

О СУЩЕСТВОВАНИИ ЗАМКНУТОГО ПУЧКА ЭЛЕКТРОНОВ В ПОСТОЯННОМ ПОТЕНЦИАЛЬНОМ ПОЛЕ ФОКУСИРУЮЩИХ СИЛ

Н. М. ГОЛОЩАПОВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

Вопрос о существовании замкнутого электронного пучка в постоянном фокусирующем магнитном поле приобрел в настоящее время значительный интерес, поскольку в некоторых теоретических работах [1], а также предложениях по новым типам ускорителей исходят из того, что при определенных условиях такой пучок может существовать.

Целью настоящей работы являлось исследование возможности существования такого пучка.

При исследовании движения пучка электронов постоянной скорости в постоянном магнитном поле, по форме подобном бетатронному, использовалась примененная нами в другой работе экспериментальная установка. Постоянное магнитное поле создается электромагнитом с шихтованными сердечниками—полюсами от бетатрона на 15 Мэв. В камеру, поочередно из одного тубуса в другой, ставится перегородка из системы фарадеевых цилиндров, изолированных друг от друга. По результатам измерения тока с каждого цилиндра, при положении приемника тока поочередно во всех семи тубусах можно было найти распределение плотности тока пучка по сечению камеры, а также определить траекторию пучка почти на полном обороте.

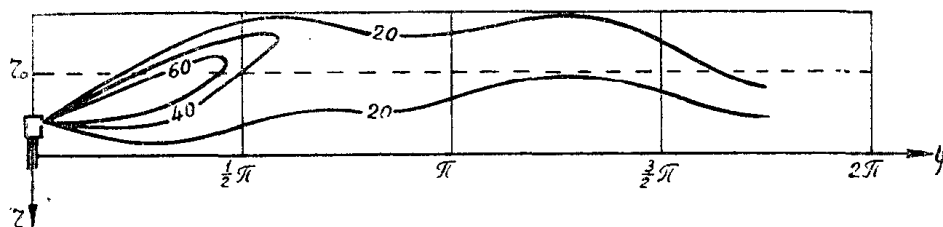


Рис. 1. Движение пучка на первом обороте. Линии соединяют точки пучка с одинаковой плотностью тока в мка/см².

Оказалось, что пучок существует в течение всего первого оборота и ток пучка остается еще весьма большим в сравнении с тем, какой захватывался бы в ускорение. Распределение плотности тока пучка при $U_i = 1000$ в, напряженности поля на равновесной орбите $H_{zc} = 7$ эрстед и токе инъекции $I_{i \text{ рав}} \approx 600$ мка, который соответствует равновесной плотности заряда пучка для данных условий, показано на рис 1. При этом

плотность тока в центре пучка в конце оборота (на азимуте 309° от инжектора) больше 20 мкА/см^2 . Пучок несимметричен и изменяется по форме с азимутом, что обусловлено начальной плотностью заряда пучка, качеством поля, геометрией инжектора и положением его в момент инъекции, а общий ток пучка за один первый оборот уменьшается примерно в 5—6 раз (ток с проводящего слоя камеры при этом возрастает на соответствующую величину).

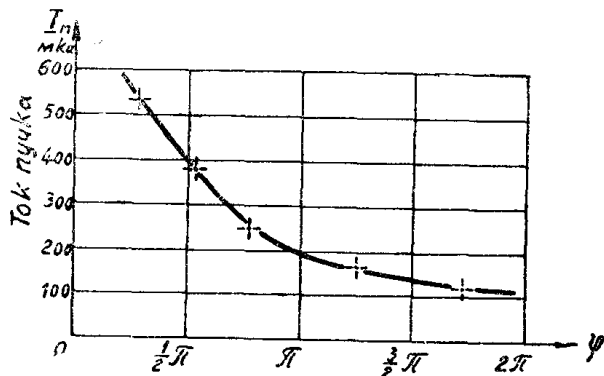


Рис. 2. Изменение силы тока пучка с азимутом на первом обороте

Заметим, что в конце первого оборота пучок не переходит в равномерно распределенную электронную плазму, а сохраняется именно в форме пучка, и скорость уменьшения силы тока пучка значительно сокращается (рис. 2).

Не считая указанные эксперименты достаточными, чтобы говорить о возможности существования замкнутого электронного пучка (чего фактически мы и не могли бы наблюдать при данной методике эксперимента), мы про-

вели другие эксперименты при условии подачи на инжектор импульсного напряжения. При этом облегчается наблюдение замкнутого электронного пучка.

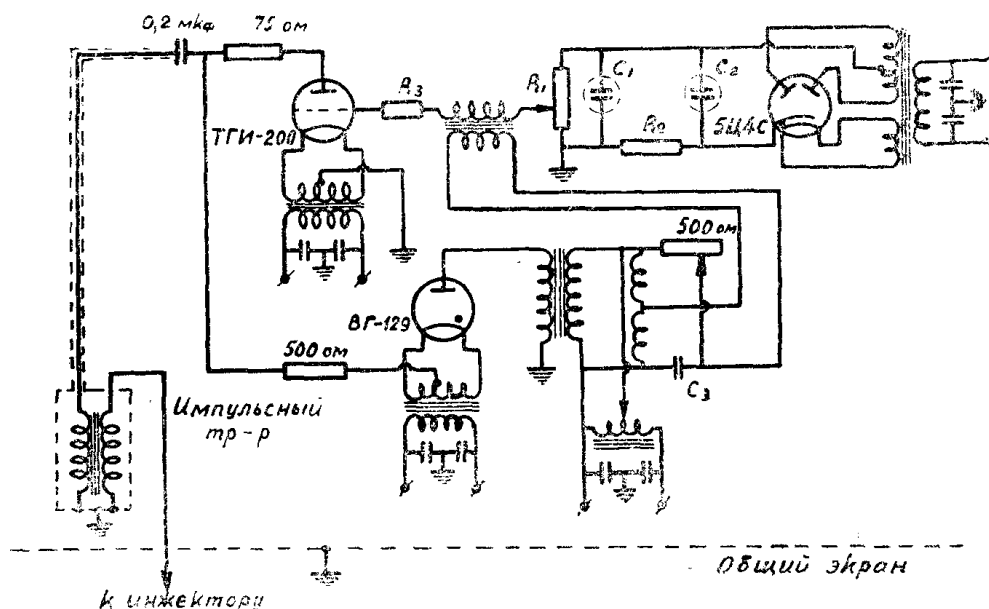


Рис. 3. Схема инъекции

Электромагнит использовался тот же самый, приемник тока из камеры был удален, инжектор питался импульсным напряжением от схемы инъекции (рис. 3).

Если предположить, что существование замкнутого пучка в постоянном магнитном поле возможно, то в промежуток времени, когда напряжение инъекции соответствует магнитному полю (т. е. необходимому напряжению), будет создаваться пучок с плотностью, изменяющейся от 0 до

максимума и снова до 0 при рассеянии пучка. Таким образом будет создаваться импульс тока пучка и импульс магнитного потока этого пучка.

Если по внешнему или внутреннему диаметру камеры расположить виток (или несколько витков), то в нем наведется э.д.с., пропорциональная изменению этого потока, т. е.

$$E = \frac{d\Phi_e}{dt} = \frac{dQ}{dt},$$

где Q —количество зарядов в пучке.

Такой метод, предложенный впервые в Томском политехническом институте В. М. Разиным, использовался В. С. Мелиховым и И. П. Чучалиным для исследования захвата электронов в ускорение.

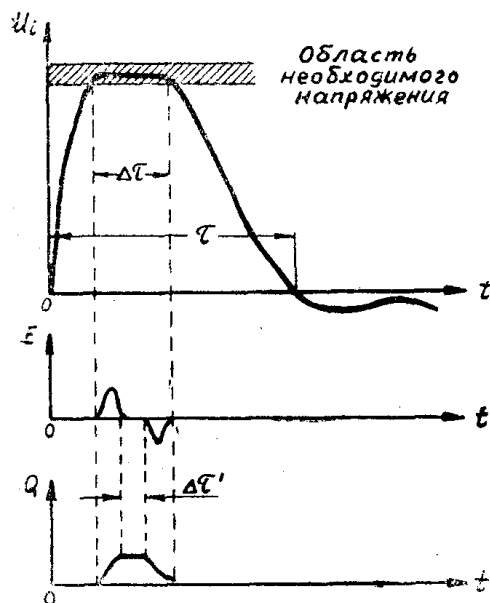


Рис. 4. Возникновение замкнутого электронного пучка при вводе электронов на вершине импульса инъекции

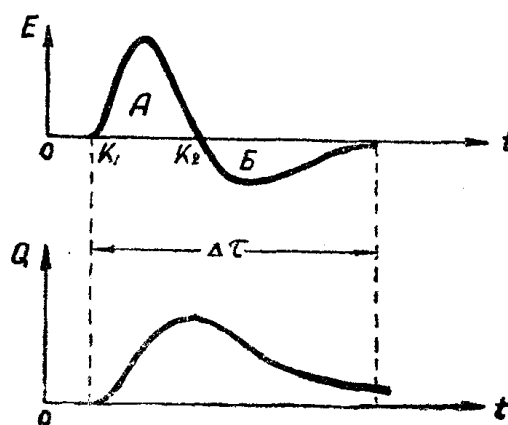


Рис. 5. Характер изменения э.д.с. E , снятой с витков, и количества зарядов Q в пучке (общий случай)

Мы расположили на камеру по внутреннему диаметру два витка, так как оказалось, что 6 витков снаружи камеры, как делали Мелихов и Чучалин, имеют значительно большую индуктивность. Чтобы избавиться от помех, были заблокированы все накальные трансформаторы и автотрансформаторы, заэкранирован импульсный трансформатор и поставлен общий экран между схемой инъекции и электромагнитом установки (рис. 3).

Импульс инъекции (рис. 4) имел длительность $\tau = 17$ мксек и плоскую вершину в 6 мксек (при $U_i > 10$ кВ) и мог изменяться от 0 до 30 кВ. Сигнал с витков подавался на импульсный осциллоскоп 25И с помощью коаксиального кабеля, нагруженного на конце сопротивлением в 70 Ом. Осциллоскоп по длительности развертки и полосе пропускания частот является вполне подходящим.

Кроме того, чтобы окончательно отфильтровать высокочастотные помехи, возникающие в витках, эти витки были замкнуты на емкость в 2000 пф. Форма сигнала при этом не искажалась. Таким образом удалось получить на экране осциллоскопа сигнал э.д.с., наводимый в витках, практически в чистом виде без помех (рис. 5). Дополнительные эксперименты также подтверждают, что наблюдаемые сигналы действительно обусловлены возникновением и существованием электронного пучка в камере.

Когда импульс инъекции, например, только начнет входить своей вершиной в область необходимого напряжения, сигнал э.д.с. E с витков будет иметь вид, представленный на рис. 5. Но при этом можно считать, что в каж-

дый данный момент отрезка времени Δt с катода инжектора эмитируется одно и то же количество электронов (поскольку вершина импульса инъекции плоская, а напряжение накала не изменяется).

Анализ кривой э.д.с. E показывает, что в промежутке времени от точки K_1 до K_2 (рис. 5) происходит нарастание количества зарядов в пучке (в этом легко убедиться, проинтегрировав кривую E). Но так как в этот промежуток времени количество электронов, выходящих с катода инжектора, и их скорость остаются постоянными, то увеличение тока пучка возможно за счет накапливания электронов в пучке, т. е. за счет того, что электроны делают значительное число оборотов. Кроме того, чтобы убедиться, что это сигнал пучка, делающего не один оборот, ставилась перегородка позади инжектора по всему сечению камеры с целью перехватить пучок, совершивший только один оборот. При этом амплитуда сигнала с витков (сигнала пучка, совершившего только один оборот) оказалась более чем в 20 раз меньше, чем без перегородки.

Таким образом, если бы пучок совершал только один-два оборота, то без перегородки сигнал с витков, во-первых, не должен был бы значительно отличаться по амплитуде от сигнала, полученного при наличии перегородки, поскольку разница в числе оборотов была бы небольшая, а во-вторых, сигнал должен был быть во много раз короче того, какой мы наблюдаем ($\Delta t \approx 2 - 6$ мксек, в зависимости от того, где происходит ввод электронов в пучок — на фронте, спаде или вершине импульса инъекции), т. к. время прохождения пучком двух оборотов весьма мало.

Интегрируя (графически или электрически) сигнал E , получим кривую изменения заряда Q в пучке. В общем случае (при вводе на фронте или спаде импульса инъекции) кривые E и Q имеют вид, как показано на рис. 5. Здесь А — область накопления электронов в пучке, Б — область сброса электронов из пучка.

В случае же, когда ввод происходит на вершине импульса инъекции (причем вершина плоская), кривая Q имеет другой вид (рис. 4), т. е. пучок в течение некоторого времени имеет постоянную плотность заряда.¹⁾

На основании проведенных экспериментов можно сделать следующие выводы.

1. В постоянном фокусирующем магнитном поле бетатронного типа возможно существование замкнутого пучка электронов в течение времени ввода электронов, т. е. в течение многих оборотов пучка. Плотность заряда пучка при этом возрастает от нуля до какого-то максимального значения и затем медленно уменьшается почти до нуля. Можно считать, что первоначальный пучок существует по меньшей мере в пределах от точки K_1 до K_2 (рис. 4), т. е. до момента, пока происходит увеличение плотности заряда пучка. Это время было обычно $1 - 3$ мксек. Если взять 1 мксек, то при энергии инъекции $U_i = 20$ кВ пучок сделает более 100 оборотов. После точки K_2 наступает усиленное разбалтывание пучка и сброс электронов (о причинах сброса мы пока здесь не говорим).

Таким образом, для наших данных условий (радиус равновесной орбиты $r_0 = 13$ см, $n = 0,55$ и определенная форма импульса инъекции) среднее

„время жизни“ меняющегося по плотности пучка $\tau_{cp} \approx \frac{1}{2} \Delta t \approx 1 - 3$ мксек,

а минимальное число оборотов получается

$$N = 0,732 \sqrt{U_i},$$

где U_i — напряжение инъекции в вольтах.

¹⁾ Интенсивность свечения и стабильность сигналов на экране осциллографа, хотя и были доступны для наблюдения, но сфотографировать сигналы с экрана не удалось.

С изменением указанных условий будет соответственно изменяться коэффициент перед корнем.

2. При определенных условиях (ввод на вершине импульса инъекции, причем вершина импульса инъекции плоская) возможно существование пучка постоянной плотности. „Время жизни“ такого пучка $\Delta\tau' \approx 2 - 3 \text{ мксек.}$

ЛИТЕРАТУРА

1. Родимов Б. Н. О механизме захвата электронов в ускорение в бетатроне. Известия ТПИ, т. 87, 1957.
-