

## ВОЗБУЖДЕНИЕ УЕДИНЕННЫХ ВОЛН В СИСТЕМЕ ПУЧОК-ПЛАЗМА

В. Д. Федорченко, Ю. П. Мазалов, А. С. Бакай,  
А. В. Пашенко, Б. Н. Руткевич

В плазменно-пучковой системе, путем модуляции пучка, усиления и трансформации начального спектра, формируются уединенные волны объемного заряда.

В ограниченной плазме, как показано в [1, 2], существуют уединенные волны объемного заряда. Возбуждение таких волн путем подачи ступенчатого импульса потенциала на сетку, расположенную в плазме, исследовалось в [2, 3]. В настоящей работе исследуется возможность генерации солитонов в пучково-плазменной системе при периодических начальных возмущениях, которые усиливаются пучком и затем в результате нелинейных волновых взаимодействий формируются в последовательность импульсов потенциала. Если расстояние между ними существенно превосходит ширину импульса, то они по существу, представляют собой цуг солитонов.

Спектр периодического цуга состоит из сравнимых по интенсивности дискретных линий, заполняющих интервал частот от  $\omega_0 \approx 2\pi\nu/L$  до  $\omega_N \approx (L/\Delta)\omega_0$ , где  $L$  и  $\Delta$  – расстояние между импульсами и их ширина и  $\nu$  – скорость распространения. Чтобы на начальной стадии, когда основную роль играет усиление пучком начального возмущения, форма спектра была ближе к спектру цуга солитонов  $\alpha_n^{(s)} = \alpha^{(s)}(\omega_n)$ , необходимо, чтобы спектр начального возмущения содержал дискретный набор гармоник, амплитуды которых оцениваются соотношением  $\alpha_n^{(0)} \approx \alpha_n^{(s)} \exp(-\gamma_n \tau_b)$ , где  $\gamma_n$  – инкремент  $n$ -й гармоники,  $\tau_b$  – характерное время развития пучковой неустойчивости. Поскольку  $\gamma_n = \gamma(\omega_n)$  растет с приближением  $\omega_n$  к ленгмюровской частоте  $\omega_p$ , а затем резко спадает до нуля, начальные амплитуды должны убывать с ростом  $n$ .

Взаимодействие волн становится существенным при больших амплитудах, так как характерное время взаимодействия обратно пропорционально энергии возбуждаемых волн. Этот процесс описывается на основе уравнения Кортевега — де Вриза (КдВ) [2], для которого начальным условием служит результат пучковой неустойчивости. В соответствии с КдВ широкий класс начальных условий приводит к формированию цугов солитонов и осцилляционных хвостов [4].

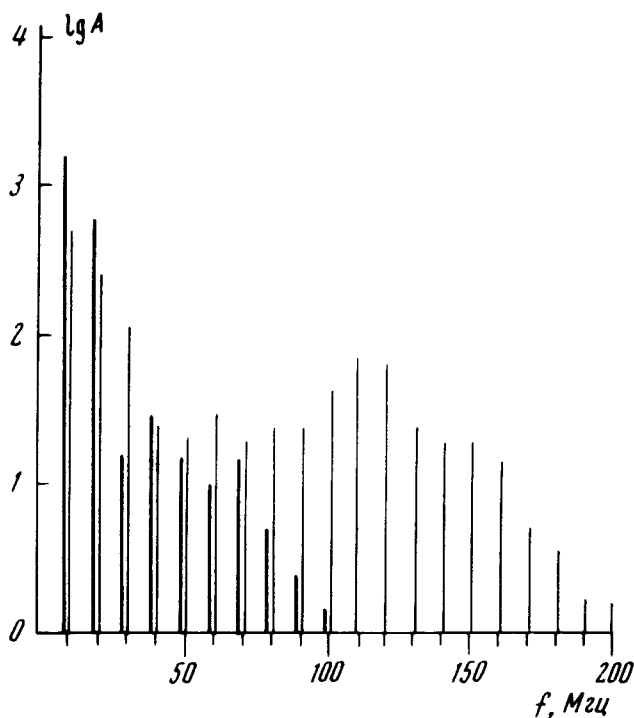


Рис. 1. Спектры колебаний в системе плазма-пучок

Эксперименты проводились с электронным пучком кольцевого сечения, инжектируемым в плазменный цилиндр, ограниченный металлическими стенками. Средняя энергия пучка 200 в, ток 3 ма, магнитное поле 400 э, диаметр пучка 0,5 см, толщина электронного слоя 0,05 см. Для создания богатого гармониками периодического начального возмущения пучок модулируется по скорости. Частота модуляции ускоряющего потенциала равна 10 МГц, амплитуда — 100 в. Первые 50 см электроны проходят в высоком вакууме. На этом участке происходит их группировка и формирование пилообразного волнового профиля. Затем электроны входят в камеру, где давление повышается до  $2 \cdot 10^{-4}$  см. Здесь они движутся в созданной ими же плазме, плотность которой значительно превосходит плотность пучка. Пучковая неустойчивость на моноэнергетическом пучке наблюдается при частотах  $\omega < 200$  МГц, причем максимум инкремента приходится на 120 МГц. На рис. 1 представлены спектры колебаний на расстоянии 15 см от входа в камеру в случае модулированного пучка при различных давлениях. Жирные линии соответствуют давлениям, при которых неустойчивость не развивается, тонкие — режиму усиления. В первом случае спектр соответствует пилообразно-

му волновому профилю. В режиме усиления спектр расширяется до 200  $M\mu$  и формируется пакет волн с максимумом интенсивности вблизи 120  $M\mu$ . Профиль этих колебаний показан на верхней осциллограмме (рис. 2, а).

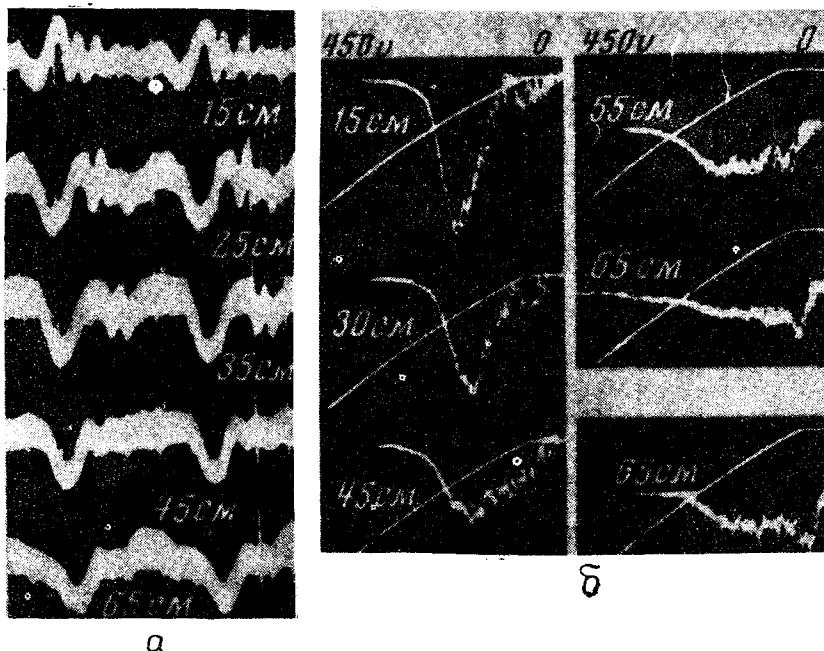


Рис. 2. Эволюция волнового профиля (а) и энергетического распределения электронов (б)

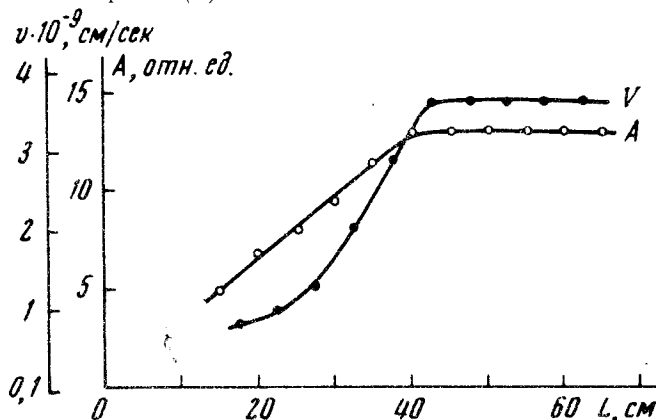


Рис. 3. Зависимость амплитуды и скорости уединенной волны от расстояния

На каждом периоде модуляции пучка ( $10^{-7}$  сек) на фоне осцилляций хорошо виден отрицательный импульс. По мере распространения осцилляции исчезают, а узкий пакет формируется в солитонообразную волну. Исчезновение осцилляций обусловлено процессами взаимодействия гармоник и перераспределения энергии по спектру, приводящими к формированию солитонов. Что касается эволюции функции распределения по энергиям  $f(E)$ , представленной на рис. 2, б, то видно, что пучок быстро размывается в сторону малых энергий, а к концу системы в распределении появляется хвост ускоренных частиц. Для сравнения на последнем рисунке представлены  $f(E)$  при развитии обычной пучковой неустойчивости без модуляции пучка, при этом высокоэнергетичный хвост отсутствует.

По мере формирования солитона меняется его амплитуда и скорость (рис. 3). Видно, что скорость растет с ростом амплитуды, что согласуется с известным решением КдВ уравнения. На некоторой длине (40 см) скорость и амплитуда возрастают и затем остаются постоянными. Максимальная скорость уединенной волны в четыре – пять раз превышает начальную скорость пучка.

Приведенные результаты показывают, что в системе пучок – плазма существует механизм возбуждения ленгмюровских уединенных волн, в котором основную роль играет пучково-плазменная неустойчивость.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
30 июля 1973 г.

## Литература

- [ 1 ] Б.Н.Руткевич, А.В.Пашенко, В.Д.Федорченко, В.И.Муратов. ЖТФ, 13, 493, 1972.
  - [ 2 ] H. Ikezi, P. J. Barrett, R. W. White, A. I. Wong. Phys. Fluids, 14, 1997, 1971.
  - [ 3 ] С.М.Криворучко, Я.Б.Файнберг, В.Д.Шапиро, В.И.Шевченко. Письма в ЖЭТФ, 17, 344, 1973.
  - [ 4 ] G. S. Gardner, J. M. Green, M. D. Kruskal, R. M. Miura. Phys. Rev. Lett., 19, 1095, 1967.
-