

ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ОПРЕДЕЛЕНИЮ ПРЕДЕЛЬНОЙ ИНТЕНСИВНОСТИ ПУЧКА В ИНДУКЦИОННОМ ЦИКЛИЧЕСКОМ УСКОРИТЕЛЕ С ПОСТОЯННЫМ ВЕДУЩИМ ПОЛЕМ

В. Н. Канунников, П. С. Михалев, Н. Ф. Симухин<sup>§)</sup>,  
В. Л. Чахлов<sup>§)</sup>

УДК 681.384.6

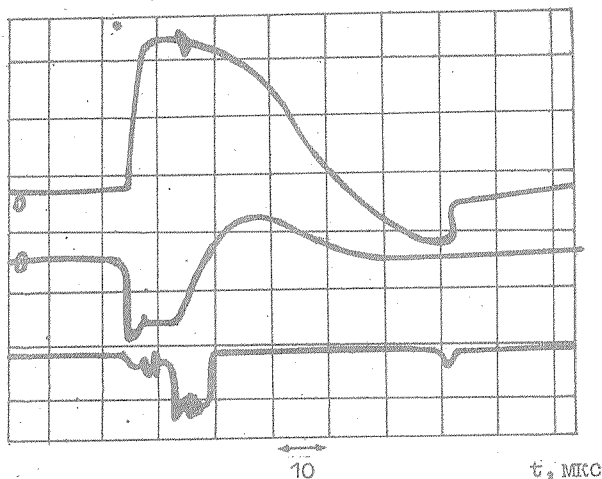
Приведены результаты измерения параметров пучка индукционного циклического ускорителя с постоянным во времени ведущим полем. Измеренные значения среднего тока пучка в зависимости от амплитуды тока инжекции сравниваются с расчетными значениями.

Индукционные ускорители электронов — линейные и циклические, весьма перспективны для применения в различных прикладных целях. Индукционный метод ускорения, по существу, использует принцип электрического трансформатора и поэтому позволяет получить как большую мощность ускоренного пучка, так и высокий коэффициент полезного действия ускорителя. При циклическом ускорении эти возможности реализуются в постоянном во времени ведущем магнитном поле. В отличие от широко известного бетатрона, в котором применяется переменное ведущее поле, в постоянном поле индукционного циклического ускорителя (ИЦУ) длительность инжекции может составлять существенную часть цикла ускорения; в принципе, она ограничена лишь необходимостью оставить время на ускорение частиц и на перемагничивание ускоряющих сердечников (индукторов).

<sup>§)</sup> НИИ электронной микроскопии при ТПИ им. С. М. Кирова (г. Томск).

Что касается магнитной системы постоянного ведущего поля, то значительными преимуществами обладает радиально-секторный магнит, позволяющий разместить индукторы в прямолинейных промежутках. Ускоритель с такой магнитной системой разработан в ФИАНе /1-3/. Позднее был создан, запущен и исследован небольшой экспериментальный ускоритель такого типа с максимальной энергией 1,5 МэВ /4,5/.

По сравнению с экспериментами, о которых сообщалось ранее /5/, возможности инжекционной и ускоряющей систем расширены; в частности, длительность инжекции можно увеличивать до 20 мкс, а амплитуду ускоряющего напряжения - до 0,5 кВ. При частоте повторения 50 Гц средний ток ускоренных электронов достигает 1,5 мкА, то есть находится на уровне интенсивности микротронов 3-см диапазона /6/. На рис. 1 приведены осциллограммы, поясняющие работу ускорителя.



Р и с. 1. Верхняя осциллограмма - ускоряющее напряжение (масштаб по вертикали 200 В/дел), средняя - импульс напряжения инжекции (масштаб по вертикали 20 кВ/дел), нижняя - ток пучка, ускоренного до  $\sim 1,0$  МэВ (сигнал с мишени, амплитуда  $\sim 2$  мА).

Масштаб по горизонтали - 10 мкс/дел.

Величину тока ускоренных частиц можно оценить, рассматривая идеализированный стационарный режим ускорения, при котором импульсы ускоряющего напряжения и тока инжекции имеют прямоугольную форму; их амплитуды обозначим через  $U_m$  и  $I_m$ ; пусть длительность инжекции  $\tau$ , а частота повторения циклов  $f$ . Будем исходить из того, что на орбите инжекции радиуса  $r$  в течение всего времени  $\tau$  существует пучок в форме кольца; обозначим амплитуду плотности заряда в этом пучке через  $\sigma_m$ . Часть этого пучка, определяемая коэффициентом захвата  $K$ , под действием напряжения  $U_m$  непрерывно переходит в режим ускорения и перемещается в направлении орбит больших энергий. При этом для среднего тока ускоряемых электронов  $I_0$  получим выражение

$$I_0 = K \sigma_m 2\pi r h \frac{dr}{dt} \tau f, \quad (1)$$

в котором  $h$  - размер пучка по вертикали, а  $t$  - время.

Предельное значение  $\sigma_m$  можно оценить, исходя из ограничения, накладываемого поперечными силами кулоновского расталкивания (см., например, /7/):

$$\sigma_m = \frac{\gamma_z |\delta \gamma_z|}{\pi r^2 r_0} e \beta^2 \gamma^3. \quad (2)$$

В этом выражении  $\gamma_z$  - частота бетатронных колебаний по вертикали,  $|\delta \gamma_z|$  - допустимое ее изменение,  $r_0 = 2,8 \cdot 10^{-15}$  м, а  $\beta$  и  $\gamma$  - приведенные релятивистские скорость и энергия инжектируемых электронов. Вместо амплитуды плотности  $\sigma_m$  можно использовать упоминавшуюся амплитуду тока инжекции  $I_m$ , так как

$$\sigma_m = I_m / h d \beta c \quad (3)$$

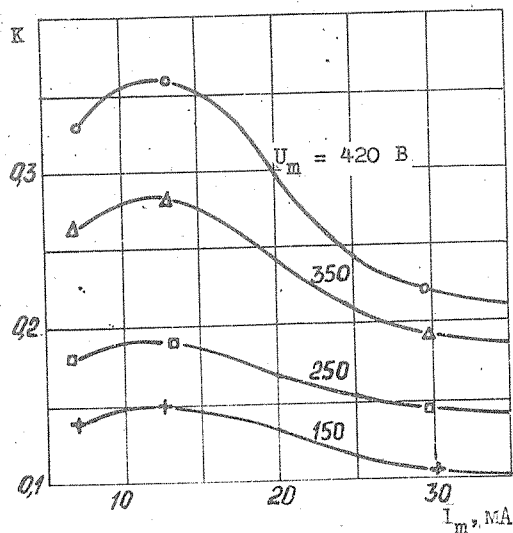
( $d$  - радиальный размер пучка,  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с). Если подставить (3) в выражение (1) и провести простые преобразования с учетом равенства  $dr/dt = dr/dp \cdot dp/dt$  ( $p$  - импульс электрона), то можно получить следующую формулу

$$I_0 = K I_m \frac{e U_m}{\beta^2 \gamma E_0} \frac{dr}{d} \tau f, \quad (4)$$

в которой  $E_0$  - энергия покоя,  $e$  - заряд электрона,  $\alpha$  - коэффициент удлинения орбит.

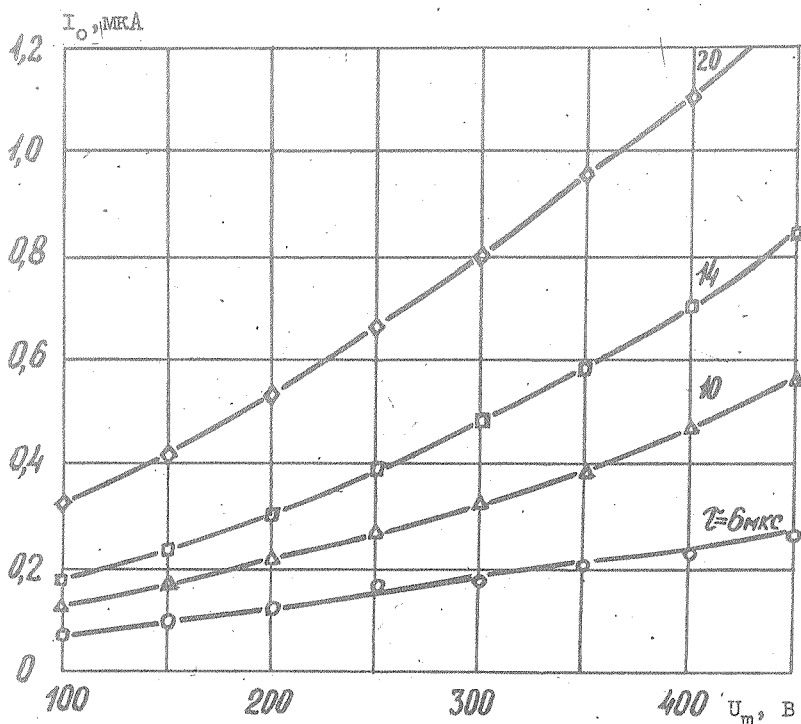
Коэффициент захвата  $K$  - безразмерная величина, меньшая единицы. При больших скоростях ухода орбиты от инжектора (инфлектора), которые используются в ИДУ, ее измеренные значения и их зависимость от ускоряющего напряжения и геометрических параметров инжекции достаточно хорошо согласуются с представлениями одноэлектронной теории захвата.

Экспериментально коэффициент захвата  $K$  определяли как отношение тока электронов, ускоренных до небольшой энергии, к току инжекции. На рис. 2 построены зависимости этого отношения от амплитуды тока инжекции для нескольких значений амплитуды ускоряющего напряжения. Виден быстрый рост коэффициента захвата при увеличении ускоряющего напряжения. Максимум приходится на ток инжекции, близкий к 12 мА; при дальнейшем уве-



Р и с. 2. Зависимость коэффициента захвата  $K$  от амплитуды тока инжекции  $I_m$  при различных значениях ускоряющего напряжения  $U_m$

личении тока происходит уменьшение коэффициента захвата. Естественно предположить, что указанное значение является предельным током, который можно удержать на орбите инжекции. Оценка по формуле (2) (при  $\nu_z = 0,7$ ,  $|\delta\nu_z| = 0,2$ ,  $\beta = 0,3$ ,  $r = 9 \cdot 10^{-2}$  м) показывает, что току  $I_m = 12$  мА соответствует площадь поперечного сечения пучка  $hd = 4$  мм<sup>2</sup>, что согласуется с условиями опыта. Таким образом, дальнейшее увеличение тока инжекции при указанных условиях нецелесообразно: оно не будет приводить к увеличению интенсивности ускоренного пучка.



Р и с. 3. Зависимость среднего тока ускоренных электронов  $I_0$  от амплитуды ускоряющего напряжения  $U_m$  при различных значениях длительности инжекции  $\tau$

Дальнейшее увеличение интенсивности ускоренного пучка зависит от возможностей увеличения длительности инъекции, амплитуды ускоряющего напряжения и частоты повторения циклов. Длительность инъекции и частота повторения, определяющие скажность работы ускорителя, входят в выражение для среднего ускоренного тока в виде произведения их первых степеней (см. (4)). От ускоряющего напряжения, входящего в выражение (4) множителем, сильно зависит также и величина коэффициента захвата  $K$  (см. рис. 2).

Измеренные зависимости среднего тока ускоренного пучка от ускоряющего напряжения и длительности инъекции приведены на рис. 3. Они, по меньшей мере качественно, согласуются с приведенными выше теоретическими соображениями. Точное количественное сравнение эксперимента и теории затруднено рядом неучтенных факторов и, в первую очередь, существенным отличием реальной формы импульса ускоряющего напряжения от прямоугольной (см. рис. 1). При такой форме ускоряющее напряжение и коэффициент захвата в течение инъекции меняются, и простая формула (4) оказывается завышенным приближением.

Результаты расчета и эксперименты показывают, что целесообразно еще увеличивать длительность инъекции. Ее предельное значение будет, по-видимому, определяться эффектами пространственного заряда уже не в инжектируемом "кольце", а во всем вращающемся "диске" из ускоряемых электронов; она будет зависеть от соотношения между длительностью инъекции и временем ускорения, то есть в первую очередь, также от величины ускоряющего напряжения.

Что касается частоты повторения, то ее выбор определяется чисто техническими возможностями. Использование в индукторах высококачественного листового ферромагнетика (например, толщиной 0,02-0,01 мм) позволит работать на частотах порядка кГц. Если увеличить и длительность инъекции до 100 нс, то средний ток ускоренных электронов составит 150 мкА, то есть в несколько раз превысит ток пучка в микротронах Ю-см диапазона /6/.

Поступила в редакцию  
5 декабря 1980 г.

### Л и т е р а т у р а

1. В. Н. Канунников, А. А. Коломенский, П. С. Михалев, А. П. Фатеев, Атомная энергия, 38, 234 (1975).
2. В. Н. Канунников, П. С. Михалев, ЖТФ, 46, 2586 (1976).
3. В. Н. Канунников, Труды VI Всес. совещ. по ускорителям, ОИЯИ, Дубна, 1979 г., т. II, с. 315.
4. В. Н. Канунников, А. А. Косарев, П. С. Михалев, А. А. Звонцов, Н. Ф. Симухин, В. Л. Чахлов, Труды V Всес. совещ. по ускорителям, т. II, "Наука", 1977 г., с. 74.
5. В. Н. Канунников, П. С. Михалев, Н. Ф. Симухин, В. Л. Чахлов, Труды VI Всес. совещ. по ускорителям, изд. ОИЯИ, Дубна, 1979 г., т. II, с. 319.
6. В. П. Степанчук, Труды VI Всес. совещ. по ускорителям, изд. ОИЯИ, Дубна, 1979 г., т. II, с. 323.
7. Г. Брук, Циклические ускорители заряженных частиц, Атомиздат, М., 1970 г., с. 229.