

### БЕТАТРОН СО СПИРАЛЬНЫМ НАКОПЛЕНИЕМ ЭЛЕКТРОНОВ

Е. А. Абрамян, Г. И. Будкер, Г. Б. Глаголев и А. А. Наумов

Дано краткое описание ускорителя электронов Б2, работающего с предварительным накоплением объемного заряда. Приведены расчет движения отдельной частицы в ускорителях такого типа и оценка влияния объемного заряда на движение электронов. На этой установке в 1957 г. был получен ток электронов 75 а на орбите радиусом 14 см.

Проблема создания замкнутого тока релятивистских электронов с целью изучения стабилизированного пучка [1] потребовала разработки новых схем ускорения электронов, позволяющих получать токи во многие сотни ампер. Одним из путей резкого увеличения числа частиц, ускоряемых индукционным способом, является использование схемы с предварительным спиральным накоплением объемного заряда [2].<sup>1</sup> Экспериментальное изучение предложенного принципа было проведено на описываемой установке в 1955—1957 гг.

В отличие от обычного бетатрона, где магнитный поток через центральный сердечник  $\Phi_1$  и поток через камеру  $\Phi_2$  меняются синхронно, в бетатроне со спиральным накоплением в начальной стадии  $\Phi_2$  поддерживается постоянным, а  $\Phi_1$  растет (рис. 1 и 2). Для обеспечения фокусировки частиц магнитное поле в рабочей области спадает по закону  $H \sim r^{-n}$ , где  $0.25 < n < 0.75$ . Частицы, инжектируемые в камеру электронного пучка, ускоряются в постоянном магнитном поле, приобретая на каждом обороте энергию  $\Delta W = \frac{1}{c} \frac{d\Phi}{dt}$ , и двигаются по вращающейся спирали, как в циклотроне. Пушка инжектирует электроны непрерывно, пока первые частицы не достигнут наружной стенки камеры. Таким образом, за время  $t_n$ , за которое электроны проходят по спирали от  $r_1$  до  $r_2$ , камера полностью заполняется витками электронного тока. На этом заканчивается стадия накопления, и поток  $\Phi_2$  начинает расти с такой скоростью, что для некоторой орбиты радиуса  $r_p$  соблюдается условие 2:1, и электроны, находившиеся в начальный момент стягивания на орбите радиуса  $r_p$ , останутся на ней в течение всего процесса стягивания. При этом, как будет пока-

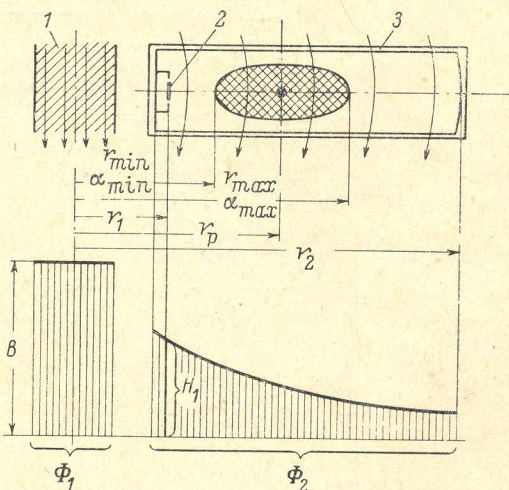


Рис. 1. Схема бетатрона с накоплением. 1 — сердечник, 2 — инжектор, 3 — вакуумная камера.

<sup>1</sup> Аналогичная схема предложена Гундом [3].

зано, частицы, находящиеся на орбитах с  $r \neq r_p$ , будут двигаться по спиральным траекториям, асимптотически приближаясь к равновесной орбите  $r_p$ .

Рассмотрим движение частиц при накоплении и стягивании в предположении, что токи малы. На ограничениях, накладываемых большим

объемным зарядом, мы остановимся ниже.

Примем обозначения:  $r_1, r_2, r_p$  и  $r$  — соответственно радиус инжектора, максимальный радиус области ускорения, равновесный и текущий радиусы;

$$\nu = \frac{S_{\text{железа сердечника}}}{\pi r_1^2}$$

$H_1$  и  $H$  — поля на радиусах  $r_1$  и  $r$ ;  $H_{10}$  и  $H_0$  — то же в момент времени  $t=0$ ;  $B_0$  — величина индукции в сердечнике при  $t=0$ ;  $\Delta B$  — изменение индукции в сердечнике с момента выхода электрона из инжектора.

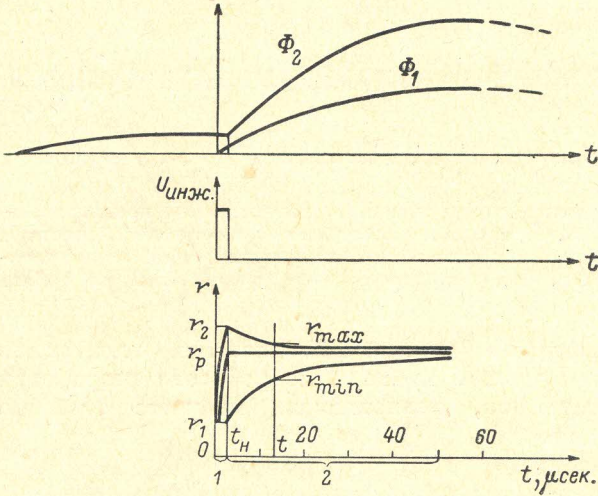


Рис. 2. График режима работы установки.  
1 — накопление, 2 — стягивание.

Из уравнения  $\frac{d}{dt} \left( \frac{e}{c} H r^2 - \frac{e\Phi}{2\pi c} \right) = 0$  для моментов  $t=0$  и  $t$  запишем

$$H_{10} r_1^2 - \frac{\nu \pi r_1^2 B_0}{2\pi} = H r^2 - \frac{1}{2\pi} \nu \pi r_1^2 (B_0 + \Delta B) - \int_{r_1}^r H r dr.$$

Обозначая  $\frac{B_0 + \Delta B}{H_1} = \alpha$  и принимая  $B_0 = \frac{2H_{10}}{\nu}$ , получим

$$\alpha = \frac{2H}{\nu H_1} \left( \frac{r}{r_1} \right)^2 - \frac{2}{\nu r_1^2} \int_{r_1}^r \frac{H}{H_1} r dr, \tag{1}$$

откуда для  $n(r) = \text{const}$

$$\frac{r}{r_1} = \left\{ \frac{\nu(2-n)\alpha - 1}{2(1-n)} \right\}^{\frac{1}{2-n}}. \tag{2}$$

Параметр  $\alpha$  позволяет упростить определение положения орбит электронов, так как после построения для данной установки  $r(\alpha)$  задача сводится к нахождению  $\alpha(t)$  и решается при помощи простых выкладок.

Если  $\Delta B$  и  $H$  меняются во времени линейно, то при накоплении  $\Delta B = k_1 t$ ,  $H_1 = H_{10} = \text{const}$  и  $\alpha = \alpha_1 + \frac{k_1}{H_{10}} t$  (здесь обозначено  $\alpha_1 = \frac{B_0}{H_{10}}$ ).

При стягивании

$$\Delta B = k_1 t, \quad H_1 = H_{10} + k_2 (t - t_{н.с}),$$

где  $t_{н. i}$  — время от выхода  $i$ -й частицы из инжектора до начала стягивания. Обозначая время стягивания  $t' = t - t_{н. i}$ , получим

$$\alpha = \frac{\alpha_1 H_{10} + k_1 t_{н. i} + k_1 t'}{H_{10} + k_2 t'}$$

При  $t' \rightarrow \infty$  имеем  $\alpha \rightarrow \frac{k_1}{k_2}$  вне зависимости от  $t_{н. i}$ , т. е. вне зависимости от того, на каком радиусе находилась частица в момент начала стягивания.  $\alpha_p = \frac{k_1}{k_2}$  соответствует равновесному радиусу  $r_p$ . Естественно, частицы будут стягиваться к  $r_p$  и при другом характере изменения поля во времени. Для частиц, находящихся на краях пучка (см.  $r_{\min}$  и  $r_{\max}$  на рис. 1),  $t_{н. i} = 0$  и  $t_{н.} = (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{H_{10}}{k_1}$  и, следовательно,

$$\alpha_{\min} = \frac{\alpha_1 H_{10} + k_1 t'}{H_1} \quad \text{и} \quad \alpha_{\max} = \frac{\alpha_2 H_{10} + k_1 t'}{H_1},$$

откуда

$$\frac{\alpha_{\max} - \alpha_{\min}}{\alpha_2 - \alpha_1} = \frac{H_{10}}{H_1}, \tag{3}$$

т. е. ширина пучка в величинах  $\alpha$  изменяется обратно пропорционально полю.

Полное решение задачи движения частиц в рассматриваемых установках с учетом как кулоновского расталкивания, так и собственного магнитного стягивания при меняющихся размерах пучка и энергии электронов затруднительно. Однако можно приближенно оценить предельный объемный заряд. В направлении  $z$  на электрон с координатами  $r$  и  $z$  действуют сила внешнего магнитного поля  $F_1 = \frac{e}{c} v H_r = \gamma \beta^2 m_0 c^2 \frac{zn}{r^2}$ , кулоновская сила  $F_2 = \frac{4\pi}{\chi_1} e^2 \rho z$  и сила магнитного стягивания  $F_3 = \frac{4\pi}{\chi_2} e^2 \rho \beta^2 z$ , где  $\rho$  — объемная плотность частиц;  $\chi_1 = \chi_2 = 1$  для бесконечного плоского пучка с равномерной плотностью частиц;  $\chi_1 = \chi_2 = 2$  для бесконечного круглого пучка. Общая фокусирующая сила<sup>2</sup>

$$F = F_1 - F_2 + F_3 = \left( \frac{\gamma \beta^2 m_0 c^2}{r^2} n - \frac{4\pi e^2 \rho}{\chi_1 \gamma^2} \right) z, \tag{4}$$

где обозначено

$$\chi = \frac{1 - \beta^2}{\frac{1}{\chi_1} - \frac{1}{\chi_2} \beta^2}$$

Из (4) видно, что с увеличением плотности электронов уменьшается сила вертикальной фокусировки  $F$ . Предельная объемная плотность  $\rho_{\text{пред.}}$  получается из условия равенства фокусирующей силы величине, соответствующей резонансному значению  $n$

$$\rho_{\text{пред.}} = \frac{(n - n_{\text{рез.}}) \chi m_0 c^2 \gamma^3 \beta^2}{4\pi e^2 r^2}. \tag{5}$$

Аналогичное рассмотрение фокусировки по  $r$  дает такой же результат.

<sup>2</sup> Здесь не учитывается взаимодействие пучка с металлическими поверхностями так как в рассматриваемой установке оно достаточно мало.

Обозначим ток в витке  $i_{в.} = jh\delta$ , где  $h$  — высота пучка;  $\delta$  — шаг спирали при накоплении и  $j = e\rho\beta c$

$$i_{в. пред.} = \frac{(n - n_{рез.})^2}{4\pi} \gamma_1^3 \beta_1^3 \frac{m_0 c^3}{e} \frac{\delta h}{r^2}. \quad (6)$$

Для определения  $i_{в.}$  предельного достаточно оценить его величину в районе инжектора.

Стягивание накопленного объемного заряда проходит практически без потерь, так как с уменьшением объема, занимаемого электронами, одновременно растет их энергия и собственное магнитное стягивание успевает компенсировать растущие кулоновские силы. Действительно для пучка, сжатого до малых размеров, можно считать

$$(r_{max} - r_{min}) \simeq (\alpha_{max} - \alpha_{min}) \frac{1}{\frac{\partial \alpha}{\partial r}}.$$

Определяя  $\frac{\partial \alpha}{\partial r}$  из (2) и используя (3), получим

$$r_{max} - r_{min} = \frac{\gamma_1^{2-n}}{2(1-n)r^{1-n}} (\alpha_2 - \alpha_1) \frac{H_{10}}{H_1},$$

откуда плотность частиц в районе равновесной орбиты<sup>3</sup>

$$\rho \sim \frac{1}{(r_{max} - r_{min})h} \sim H_1^{3/2}.$$

Из (5), считая  $\beta = 1$ , имеем  $\rho_{пред.} \sim \gamma^3 \sim H^3$ , т. е. предельно допустимая плотность частиц растет быстрее, чем фактическая плотность. Отсутствие потерь частиц при стягивании подтверждается экспериментом.

Предельный циркулирующий ток  $I$ , который можно получить в бетатроне со спиральным накоплением

$$I = \frac{(n - n_{рез.})^2}{4\pi(2-n)} \frac{m_0 c^3}{e} \gamma_1^3 \beta_1^3 \left(\frac{r_2}{r_1}\right)^{2-n} \frac{h_1}{r_p}, \quad (7)$$

где  $\gamma_1$  и  $\beta_1$  соответствуют энергии инжекции электрона и  $h_1$  — высота пучка на радиусе  $r_1$ .

Схема установки Б2, на которой проводились эксперименты по накоплению и стягиванию электронов, показана на рис. 3. Вакуумная камера образована крышками из органического стекла 1 и цилиндрическими дурачевыми кольцами 2 и 3 (максимальный радиус рабочей области  $r_2 = 50$  см). Кольца по азимуту разрезаны, поверхности колец, обращенные внутрь камеры, имеют кривизну, соответствующую форме магнитного поля с заданным  $n$ . Ведущее магнитное поле создается витками 7, распределение которых по радиусу подобрано на модели и обеспечивает в рабочей области  $n$  в пределах 0.25—0.75. Центральный сердечник 4 и замыкающее ярмо 5 набраны из трансформаторного железа 0.1 мм. Поток в сердечнике создается обмоткой 8. Для устранения связи между обмотками 7 и 8 имеются витки 9, соединенные последовательно с обмоткой 7 и намотанные в обратную сторону. Поля в сердечнике и ярме во время ускорения могут значительно превышать поле в рабочей области. Для уменьшения рассеянных полей потока  $\Phi_1$  на несколько порядков применяются экраны 10 и 11, действующие по принципу лабиринтов<sup>[6]</sup>. Экраны 10 представляют собой шесть медных экранов, изолированных друг от друга, имеющих вид катушек с одним

<sup>3</sup> В связи с тем что при сжатии пучка практически сохраняется подобие, увеличение плотности объемного заряда с ростом поля происходит примерно одинаково для всех точек пучка.

разрезом. Разрезы в соседних экранах смещены на  $180^\circ$ . По аналогичному принципу устроен и экран 11. Инжектором служит импульсная электронная пушка, расположенная на  $r_1 = 13.5$  см, обеспечивающая получение токов до 0.5 а при полуширине  $\sim 2^\circ$ . Напряжение на пушке варьировалось от 20 до 60 кв. Имеются устройства, позволяющие дистанционно менять положение пушки относительно вертикальной оси для настройки ее по касательной к окружности 13.5 см. На вакуумных

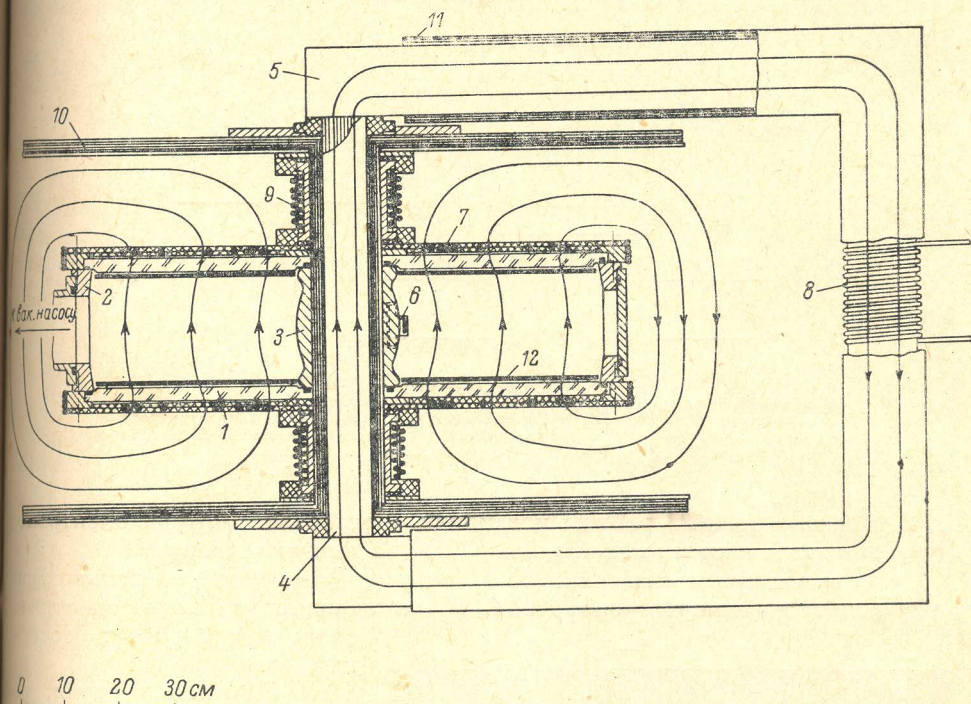


Рис. 3. Конструкция установки Б2.

1, 2, 3 — вакуумные крышки и обечайки; 4 — сердечник; 5 — замыкающее ярмо; 6 — инжектор; 7 — обмотка ведущего поля; 8 — обмотка создающая поток в сердечнике; 9 — обратные витки обмотки ведущего поля; 10, 11 — система магнитных экранов; 12 — проводящее покрытие.

крышках 1 закреплены стекла с графитовым покрытием, соединенные с землей. Рабочий вакуум  $3 \cdot 10^{-6}$  мм рт. ст.

На рис. 4 приведена блок-схема электропитания установки Б2. Для создания квазипостоянного поля для накопления используется конденсаторная батарея  $C_1$ , включаемая разрядником  $P_1$ . С момента включения  $P_2$  появляется напряжение на обходе и начинается накопление. Через время, равное или несколько большее  $t_n$ , включается  $P_3$ , и установка работает, как бетатрон, идет режим стягивания. Моменты включения разрядников и подачи напряжения на инжектор регулируются блоком управления. Для коммутации были применены графитовые разрядники с тремя электродами, работающие в воздухе. Нами использовалась частота повторения рабочего цикла примерно 1 раз в 10 сек. В ряде случаев осуществлялись режимы, при которых радиус равновесной орбиты  $r_p$  менялся при стягивании, в частности достигал в конце ускорения наименьшей возможной величины  $r_p = 14$  см, и ток сбрасывался на внутреннюю мишень. В этом случае при стягивании разрядник подключал к обмоткам ведущего поля не обмотку на ярме, а отдельную батарею  $C_3$  (показано на рис. 4 штриховой линией).

На установке изучалась зависимость накопленного и стянутого тока от напряжения инжекции и ускоряющего напряжения при накоплении. Измерения тока проводились несколькими методами.

1. Оценивалась величина заряда, собранного в камере при накоплении:  $Q = t_n \cdot i_n$ ;  $t_n$  и  $i_n$  (время накопления и ток в витке) измерялись

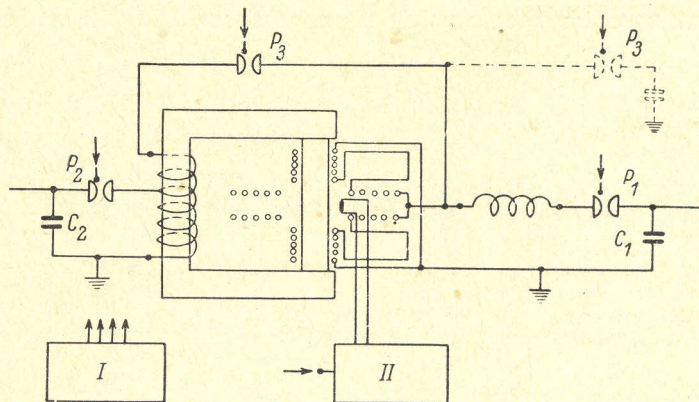


Рис. 4. Схема электропитания установки Б2.  $I$  — блок управления разрядниками и инжектором;  $II$  — блок питания инжектора;  $C_1$  и  $P_1$  — батарея конденсаторов и разрядник квазипостоянного поля;  $C_2$  и  $P_2$  — батарея конденсаторов и разрядник магнитного потока сердечника;  $P_3$  — разрядник поля стягивания.

для каждого режима работы установки. Отсутствие потерь электронов при стягивании контролировалось ФЭУ со сцинтиллятором.

2. Проводилось измерение тока поясом Роговского, охватывающим всю апертуру камеры ускорителя. Пояс экранировался от электрического поля пучка и рассеянных электронов.

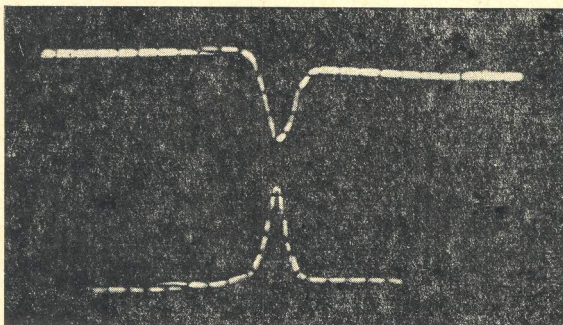


Рис. 5. Фотография с осциллографа

Верхний луч — сигнал с ФЭУ, нижний луч — ток на мишень.

3. Измерялся заряд, падающий на мишень в конце ускорения. Этот способ дает заниженные результаты; использовался он главным образом для относительных измерений при настройке. На рис. 5 дана фотография с экрана двухлучевого осциллографа: нижний луч — ток с мишени, верхний — сигнал с ФЭУ.

4. Ток, сброшенный на мишень, измерялся по величине эдс, наводимой магнитным полем пучка в катушке, расположенной около мишени и выставленной по минимуму наводок ведущего магнитного поля. Катушка, так же как и пояс Роговского, тщательно экранировалась.

Проводились также измерения геометрических размеров пучка с помощью пододвинутых к пучку флажков. Энергия оценивалась по величине магнитного поля на орбите.

Измерения циркулирующего тока, проведенные после отладки установки, для энергий инжекции 20, 40, 60 кв при  $r_p = 14$  см дали значения  $I = 25, 50$  и  $75$  а, что соответствует току, подсчитанному по формуле (7). При этом энергия частиц составляла  $W = 2.8$  Мэв. Сни-

жение ускоряющего напряжения от 400 в/оборот до 200 в/оборот не уменьшало накопленного тока. При дальнейшем уменьшении напряжения на обходе накопленный ток начинал уменьшаться, так как шаг спирали при накоплении становился много меньше ножа инжектора. Наибольшая энергия электронов 5.6 Мэв получена при  $r_p = 40$  см. Размеры пучка при этом около  $1.5 \times 1.5$  см. Эксперименты на данной установке, таким образом, подтвердили возможность получения больших циркулирующих токов на ускорителях со спиральным накоплением в соответствии с расчетом.

В разработке и пуске установки Б2 принимала участие группа сотрудников Института атомной энергии им. И. В. Курчатова. Конструкция Б2 разработана И. Е. Бендером, система электропитания и управления — Л. И. Юдиным. В установке применена электронная пушка, разработанная Самойловым [4].

После проведения на установке экспериментов по получению больших электронных токов она была переоборудована в синхротрон Б2С и в настоящее время используется как инжектор в ускорителе со встречными электронными пучками ВЭП-1 [5].

#### Литература

- [1] Г. И. Будкер. Атомная энергия, № 5, 1956. — [2] Г. И. Будкер, А. А. Наумов. Докл. на конф. ЦЕРН, Женева, 1956. (CERN Symp.), Geneva, 1956. — [3] K. Hund. Stahl und Eisen. Н. 11, 1953. — [4] И. М. Самойлов. ПТЭ, № 1, 1959. — [5] Е. А. Абрамян, И. Е. Бендер, Л. Н. Бондаренко, Г. И. Будкер, Г. Б. Глаголев, А. Х. Кадымов, И. Н. Мешков, А. А. Наумов, В. Е. Пальчиков, В. С. Панасюк, С. Г. Попов, И. Я. Протопопов, Ю. И. Родионов, И. М. Самойлов, А. Н. Скрипский, Л. И. Юдин. Тр. Международной конф. по ускорителям, Дубна, август 1963. Атомиздат, М., 1964. — [6] Е. А. Абрамян, Л. Н. Бондаренко, В. И. Волосов, А. А. Наумов, Б. В. Чирков. ПТЭ, № 1, 1965.

Поступило в Редакцию  
6 апреля 1964 г.  
В окончательной редакции  
10 ноября 1964 г.