

- ров / М.К. Самохвалов, С.М. Максимов // Автоматизация процессов управления. – Ульяновск.: НПО "Марс". – 2(36). – 2014. – С. 98-105.
8. Максимова, О.В. Разработка средств автоматизации конструирования тонкопленочных электролюминесцентных индикаторов / О.В. Максимова, Д.А. Евсевичев, М.К. Самохвалов, С.М. Максимов // Актуальные проблемы электронного приборостроения АПЭП-2014: Материалы 11 международной научно-технической конференции, г. Саратов, 25-26 сентября, 2014 г. – Саратов: ООО «Буква», – С. 66-71.

УДК 533.9 (075.8)

Б.М. Маркеев

Московский государственный областной университет

КВАЗИЛИНЕЙНАЯ ТЕОРИЯ СТОЛКНОВИТЕЛЬНОЙ ПЛАЗМЫ В СЛАБОМ СВЧ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

Аннотация. В работе, используя усреднение по хаотическим фазам, обосновано квазилинейное кинетическое уравнение для неустойчивой, слабоионизованной, неизотермической плазмы, помещенной в СВЧ электрическое поле. Столкновения учитываются посредством интеграла столкновений Больцмана.

Ключевые слова: квазилинейное кинетическое уравнение, интеграл столкновений Больцмана, СВЧ электрическое поле.

B. Markeev

Moscow State Regional University

QUASILINEAR THEORY OF COLLISIONAL PLASMA IN A WEAK MICROWAVE ELECTRIC FIELD

Abstract. In this paper, using the average over the random phases justified quasi-linear kinetic equation for unstable and weakly ionized, non-isothermal plasma placed in a microwave electric field. Collisions accounted for by the Boltzmann collision integral.

Keywords: quasi-linear kinetic equation of the Boltzmann collision integral, microwave electric field.

Рассмотрим пространственно изотропную плазму, помещенную в однородное электрическое поле $\vec{E}(t) = E_0 \sin \omega_0 t$. Поле считается слабым, так скорость осцилляции электронов мала по сравнению с их тепловой

скоростью, частота ω_0 близка к электронной ленгмюровской частоте ω_{Le} и значительно превосходит частоты столкновений заряженных частиц. Пусть в начальный момент плазма была слабоионизованной, неизотермической, а величина внешнего электрического поля превосходила пороговое значение [1]. Ограничиваясь рамками квазилинейного приближения [2], рассмотрим динамику развития столкновительной ионно-звуковой диссипативной неустойчивости и ее влияния на состояние плазмы.

Состояние слаботурбулентной плазмы можно рассматривать на основе кинетического уравнения Больцмана, в котором члены порядка малости по амплитуде возмущения.

$$\{\hat{L}_e f_e + \frac{e_e}{m_e} \delta \vec{E} \frac{\partial \delta f_e}{\partial \vec{v}} - \hat{S}_{en} f_e\} + \{\hat{L}_e \delta f_e + \frac{e_e}{m_e} \delta \vec{E} \frac{\partial f_e}{\partial \vec{v}} - \hat{S}_{en} \delta f_e\} = 0. \quad (1)$$

Здесь \hat{S}_{en} – оператор столкновений электронов с нейтралами, который можно представить в виде:

$$\hat{S}_{en} f_e = - \int d \vec{v}_n d \Omega w \sigma(w, \nu) \{f_e f_n - f'_e f'_n\},$$

где $w = |v_e - v_n|$ – относительная скорость, $\sigma(w, \nu)$ – дифференциальное сечение рассеяния, ν – угол рассеяния, и, наконец,

$$\hat{L}_e = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{v} \frac{\partial}{\partial \vec{z}} + \frac{e_e}{m_e} \vec{E}_0 \sin \omega_0 t \frac{\partial}{\partial \vec{v}}$$

- полная производная вдоль траектории частиц. Остальные обозначения общеприняты.

Решая (1) в линейном приближении и используя уравнение Пуассона, получаем дисперсионное соотношение низкочастотных колебаний плазмы во внешнем СВЧ поле,

$$\sum_s \Phi_k^{(s)} I_{s-n} + \frac{\delta \epsilon_i^{(0)}}{1 + \delta \epsilon_e^{(n)}} \Phi_k^{(0)} I_{-n} = 0 \quad (2)$$

с помощью которого получим возмущение функции распределения электронов

$$\delta f_e = \sum_{\vec{k}, n} \frac{e_e}{m_e} \Phi_k^{(0)} I_{-n} \frac{\delta \epsilon_i^{(0)} \exp\{i \vec{k} \vec{z}_0 - i(n \omega_0 + \omega_k) t\}}{(1 + \delta \epsilon_e^{(n)}(k))(n \omega_0 + \omega_k - \vec{k} \vec{v}_0)} * \\ * \left\{ 1 + i \text{Re} \mathcal{S} \frac{1}{n \omega_0 + \omega_k - \vec{k} \vec{v}_0} \right\} \vec{k} \frac{\partial f_e}{\partial \vec{v}_0} \quad (3)$$

Здесь $I_m(a)$ – функция Бесселя от аргумента $a = \vec{k}\vec{z}_E = \frac{\vec{k}\vec{v}_E}{\omega_0}$; $\vec{v}_0 = \vec{v} - \vec{v}_E \cos \omega_0 t$; $\vec{z}_0 = \vec{z} - \vec{z}_E \sin \omega_0 t$; $\omega_k = \omega'_k - i\gamma_k$, ω'_k и γ_k – частота и инкремент неустойчивых колебаний, $\Phi_k^{(m)}$ – представляет собой член разложения неравновесного потенциала в ряд:

$$\Phi = \sum_m \Phi_k^{(m)} \exp\{i[\vec{k}\vec{z} - (m\omega_0 + \omega_k)t]\},$$

а $\delta\varepsilon_a^{(n)}(\omega, k) = \delta\varepsilon_a^{(n)}(\omega_k + n\omega_a k)$ – парциальная диэлектрическая проницаемость частиц сорта $a = e, i$.

Представим электронную функцию распределения в виде:

$$f_{e(v_0, t)} = \sum_n f_e^{(n)}(v_0, t) \exp\{-in\omega_0 t\}, \quad (4)$$

где характерное время изменения функции $f_e^{(n)}(v_0, t)$ значительно больше обратного инкремента нарастания неустойчивости. Ввиду того, что в начальный момент в разложении (4) отсутствовали ненулевые гармоники, их можно считать малыми в течение достаточно длительного промежутка времени. Учитывая это обстоятельство, после подстановки (3) в (1) и усреднения кинетического уравнения, получим квазилинейное уравнение для n -ой гармоники (по частоте внешнего поля) электронной функции распределения

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} f_e^{(n)}(v_0, t) e^{-in\omega_0 t} = & -i \left(\frac{e_e}{m_e}\right)^2 \frac{\partial}{\partial v_{0i}} \sum_s \int d\vec{k} * \\ & * \frac{|\delta\varepsilon_i^{(0)}|^2 k_i k_j \exp\{-in\omega_0 t\} |\Phi_k^{(0)}(t)|^2 I_{n-s}(a) I_s(a)}{\left(1 + \delta\varepsilon_e^{(n-s)}(\omega_{-k}, -k)\right) \left(1 + \delta\varepsilon_e^{(s)}(\omega_k, k)\right)} * \\ & * \left\{ 1 + i \operatorname{Re} \hat{S} \frac{1}{S\omega_0 + \omega_k - kv_0} \right\} \frac{\partial}{\partial v_{0j}} f_e^{(0)} + \hat{S}_{en} f_e^{(n)} \exp\{-in\omega_0 t\} \quad (5) \end{aligned}$$

Уравнение (5) учитывает обратное воздействие неустойчивых низкочастотных колебаний на электронную функцию распределения. При его выводе существенно использовалось соотношение (2). Квазилинейное уравнение (5) обобщает соответствующее уравнение работы для плазмы, помещенной в сильное СВЧ поле, на случай слабых полей и учитывает столкновения частиц в слабоионизованной плазме.

Заметим, что квазилинейное уравнение для функции распределения ионов совпадает с соответствующим уравнением для плазмы в отсутствие СВЧ поля, т.к. взаимодействием последнего с ионной компонентной пренебрегается. Более того, для исследования квазилинейного процесса развития неустойчивых ионно-звуковых колебаний в использовании уравнения для ионов нет необходимости.

В квазилинейном приближении (5) дополняется уравнением теории для неравновесного потенциала

$$\frac{\partial}{\partial t} |\Phi_k^{(0)}|^2 = -2\gamma_k |\Phi_k^{(0)}|^2. \quad (6)$$

Уравнения (5), (6) образуют полную систему, решение которой представляет значительные трудности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Маркеев Б.М. Спектры колебаний слабоионизованной столкновительной плазмы. Вестник МГОУ. Сер. «Физика-Математика», 2013. №3, с. 78-81
2. Франк-Каменецкий Д.А. Лекции по физике плазмы.- Издательский Дом «Интеллект», 2008.- 280 с.

УДК 669.0176: 621.74

Ю.А. Балакин¹, С.Л. Захаров², Х.Б. Юнусов³

¹ФГБОУ, Московский государственный университет технологий и управления (МГУТУ) им. К.Г. Разумовского

²РХТУ им. Д.И. Менделеева.

³Московский государственный областной университет.

РАЗРАБОТКА НОВОЙ ТЕОРИИ ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ НА ПРОЦЕССЫ В КОНДЕНСИРОВАННЫХ СРЕДАХ

Аннотация: Рассмотрено краткое описание основных положений новой теории внешних воздействий на процессы в конденсированных средах. Основное внимание уделено процессам на границе раздела фаз и сопровождающихся фазовыми переходами в металлах и сплавах. Разработаны новые методы, учитывающие внешние воздействия на эти процессы в жидких и затвердевающих средах. Методом неравновесной термодинамики исследованы малоизученные процессы релаксации и диссипации внешней энергии в расплавах. Впервые выявлена взаимосвязь количества внешней энергии, необходимого для устойчивой кристаллизации единицы объема расплава и структурой металла в твердом состоянии.

Ключевые слова: теория, метод, внешнее воздействие, процесс, термодинамика, кристаллизация, металл.