещении такой обмоткой пучок может быть радиально сфокусирован в месте наибольшего удаления электронов от равновесной орбиты наружу. Получено светящееся пятно на стенке вакуумной камеры.

Азимутальная напряженность обмотки менялась в широких пределах. Лучшую фокусировку дают обмотки, меньшие 70° .

Возмущение бетатронного поля обмоткой приведено на рис. 6.

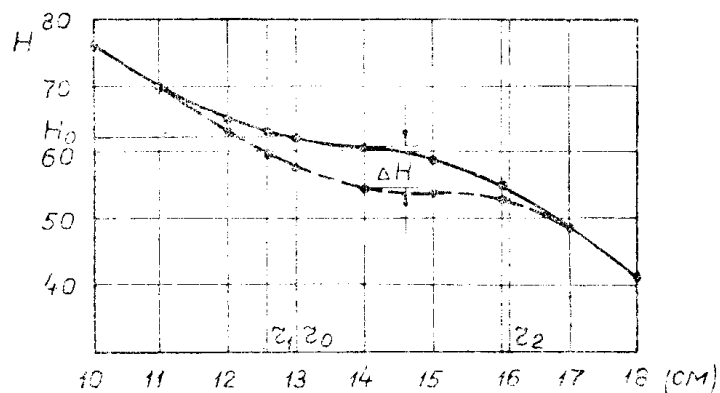


Рис. 6. Спадение магнитного поля по радиусу в момент смещения:

— без дополнительной обмотки,
 - - - с обмоткой. $H_0 = 2500$ э, $\Delta H = 250$ э.
 $(r_2 - r_1)$ — радиальная протяженность обмотки.

ЛИТЕРАТУРА

1. K. Gund, W. Paul, Experiments, with a 6-Mev Betatron. *Nucleonics*, 7, 36—46, 1950.
2. L. S. Skaggs, G. M. Almy, D. W. Kerst, L. H. Lanzl Development of the Betatron for Electron Therapy. *Radiology*, 50, 197—173, 1948.
3. J. D. Lawson, H. E. Walford, J. H. Aram Extraction of the Electron Beam from a 30-Mev Synchrotron. *Nat.* 166, 234, 1950.
4. R. S. Foote, B. Petree. A Pulsed Magnetic Extractor for Removing the Electron Beam from a Betatron. *R. S. I.* 25, 694—698, 1954.
5. S. L. Fawcett, E. C. Crittenden. Ejection of the Electron Beam from a Betatron. *R. S. I.* 21, 935. 1950.
6. J. D. Lawson. The Angular Distribution of Synchrotron Target Radiation: A Preliminary Experimental Study. *Proc. Phys. Soc.* 63 A, 653—661, 1950.