

ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ  
ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО СПЕКТРА ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА  
БЕТАТРОНА И ЕГО СТАБИЛЬНОСТИ

В. В. ЕВСТИГНЕЕВ

(Представлена научным семинаром научно-исследовательского института ядерной физики)

При исследовании разброса энергии электронов необходимо иметь в виду, что, с одной стороны, бетатрон — это электронный прибор, в котором определяющую роль играет электронно-оптическая система. С другой стороны, бетатрон — это электрическая машина с довольно сложными цепями и приборами автоматики. Следовательно, энергетический разброс электронов по энергиям будет определяться, с одной стороны, самим процессом движения электронов, а с другой — эксплуатационными параметрами бетатрона.

Для получения наибольшего захваченного в ускорение заряда необходимо использовать все потенциальные ямы, обусловленные электромагнитным полем данного бетатрона. С целью осуществления этого электроны должны вводиться в камеру бетатрона при различных начальных энергиях, определяемых областью устойчивых орбит, для которых имеются потенциальные ямы [1]. В общем случае частицы инжектируются с некоторым угловым разбросом и импульсами, не совпадающими с равновесным значением [2].

Диапазон энергий  $\Delta E$  вводимых электронов определяется расположением инжектора относительно радиуса равновесной орбиты и выражается соотношением

$$\frac{\Delta E}{E_i} = \frac{E_i - E_0}{E_i} = \left( \frac{r_i^2 - r_0^2}{r_i^2} \right), \quad (1)$$

где  $E_i$  — энергия электронов, вводимых на радиус установки инжектора  $r_i$ ;

$E_0$  — энергия электронов, вводимых на радиус равновесной орбиты  $r_0$ .

Из выражения (1) абсолютный разброс электронов по энергиям в момент инжекции увеличивается с ростом напряжения инжекции.

Так как ввод электронов происходит не только на одну равновесную орбиту, а на область орбит, необходимо рассмотреть поведение орбиты, несколько отличающейся от равновесной. Выражение, описывающее ускорительный режим в бетатроне, записывается:

$$\frac{dP}{dt} = - \frac{e}{c\Pi} \cdot \frac{\partial \Phi}{\partial t}, \quad (2)$$

где  $P$  — импульс частицы, а

$\Phi$  — скалярный магнитный поток через ее орбиту,

$\Pi$  — длина орбиты.

Обозначая равновесные значения индексом  $S$ , а отклонения от них через  $\Delta P$ ,  $\Delta \Pi$ ,  $\Delta \Phi$ , можно получить [3]

$$\frac{d\Delta P}{dt} = -\frac{\Delta \Pi}{\Pi_s} \cdot \frac{dP_s}{dt} - \frac{e}{c\Pi_s} \cdot \frac{\partial \Delta \Phi}{\partial t} \equiv 0$$
$$\Delta P = \text{const} \quad (3)$$

Таким образом, в бетатроне с неподвижной равновесной орбитой отклонение импульса от равновесного значения является интегралом движения, независимо от геометрии орбит. Это означает, что абсолютный разброс импульсов частиц пучка в конце ускорения остается таким же, как и при инжекции.

Инжектируемые в камеру электроны движутся по мгновенным орбитам, определяемым расположением инжектора относительно равновесной орбиты. С ростом магнитного поля орбиты всех частиц асимптотически пропорционально  $\langle B \rangle^{-1}$  приближаются к равновесной. В процессе ускорения частицы испытывают радиальные колебания, амплитуды которых по мере увеличения энергии частиц затухают. Изменение энергии электронов в бетатроне оказывается не зависящим от бетатронных колебаний [3]. Однако наличие этих колебаний приводит к конечной величине разброса электронов в пучке по энергии в момент смещения их с равновесной орбиты. Процесс смещения электронов с равновесной орбиты происходит в конечное время. Энергетическое распределение электронов в этом случае определяется выражением [4]:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{2\Pi \cdot \Delta\tau}{T} \cdot \text{ctg } \varphi, \quad (4)$$

где  $T$  — период изменения магнитного поля,

$\Delta\tau$  — длительность импульса излучения,

$\varphi$  — фаза сброса электронов.

При выходе электронов из бетатрона электростатическим способом электроны проходят электрическое поле между двумя пластинами. Наличие бетатронных колебаний приводит к тому, что часть электронов испытывает многократные или скользящие столкновения с пластинами дефлектора, что приводит к дополнительному уширению энергетического спектра.

Рассмотренные выше причины неоднородности энергии электронов относятся к одному импульсу излучения.

Изменение питающего напряжения бетатрона приводит к тому, что спектр энергии электронов будет изменяться от импульса к импульсу.

Таким образом, основной энергетический разброс электронного пучка обусловлен процессом инжекции, бетатронными колебаниями, конечным временем сброса электронов, влиянием отклоняющего конденсатора и нестабильностью питающего напряжения.

Экспериментальные результаты получены на аппаратуре, описанной в работах [5, 6], схема которой представлена на рис. 1.

### 1. Форма энергетического спектра электронного пучка

На рис. 2 приведена линия, полученная при энергии 7 Мэв. Она характеризует энергетическое распределение электронов бетатрона, которые проходят через тонкое окно и воздушный промежуток. В грубом приближении линия обладает треугольной формой с некоторой асиммет-

рий в сторону меньших энергий, обусловленной рассеянием энергии в фольгах и воздушном промежутке. Ширина линии на полувысоте (полуширина) составляет 2,4% для стабилизированного и 3,5% для нестабилизированного бетатрона.

Вклад в ширину спектра, вносимый спектрометром с учетом его aberrаций, составляет 0,14%.

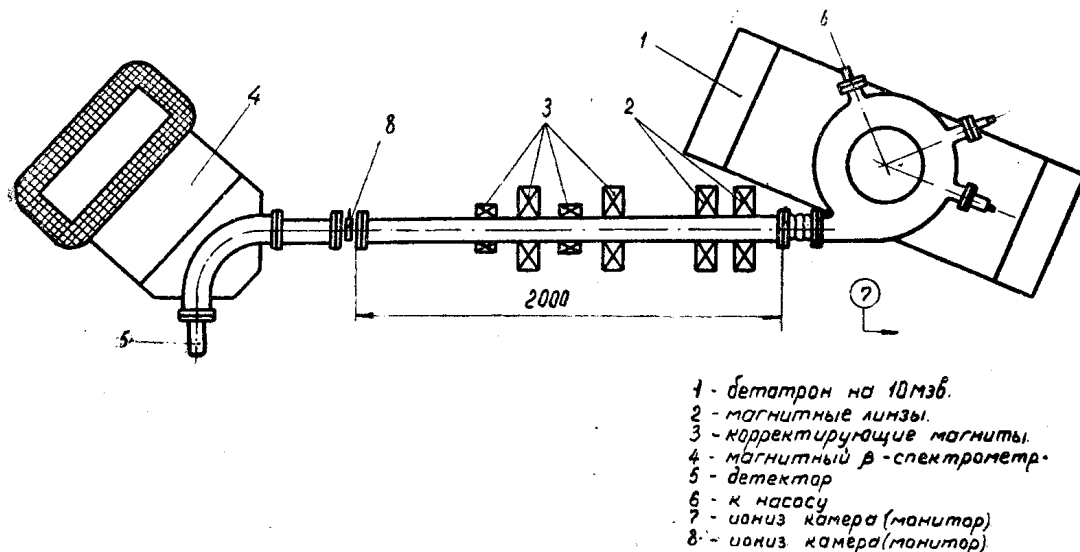


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

Суммарные потери энергии в толщине вещества, которую проходит пучок, составляют 1,3% от приведенной ширины спектра.

Часть ширины спектра, обусловленная самим ускорителем, составляет 0,96%, для стабилизированного и 2,06% для нестабилизированного бетатрона.

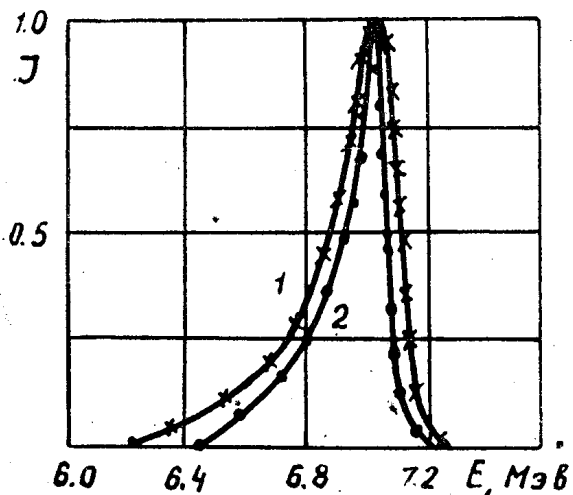


Рис. 2. Форма энергетического спектра электронного пучка:

1 — нестабилизированного  $\frac{\Delta E}{E} = 3,5\%$ ;

2 — стабилизированного  $\frac{\Delta E}{E} = 2,5\%$  бетатрона

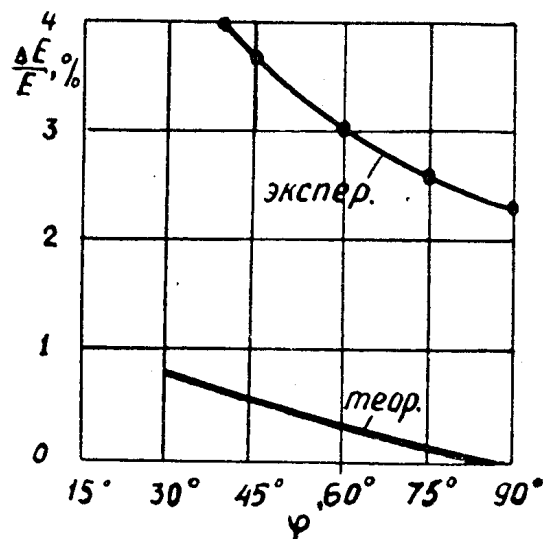


Рис. 3. Зависимость энергетического спектра от фазы сброса

## 2. Зависимость энергетического спектра от фазы сброса и вывода электронов из ускорителя

Изменение фазы смещения электронов можно осуществлять регулировкой тока в магните бетатрона, оставляя уровень энергии ускоренных электронов постоянным. На рис. 3 приведено сравнение теоретической и экспериментальной зависимостей полуширины энергетического спектра от фазы сброса при постоянной энергии электронов 7 Мэв. Расчет производился при учете, что длительность импульса излучения составляет 16 мксек. Характер изменения  $\frac{\Delta E}{E}$  от фазы сброса соответствует теоретической. Из рисунка видно, что для получения моноэнергетических электронов смещение электронов с равновесной орбиты и вывод их из ускорительной камеры лучше производить при фазах, близких к  $90^\circ$ .

## 3. Зависимость полуширины энергетического спектра электронного пучка от его энергии

Энергию электронов в бетатроне можно регулировать либо изменением амплитуды тока в магните бетатрона, либо регулировкой фазы смещения электронов с равновесной орбиты, оставляя амплитуду тока в магните постоянной.

На рис. 4 приведены зависимости полуширины энергетического спектра электронного пучка от энергии при различных методах ее регу-

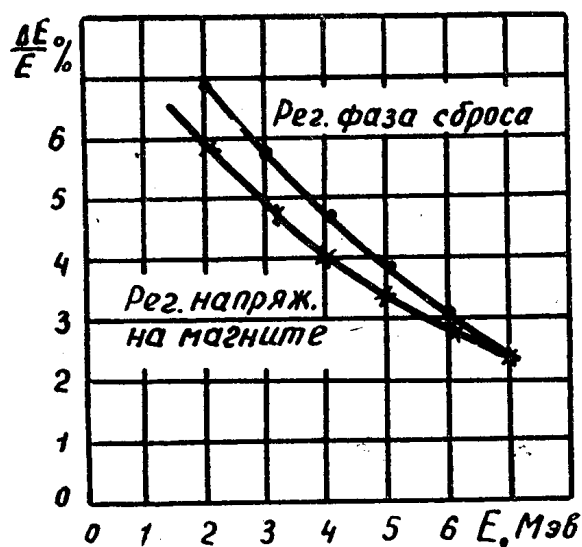


Рис. 4. Зависимость энергетического спектра от энергии при различных методах ее регуляции:

1 — регулировка фазы сброса; 2 — регулировка напряжения на магните

лировки. Показано, что с целью получения узкого энергетического распределения регулировку энергии лучше производить изменением амплитуды тока в магните бетатрона.

## 4. Зависимость энергетического спектра электронов от напряжения на дефлекторе

Отклоняющий конденсатор для вывода электронов из бетатрона является электростатическим бетаспектрометром, поэтому изменение напряжения на нем будет влиять на энергетический спектр электроно-

го пучка бетатрона. Экспериментально показано (рис. 5), что при максимальной интенсивности выведенных из бетатрона электронов полуширина энергетического спектра минимальна. При отклонении напряжения на дефлекторе от оптимального наблюдается уход максимума в сторону меньших энергий. Это, а также сильная зависимость ширины спектра от напряжения на дефлекторе, обусловлено потерями энергии электронов при столкновении с металлическими пластинами дефлектора.

### 5. Зависимость энергетического спектра электронного пучка бетатрона от нестабильности питающего напряжения

Система стабилизации энергии электронов в бетатроне обеспечивает заданный уровень энергии путем автоматической подстройки фазы сброса электронов. Изменение фазы сброса, в свою очередь, ведет к изменению энергетического спектра электронного пучка. Рис. 6 показывает

теоретическую и экспериментальную зависимости ширины энергетического спектра от нестабильности питающего напряжения. Эксперименталь-

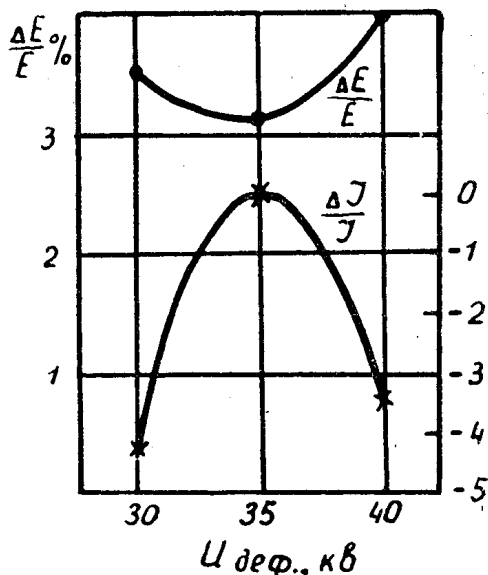


Рис. 5. Зависимость энергетического спектра и интенсивности выведенного электронного пучка от напряжения в дефлекторе

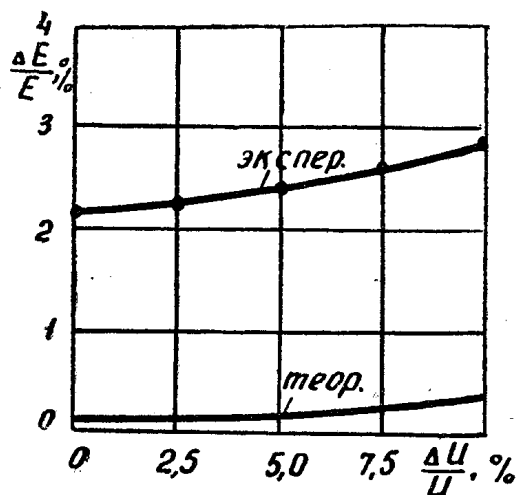


Рис. 6. Зависимость энергетического спектра от нестабильности напряжения

ная скорость изменения полуширины спектра от нестабильности напряжения на магните выше ожидаемой, что можно объяснить изменением длительности импульса излучения.

### Заключение

Полуширина энергетического спектра выведенного электронного пучка бетатрона в оптимальном режиме не превышает 1%.

Отклонения от оптимального режима могут увеличить полуширину энергетического распределения электронов в введенном пучке до 2%.

Полученные экспериментальные данные находятся в качественном согласии с теоретическими.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Б. Н. Родимов. Изв. ТПИ, т. 87, 31, 1957.
2. Д. Керст. Сб. Ускорители, под редакцией Б. К. Яблокова, 1962.
3. А. А. Коломенский, А. И. Лебедев. Теория циклических ускорителей. Госатомиздат, М., 1962.
4. T. Westergaard. Nucl. Instr. and Meth. 10, 145, 1961.
5. В. М. Антонов, В. В. Евстигнеев, Б. А. Кононов. Изв. ТПИ, т. 140, 222, 1965.
6. Б. А. Кононов, В. М. Антонов, В. В. Евстигнеев. Изв. АН СССР, сер. физ., № 2, 1964.