

УДК 533.951

## ВЛИЯНИЕ ВНЕШНЕГО ИСТОЧНИКА ИОНИЗАЦИИ НА ЛЕНГМЮРОВСКИЕ КОЛЕБАНИЯ

А. Р. Каримов<sup>1</sup>, А. С. Плешанов<sup>2</sup>, В. А. Щеглов

*Рассматривается влияние внешних источников ионизации на характеристики ленгмюровских колебаний в частично ионизованной плазме. Показано, что при наличии постоянных источников ионизации нелинейные ленгмюровские колебания имеют негармонический характер и описываются уравнением Эйри.*

В частично ионизованной плазме могут существовать колебания, отличные от колебаний полностью ионизованной плазмы, что связано с изменением числа заряженных частиц в кинетических процессах и дополнительным затуханием в столкновениях с нейтральными частицами [1 – 3]. При этом характерные частоты кинетических и плазменных процессов могут иметь разный порядок. Данное обстоятельство позволяет рассматривать независимо ионизационные и плазменные колебания в частично ионизованной плазме, используя предположение о квазиравновесии наиболее быстрых процессов [1]. Такой подход позволяет просто проследить грубые закономерности динамики частично ионизованной плазмы. Однако более тонкие нелинейные эффекты, связанные с совместным проявлением кинетических и плазменных явлений, остаются не рассмотренными. Например, очевидно, что рост плотности плазмы при ионизации будет сопровождаться увеличением частоты ленгмюровских колебаний, но при независимом рассмотрении кинетических и плазменных процессов нельзя сказать, будет ли при этом меняться форма колебаний.

Целью настоящей работы является обсуждение в рамках гидродинамического описания влияния ионизации на параметры ленгмюровских колебаний квазинейтральной

<sup>1</sup>Институт высоких температур РАН.

<sup>2</sup>Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского.

частично ионизованной плазмы. Рассмотрим наиболее простой случай, когда скорость ионизации постоянна. Такая ситуация возможна при ионизации среды внешними источниками, например, пучком частиц или лазерным излучением. Данную задачу будем рассматривать в плоской одномерной постановке. Ионы и нейтральные частицы остаются неподвижными для времен, соизмеримых с периодом электронных колебаний. Кроме того, считая среду достаточно разреженной, будем пренебрегать градиентом давления электронов, их трением о нейтральные частицы и ионы.

Тогда электростатические электронные колебания плазмы с постоянной скоростью ионизации  $w_0$  описываются уравнениями

$$\frac{dn_e}{dt} = w_0, \quad (1)$$

$$\frac{\partial n_i}{\partial t} = w_0, \quad (2)$$

$$\frac{dv_e}{dt} = -\frac{e}{m_e} E, \quad (3)$$

$$\frac{\partial E}{\partial x} = 4\pi e(n_i - n_e), \quad (4)$$

где  $n_e$  и  $n_i$  – плотность электронов и ионов,  $v_e$  – скорость электронов,  $E$  – напряженность электрического поля. Здесь принято обозначение  $d/dt = \partial/\partial t + v_e \partial/\partial x$ .

В начальный момент времени (до включения источника ионизации) плотности ионов и электронов есть

$$n_i = n_e = n_0. \quad (5)$$

Перейдем в (1) – (4) от плотностей к полному числу матриц:

$$N(x, t) = \int_0^x n(\zeta, t) d\zeta. \quad (6)$$

Тогда, интегрируя (1) – (4) от 0 до  $x$  с учетом (5), получим

$$\frac{\partial N_e}{\partial t} + v_e \frac{\partial N_e}{\partial x} = W_0, \quad (7)$$

$$\frac{dv_e}{dt} = -\frac{4\pi e^2}{m_e} (N_i - N_e), \quad (8)$$

$$N_i = N_0 + W_0 t, \quad (9)$$

где

$$W_0 = \int_0^x w_0 d\zeta, \quad N_0 = xn_0. \quad (12)$$

Применим к уравнению (8) операцию  $d/dt$ . Учитывая соотношение

$$\frac{d}{dt}(N_i - N_e) = v_e \frac{\partial N_i}{\partial x} = n_i v_e,$$

получим

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{dv_e}{dt} \right) + \frac{4\pi e^2}{m_e} n_i v_e = 0. \quad (10)$$

В уравнении (10) перейдем от переменных Эйлера к переменным Лагранжа

$$\tau = t, \quad \xi = x - \int_0^t u_e(\xi, t') dt'. \quad (11)$$

Здесь  $x(\xi, \tau)$  удовлетворяет начальному условию

$$x(\xi, 0) = \xi.$$

При этом (10) примет вид обыкновенного дифференциального уравнения

$$\frac{\partial^2 v_e}{\partial \tau^2} + \frac{4\pi e^2}{m_e} n_i v_e = 0. \quad (12)$$

По форме (12) совпадает с обычным нелинейным уравнением ленгмюровских колебаний [4]. Именно такие гармонические по времени колебания реализуются в равновесии, когда плотность плазмы не меняется, а частота колебаний определяется равновесной плотностью электронов  $n_0$ . Однако в период достижения равновесной плотности плазмы колебания имеют совершенно иной характер. Действительно, в рассматриваемом случае постоянной скорости ионизации плотность ионов изменяется по закону  $n_i = n_0 + w_0 t$ , и (12) приобретает вид

$$\frac{\partial^2 v_e}{\partial \tau^2} + \omega_{p0}^2 (1 + \tau/\tau_0) v_e = 0, \quad (13)$$

где  $\tau_0 = n_0/w_0$  и  $\omega_{p0} = \sqrt{4\pi e^2 n_0/m_e}$ . Решение (13) выражается в функциях Эйри

$$v_e = A_1(\zeta) Ai(\eta) + A_2(\zeta) Bi(\eta), \quad (14)$$

где  $A_1$  и  $A_2$  — константы, определяемые начальными условиями, а

$$\eta = -(\omega_{p0}\tau_0)^{2/3}\left(1 + \frac{\tau}{\tau_0}\right). \quad (15)$$

Таким образом, до наступления равновесия в плазменно-пучковой системе электронные колебания являются негармоническими. Особенно сильно негармоничность будет проявляться на начальном этапе до тех пор, пока  $|\eta| \leq 5$ . Для достаточно разреженных сред или малых  $\omega_0$  такие колебания будут существовать в течение достаточно длительного периода.

С ростом  $\eta$ , как следует из (13), влияние ионизации будет проявляться в увеличении частоты осцилляций. Аналогом ленгмюровской частоты, качественно характеризующей процесс колебаний, является величина

$$\omega_{ai} = \omega_{p0}\left(1 + \frac{\tau}{\tau_0}\right). \quad (16)$$

Частота  $\omega_{ai}$  растет вплоть до равновесного значения  $\omega_{pe}$ . Затем колебательный процесс переходит в обычные ленгмюровские колебания. Рост  $\omega_{ai}$  сопровождается уменьшением амплитуды колебаний. Асимптотическое поведение функции Эйри при больших значениях аргумента описывается зависимостью  $Ai(\eta) \sim \eta^{-1/4}$  [5], что указывает на достаточно медленное затухание начальных возмущений.

В работе проведена оценка влияния ионизации на ленгмюровские колебания. Был рассмотрен наиболее простой случай постоянной скорости ионизации, что соответствует внешнему источнику ионизации. Представляет несомненный интерес исследование случая тепловой ионизации, когда скорость ионизации зависит от характеристик среды.

#### ЛИТЕРАТУРА

- [1] Ахизер А. И., Ахизер И. А., Половин Р. В. и др. Электродинамика плазмы. М., Наука, 1974.
- [2] Недоспасов А. В. УФН, **94**, 439 (1968).
- [3] Давыдов Б. И. ЖЭТФ, **6**, 463 (1936).
- [4] Kalman G. Ann. Phys., **10**, 1 (1960).

[5] Абрамовиц М., Стиган И. Справочник по специальным функциям. М., Наука, 1979.

Поступила в редакцию 21 сентября 1998 г.