

09;10;12

## Экспериментальное исследование автоколебаний пучка в секции линейного ускорителя на обратной волне

© В.В. Козлюк

Институт химической кинетики и горения СО РАН,  
630090 Новосибирск, Россия

(Поступило в Редакцию 11 октября 1995 г. В окончательной редакции 19 февраля 1996 г.)

В ускоряющей структуре (УС) односекционного линейного ускорителя (ЛУ) на обратной волне относительно недавно были экспериментально обнаружены автоколебания тока ускоренного пучка [1,2]. Автоколебания представляют собой нежелательное явление для работы ускорителя, так как снижают его КПД, ухудшают качество пучка на выходе.

Физический механизм автоколебаний пучка в секции ЛУ на обратной волне обсуждался в работах [1,2]. Здесь полезно еще раз вернуться к этому вопросу. Продольное распределение ускоряющего поля в секции ЛУ на обратной волне имеет экспоненциально спадающий характер. Инжекция частиц осуществляется навстречу потоку ВЧ мощности со стороны ее вывода из УС. При незначительной нагрузке секции током пучка это распределение поля носит характер, близкий к расчетному, при котором обеспечивается синхронное ускорение частиц. В случае перегрузки секции током инжекции (режим автоколебаний) в первых ячейках УС по ходу пучка ВЧ мощность почти полностью преобразуется в мощность пучка. Оставшийся после этого преобразования уровень ВЧ мощности не достаточен для обеспечения синхронного ускорения последующих частиц и они выпадают из режима ускорения. После того как синхронные частицы покинут секцию, в ней начнет восстанавливаться первоначальное распределение ускоряющего поля. При напряженности поля, близкой к расчетной, будет захвачена в режим ускорения следующая порция частиц. Далее этот процесс периодически продолжается вплоть до прекращения инжекции. Ток пучка складывается из последовательности двух групп частиц: ускоренных и неускоренных. Иными словами, временные интервалы, в течение которых происходит ускорение частиц, чередуются с интервалами выпадения частиц из режима ускорения. Периодичность этого процесса [1–3] равна сумме времени пролета захваченных в режим ускорения частиц и времени заполнения ВЧ мощностью УС после того, как ее покинут синхронные частицы

$$T = L(1/V_{ph} + 1/V_g), \quad (1)$$

где  $L$  — длина секции,  $V_{ph}$  и  $V_g$  — среднее по длине УС значение фазовой и групповой скорости соответственно.

Схема ускорения частиц в ЛУ на обратной волне представлена в [4]. Из рассмотрения этой схемы можно получить соотношение, связывающее условия возникновения автоколебаний с параметрами ускорителя при

следующих допущениях: 1) в каждой ячейке секции поглощается одна и та же порция ВЧ мощности, 2) потери пучка в процессе ускорения отсутствуют, 3) в режиме автоколебаний выходная ВЧ мощность близка к нулю [1,2]

$$\frac{\Delta I}{I^0} = \frac{Pe/(I^0 \Delta W)}{N^{-1} \sum_{i=1}^N \prod_{j=i+1}^N \exp(-2\alpha_j l_j)}, \quad (2)$$

где  $\Delta I = I - I^0$  — отклонение тока ускоренного пучка относительно его проектного значения  $I^0$ ;  $P$  — выходная ВЧ мощность, соответствующая нагрузке УС током  $I^0$ ;  $\Delta W$  — приращение энергии частицами в секции;  $e$  — заряд электрона;  $\alpha_j$  — затухание ВЧ мощности в  $j$ -й ячейке УС на длине  $l_j$ ;  $N$  — число ускоряющих ячеек;  $i = 1, 2, \dots, N$ .

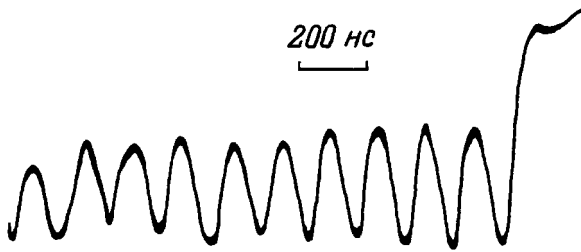
Очевидно, что знаменатель дроби ограничен с обеих сторон неравенствами

$$N^{-1} < N^{-1} \sum_{i=1}^N \prod_{j=i+1}^N \exp(-2\alpha_j l_j) < 1.$$

Тогда при фиксированном значении  $I_0$  и  $I^0 \Delta W/e \gg P$  видно, что с ростом выходной энергии ускорителя существенно возрастают требования на стабильность тока пучка.

Экспериментальная проверка соотношения (2) осуществлялась с помощью секции протонного ЛУ на обратной волне, разработанной и созданной в Институте химической кинетики и горения СО РАН. Секция изготовлена на базе УС встречно-штыревого типа. Период ее возрастает примерно от 2 до 3 мм. Апертура

Наименование параметра	Проектные параметры секции	
	протонного ускорителя	электронной модели
Энергия инжекции	385 кэВ	210 эВ
Выходная энергия	1.9 МэВ	1035 эВ
Ускоренный ток	64 мА	35 мкА
Входная ВЧ мощность	180 кВт	54 мВт
Выходная ВЧ мощность	30 кВт	9 мВт
Фокусирующее поле	8.5 Тл	46 Гс
Средняя фазовая скорость	$1.38 \cdot 10^7$ м/с	$1.38 \cdot 10^7$ м/с
Средняя групповая скорость	$1.54 \cdot 10^7$ м/с	$1.54 \cdot 10^7$ м/с

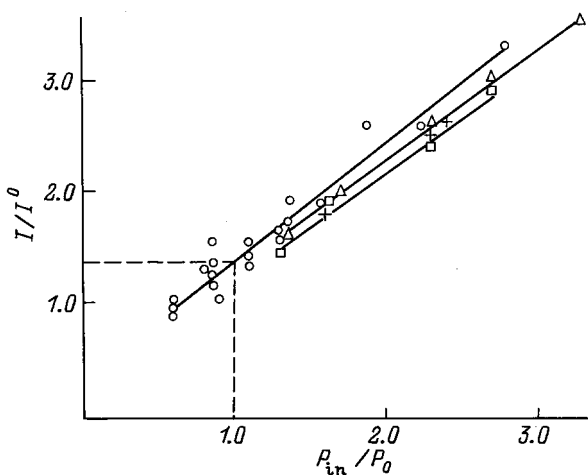


**Рис. 1.** Оциллограмма автоколебаний тока ускоренного пучка.

ускоряющего канала составляет  $\sim 3$  мм. Рабочая частота равна 1818 МГц. Полная длина УС составляет 1.25 м, на которой относительное затухание изменяется от инжекционного конца к выходному от  $0.56$  к  $0.21 \text{ м}^{-1}$  соответственно. Некоторые из проектных параметров секции приведены в таблице.

Данная секция исследована при помощи импульсного пучка методом электронного моделирования [5]. Проектные параметры электронной модели приведены в таблице. Величина фокусирующего магнитного поля в модели устанавливалась  $\sim$  в 4 раза большей проектного с тем, чтобы преодолеть поперечное отклонение электронов в магнитном поле Земли и обеспечить хорошее их токопрохождение сквозь апертуру УС. Измерение выходного тока осуществлялось при помощи вторично-электронного умножителя (ВЭУ) [6]. При этом на охранное кольцо ВЭУ подавался запирающий потенциал  $\sim 1000$  В.

При токах инжекции значительно выше проектных в секции устанавливаются автоколебания пучка (рис. 1). Период этих автоколебаний составляет  $\sim 160$  нс. Оценка периода по формуле (1) дает величину  $T \sim 170$  нс,



**Рис. 2.** Зависимость тока ускоренного пучка от величины входной ВЧ мощности при различных значениях напряжения инжекции.  $U_{inj}/U^0$ :  $\circ$  — 1.05,  $\triangle$  — 1.1,  $\square$  — 1.15,  $+$  — 1.2;  $P_0$  и  $U^0$  — проектные значения входной ВЧ мощности и напряжения инжекции соответственно,  $P_m$  — входная ВЧ мощность.

что незначительно отличается от наблюдаемой экспериментально. Для определения критических токов пучка, при которых устанавливаются автоколебания в секции, проведена серия измерений этих токов при различных значениях входной ВЧ мощности и энергии инжекции. Результаты измерений представлены в виде зависимостей на рис. 2. Видно, что при значениях ВЧ мощности, близких к проектным, величина критического тока составляет  $47 \pm 6$  мкА, что больше его проектного значения на  $34 \pm 15\%$ . Оценка критического тока пучка, выполненная по формуле (2), дает  $I/I^0 = 1.46$ , что близко к величинам токов, полученных экспериментально. Из вышеизложенного и из результатов, опубликованных в [1,2], следует, что автоколебания возникают тогда, когда величина тока пучка превысит некоторую критическую границу, характерную для каждой из исследованных УС.

Таким образом, в заключение работы можно сделать следующие выводы.

1. Автоколебания пучка в секции ЛУ на обратной волне можно характеризовать как закономерное явление для метода ускорения заряженных частиц на обратной волне при токах пучка выше критических.
2. Упрощенное математическое выражение (2) хорошо согласуется с имеющимся экспериментальным материалом и может быть использовано для оценки величин критических токов пучка.
3. Результаты, полученные при исследовании автоколебаний в секции с  $\Delta W = 500$  кэВ [1,2], и результаты настоящей работы позволяют утверждать, что требования на стабильность тока пучка возрастают по мере роста выходной энергии односекционного ЛУ на обратной волне.

### Список литературы

- [1] Козлюк В.В. // ВАНТ. Сер. Ядерно-физические исследования. 1989. № 6/6. С. 67–70.
- [2] Козлюк В.В. Письма в ЖТФ. 1991. Т. 17. Вып. 1. С. 75–79.
- [3] Киртичников Г.А., Тарасовский А.Н. Препринт ИХКиГ СО АН СССР. № 26. Новосибирск, 1989. 26 с.
- [4] Богомолов А.С. // ДАН СССР. 1973. Т. 208. № 6. С. 1328–1329.
- [5] Козлюк В.В. // Автореф. канд. дис. М., 1992. 15 с.
- [6] Борисенко А.Н., Козлюк В.В., Перов В.В. // ПТЭ. 1988. № 2. С. 133–135.