

О НЕКОТОРЫХ ФАКТОРАХ, ВЛИЯЮЩИХ НА ПРОЦЕСС ЗАХВАТА ЭЛЕКТРОНОВ В УСКОРЕНИЕ В БЕТАТРОНЕ

Н. М. ГОЛОЩАПОВ

(Представлено научным семинаром физико-технического факультета)

До сих пор еще не было создано достаточно обоснованного теоретического объяснения того, чем главным образом обуславливается захват электронов в ускорение в бетатроне. С точки зрения теории движения одного электрона в бетатроне, например, невозможно объяснить основные явления, как-то: зависимость интенсивности излучения от тока эмиссии и напряжения инжекции. По этой теории получается, что электрон уже на первых оборотах должен попасть на инжектор [1, 2]. Ввиду этого возникла проблема обхода инжектора электронами, а на основе ее—экспериментальные попытки облегчить обход инжектора электронами (различные контракторы, сжимающие орбиту в момент инжекции и т. д.) [3—7]. Однако большинство построенных бетатронов работает успешно, а всевозможные усовершенствования в виде контракторов, кратковременных местных нарушений магнитного поля и т. п. могут дать положительный эффект в случае, если бетатрон дает малый выход излучения.

Некоторые авторы пытались объяснить возможность захвата электронов в ускорение различными факторами, а именно:

1. При определенном распределении азимутально-фазовых неоднородностей магнитного поля (естественно получившихся или искусственно созданных) создаются благоприятные условия для обхода инжектора электронами [8, 9].

2. Наличие резонанса при определенных условиях между свободными бетатронными колебаниями ($no r$ и z) и обращением электронов по орбите может привести или к быстрому затуханию колебаний и обходу инжектора электронами или, наоборот, к увеличению амплитуды колебаний и резкому уменьшению выхода излучения [10—12].

3. Ввиду того, что электроны при инжекции теряют часть энергии на создание электромагнитного поля, происходит сжатие мгновенной равновесной орбиты и, таким образом, появляется возможность обхода инжектора [13].

4. Наличие пространственного заряда в камере, причем уменьшающегося, также благоприятствует обходу инжектора и создает возможность захвата электронов в ускорение (захват на спаде импульса инжекции) [14]. Все эти предложения в какой-то мере получили экспериментальное подтверждение. Заметим также, что здесь речь идет об обходе инжектора электронами, как главной задаче процесса инжекции. Конечно, все указанные факторы имеют место и каким-то образом воздействуют на захват электро-

нов в ускорение, но, как нам кажется, каждый из них не является главным. Существуют экспериментальные данные, где действие этих факторов должно было бы привести к исчезновению или значительному уменьшению излучения, чего фактически не получается. Следовательно, главный, определяющий фактор для захвата электронов в ускорение в существующих теориях не учтен.

В свое время Говард [15] и другие авторы указывали, что для того, чтобы объяснить процесс захвата электронов в ускорение, надо учесть взаимодействие электронов и электронных пучков. Учитывая взаимодействие (электростатическое) электронов в пучке и пучков между собой в процессе инъекции, мы приближаемся к действительной картине.

Эта задача нашла свое разрешение в первом приближении в работе Б. Н. Родимова [16]. Было показано, что вследствие электростатического взаимодействия электронов в пучке и пучков в процессе инъекции происходит попеременное смещение равновесной орбиты в ту и другую сторону в направлении радиуса, изменяется период и амплитуда колебания пучков. При этом получается, что проблема обхода инжектора не играет столь важной роли, какая придается ей в настоящее время.

В нормальных условиях (оптимальное распределение поля, оптимальные инъекции, эмиссия, положение пушки и т. д.) электронные пучки, вследствие электростатического взаимодействия между ними, сами обеспечивают захват их в ускорение. Конечно, какая-то часть электронов попадает и на инжектор и на стенки камеры, однако, на стенки попадает значительно больше электронов, чем на инжектор. Показано, что при увеличении до определенных пределов плотности заряда пучка условия захвата должны улучшаться, а интенсивность излучения должна увеличиваться.

Следует указать, что некоторые авторы оспаривают это положение, утверждая, что электростатическое взаимодействие пучков не только не благоприятствует захвату электронов в ускорение, а, наоборот, мешает захвату, и главным фактором, помогающим захвату, считают магнитное взаимодействие пучков. В работе Родимова Б. Н. показано, что магнитное взаимодействие пучков в момент инъекции оказывается незначительным и практически не влияет на захват электронов в ускорение, причем магнитное взаимодействие пучков не мешает, а способствует захвату, только эффект его значительно слабее электростатического взаимодействия.

Нами были проведены эксперименты с целью определить, влияет ли и каким образом электростатическое взаимодействие пучков в процессе инъекции на захват электронов в ускорение. Схема эксперимента представлена на рис. 1. Работа проводилась на бетатроне в 15 Мэв. Обычный и поперечный инжекторы представляли собой типичные керстовские инжекторы, только поперечный инжектор инъецировал электроны по радиусу. Импульсы инъекции были близкие к синусоидальным. Для обычного инжектора $U_i = 30$ кв $\tau_i = 10$ мксек и для поперечного инжектора $U_i \rightarrow$ до 12 кв и $\tau_i \approx 16$ мксек. При оптимальном значении излучения ток на слой от обычного инжектора был постоянным и равным 65 мка. Включая затем поперечный инжектор, мы нашли зависимость интенсивности излучения J от напряжения инъекции и тока эмиссии поперечного инжектора, т. е.

$$J = f(U_i) \text{ при } U_n = \text{const}$$

$$J = f(I_{cl}) \text{ при } U_i = \text{const}$$

$$J = f(U_i, I_{cl}),$$

где U_n — напряжение накала поперечного инжектора, I_{cl} — ток со слоя от поперечного инжектора (т. е. ток поперечного пучка).

Импульс инъекции на поперечный инжектор подавался в фазе с импульсом инъекции обычного инжектора. Поскольку нам необходимо было выяснить влияние электростатического взаимодействия пучков, которое зависит от плотности заряда ρ поперечного пучка, то результаты измерений мы пред-

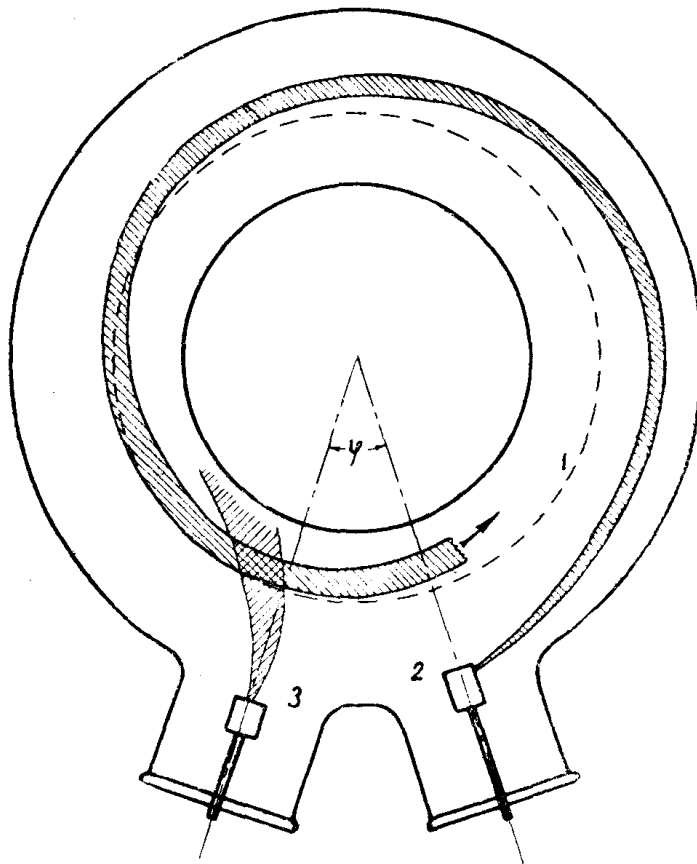


Рис. 1. Схема эксперимента

1 — равновесная орбита, 2 — обычный инжектор, 3 — поперечный инжектор, $\varphi \approx (25^\circ + 30^\circ)$

ставили в виде семейства кривых, как на рис. 2. Отсюда не трудно было найти зависимости

$$J = f(\rho) \text{ при } I_{c.l} = \text{const}$$

$$J = f(I_{c.l}) \text{ при } \rho = \text{const.}$$

Для кривых рис. 2 и 3 ρ определялось следующим образом (все рассуждения ведем для пучка из поперечного инжектора). Плотность тока пучка можно представить

$$i = e \rho V \quad (1)$$

где e — заряд электрона,

$\rho = \frac{\text{эл} - \text{нов}}{\text{см}^3}$ — плотность заряда.

V — см/сек — скорость электронов,

i — а/см² — плотность тока пучка.

Скорость электронов можно выразить:

$$V = 5,93 \cdot 10^7 \sqrt{U_i} \quad (2)$$

где U_i — напряжение инъекции в вольтах.

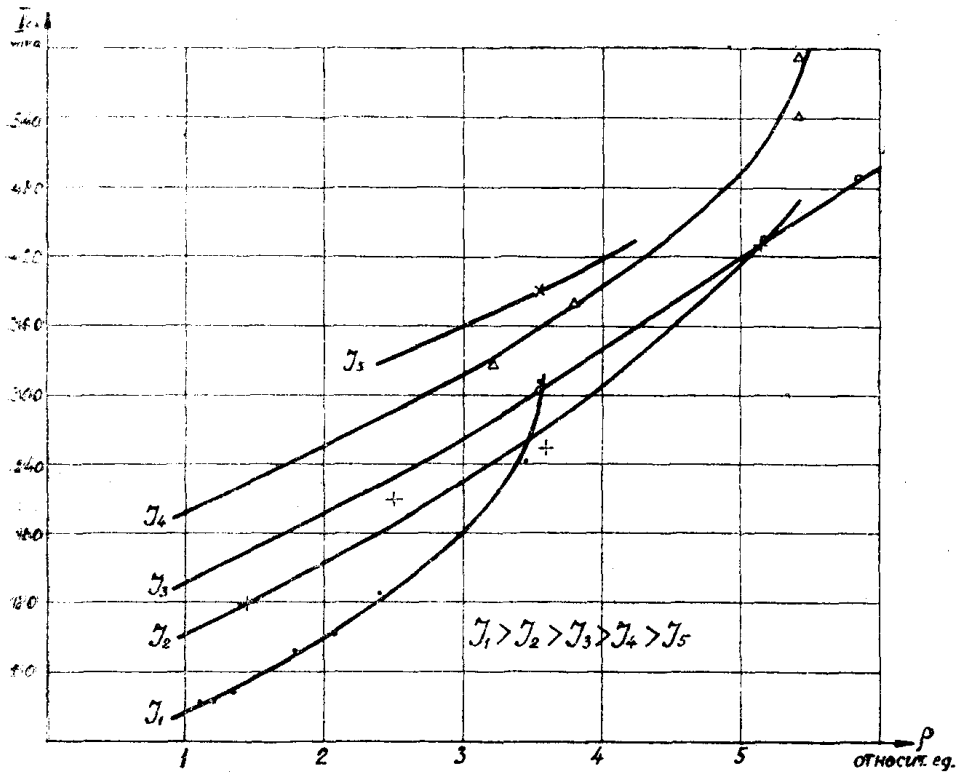


Рис. 2

Зависимость интенсивности излучения J от силы тока и плотности заряда поперечного пучка

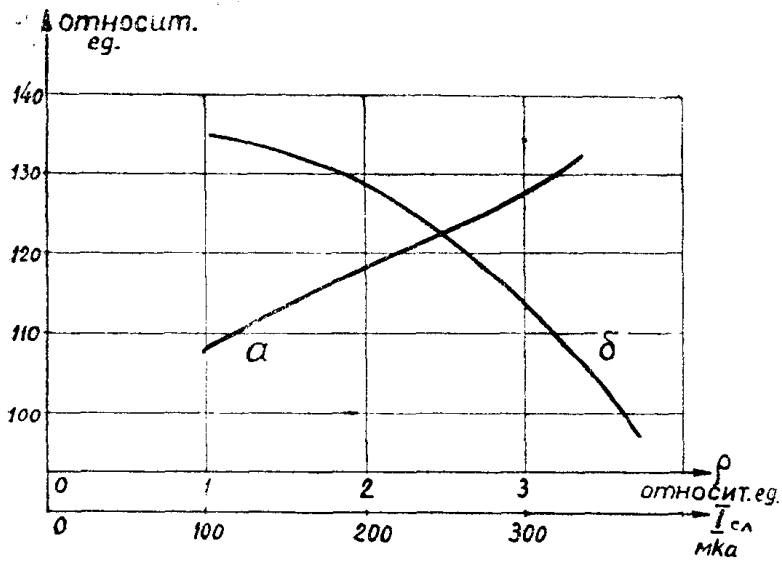


Рис. 3

Зависимость интенсивности излучения от плотности заряда поперечного пучка при постоянной силе тока его (кривая a , где $I_{сл} = 210 \text{ мка} = \text{const}$) и от силы тока при постоянной плотности заряда (кривая b , где $\rho = 3 \cdot 10^{-6} \text{ A} = \text{const}$)

Сила тока пучка, которую мы определяем по току на слой, т. е. I_{cl} будет

$$I_{cl} = iS, \quad (3)$$

где S — сечение пучка, $см^2$

I_{cl} — в амперах.

Таким образом можно найти

$$\rho = A \frac{I_{cl}}{\sqrt{U_i}}, \quad (4)$$

где

$$A = \frac{50,59}{Se} = \text{const}.$$

Для каждой пары значений I_{cl} и U_i можно подсчитать ρ . Заметим, что S берется как начальное сечение пучка, т. е. площадь отверстия анода. Тогда и плотность заряда ρ будет начальной плотностью.

Учитывая выражение (4) для ρ , эксперимент можно провести так, что непосредственно получают:

$$J = f(\rho) \text{ при } I_{cl} = \text{const},$$

$$J = f(I_{cl}) \text{ при } \rho = \text{const}.$$

Соответствующим подбором накала инжектора и напряжения инжекции эти условия, т. е. $I_{cl} = \text{const}$ и $\rho = \text{const}$, выполнить можно.

Кривая (а, рис. 3) зависимости интенсивности излучения от плотности заряда пучка подтверждает теоретическое рассмотрение этого явления, данное Родимовым Б. Н., а именно: электростатическое взаимодействие имеет место и увеличение плотности заряда пучка (до определенных пределов) ведет к увеличению интенсивности излучения.

О кривой б (рис. 3) можно сказать следующее. Поскольку магнитное взаимодействие поперечных пучков практически ничтожно, то мы считаем, что магнитное поле поперечного пучка создает значительное местное нарушение управляющего магнитного поля, вследствие чего условия захвата ухудшаются и интенсивность излучения уменьшается.

ЛИТЕРАТУРА

1. D. W. Kerst, R. Serber—Phys. Rev. 60, 53. 1941.
2. J. A. Raichman, W. H. Cherry—Journ. Franklin Inst. 243, 261, 345. 1947.
3. J. Davis—Phys. Rev. 81, 656. 1951.
4. W. B. Jones et. al.—Phys. Rev. 78, 60. 1950.
5. G. D. Adams,—Rev. Sci. Instr. 19, 607. 1948.
6. G. D. Adams, D. W. Kerst, D. T. Scag—Rev. Sci. Instr. 18, 790. 1947.
7. J. Davis—Rev. Sci. Instr. 21, 971, 1-50.
8. F. K. Goward—Phys. Soc. 61, 345, 284. 1948.
9. Мелихов В. С. Диссертация, Томск ТПИ, 1954.
10. S. E. Barden—Proc. Phys. Soc. 64, 373, 85. 1951.
11. S. E. Barden—Proc. Phys. Soc. 64, 379, 579. 1951.
12. E. D. Courant—Journ. Appl. Phys. 20, 6, 611. 1949.
13. D. W. Kerst—Phys. Rev. 74, 503. 1948.
14. R. Wideröe—Journ. Appl. Phys. 22, 3, 362. 1951.
15. F. K. Goward et. al—Proc. Inst. E. E 97, 108, 320. 1950.
16. Родимов Б. Н. О механизме захвата электронов в ускорении в бетатроне Известия ТПИ т. 87, 1957