

## МЕТОДИЧЕСКИЕ ЗАМЕТКИ

## К вопросу о роли неквазинейтральности в неустойчивых колебаниях в плазме

Б.Н. Швилкин

*В термодинамически неравновесной плазме с градиентом плотности поперек однородного аксиального магнитного поля неквазинейтральность возмущений является дестабилизирующим плазму фактором при возбуждении не только коротких, но и длинных волн дрейфово-диссипативной неустойчивости. При возбуждении длинных дрейфовых волн неквазинейтральность возмущений может также дестабилизировать плазму одновременно с инерцией ионов. При больших магнитных полях роль неквазинейтральности возмущений оказывается существенной даже при значительных концентрациях заряженных частиц.*

PACS numbers: 52.35.-g

Ранее, начиная с теоретических работ по ионному звуку в токовой плазме, считалось, что в случае длинных по сравнению с дебаевским радиусом волн ( $kr_D \ll 1$ ,  $k$  — волновое число,  $r_D$  — дебаевский радиус) возмущения плотности в неустойчивой плазме квазинейтральны  $n_{1e} = n_{1i}$  и неквазинейтральность можно не учитывать (см., например, [1]). При этом в плазме обнаруживаются ионно-звуковые волны, скорость распространения которых  $v_s = (T_e/m_i)^{1/2}$ ,  $T_e$  — температура электронов,  $m_i$  — масса ионов.

Однако представление о квазинейтральных возмущениях, принятое в теории ионно-звуковой неустойчивости токовой плазмы, нельзя переносить на плазму в магнитном поле.

В термодинамически неравновесной плазме в магнитном поле с градиентом плотности перпендикулярным магнитному полю возбуждается дрейфово-диссипативная неустойчивость. В первоначальной теории А.В. Тимофеева [2] полагалось, что дестабилизирующим такую плазму фактором является инерция ионов, а возмущения плотности считались квазинейтральными. При этом в плазме самопроизвольно возбуждаются дрейфовые и ионно-звуковые колебания.

Позднее А.П. Жилинским в [3] было показано, что инерция ионов не является единственным фактором дестабилизации плазмы. К возбуждению другой ветви дрейфово-диссипативной неустойчивости — к колебаниям разреженной плазмы — может приводить неквазинейтральность возмущений на длинах сравнимых с

масштабом колебаний. При этом в [3] считается, что неквазинейтральность колебаний может достигаться лишь при возбуждении коротких (сравнимых с радиусом Дебая) волн. Попытки подразделить колебания на квазинейтральные и неквазинейтральные в зависимости от величины  $kr_D$  по сравнению с единицей делались и в других более поздних работах (см., например, [4]).

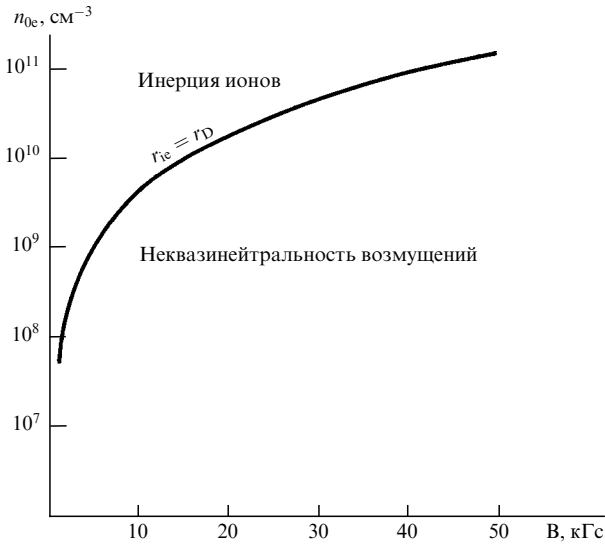
На самом деле неквазинейтральность возмущений может играть существенную роль не только в случае коротких волн ( $\lambda \cong r_D$ ). В [5] показано, что она приводит к самовозбуждению колебаний разреженной плазмы с возникновением длинных по сравнению с дебаевским радиусом волн ( $kr_D \ll 1$ ). При возбуждении длинных дрейфовых волн неквазинейтральность возмущений может также дестабилизировать плазму одновременно с инерцией ионов [6–9]. Степень влияния первого из этих факторов зависит от концентрации плазмы и величины магнитного поля. Действительно, при совместном действии двух дестабилизирующих факторов в простейшем случае в плазме с замагниченными ионами и без учета столкновений ионов с нейтральными атомами дисперсионное уравнение имеет вид [10]

$$\omega - \omega^* = i \frac{\omega^2}{D_e k_z^2} k_y^2 (r_{ie}^2 + r_D^2) - \omega k_y^2 (r_{ie}^2 + r_D^2). \quad (1)$$

Здесь  $\omega$  — частота колебаний,  $\omega^* = k_y c T_e / e B$  — дрейфовая частота,  $B$  — индукция магнитного поля,  $e$  — заряд электрона,  $c$  — скорость света,  $\kappa^{-1}$  — характерный размер неоднородности плазмы,  $k_y = 2\pi/\lambda_y$ ,  $\lambda_y$  — азимутальная длина волны,  $k_z$  — проекция волнового вектора на направление магнитного поля,  $D_e$  — коэффициент диффузии электронов,  $r_{ie} = v_s/\omega_i$  — ионный ларморовский радиус, сосчитанный при электронной температуре,  $\omega_i$  — ионная циклотронная частота. Выражение (1) при  $r_{ie} \gg r_D$  совпадает с дисперсионным уравнением для дрейфовых колебаний, и неквазинейтральность возмущений не влияет на неустойчивые колебания. В обратном

**Б.Н. Швилкин.** Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, физический факультет, 119899, Москва, Ленинские горы  
Тел. (095) 433-81-85. Факс (095) 932-88-20  
E-mail: aleks@crysto.phys.msu.ru

Статья поступила 4 апреля 1994 г.

Граница равенства  $r_{ie} = r_D$ 

пределе при  $r_{ie} \ll r_D$  оно совпадает с дисперсионным уравнением для колебаний разреженной плазмы, и в этом случае, наоборот, возбуждение колебаний определяется отступлением от квазинейтральности в возмущениях. Инкремент колебаний, который легко можно получить из уравнения (1) заменой в нем  $\omega$  на  $\omega + i\gamma$ , в первом случае равен

$$\gamma = \frac{D_e k_z^2}{2k_y^2 r_{ie}^2} \left( \frac{\omega^*}{\omega} - 1 - k_y^2 r_{ie}^2 \right). \quad (2)$$

Во втором случае в выражении (2) величина  $r_{ie}^2$  заменяется на  $r_D^2$ . В случае же, когда  $r_{ie} \cong r_D$ , в (2) вместо  $r_{ie}^2$  появляется величина  $(r_{ie}^2 + r_D^2)$ . Следовательно, вопрос о том, нужно или не нужно учитывать неквaziнейтральность в возмущениях, зависит в данном случае не от произведения  $kr_D$ , а от отношения  $r_{ie}/r_D$ . При длинных волнах ( $kr_D \ll 1$ ) дрейфово-диссипативной природы возбуждения не учитывать неквaziнейтральность возмущений можно лишь в случае, когда  $r_{ie} \gg r_D$ . Учет того или другого из двух дестабилизирующих плазму факторов — инерции ионов или неквaziнейтральности возмущений — зависит от соотношения между стационарной концентрацией электронов  $n_{0e}$  и величиной магнитного поля  $B$ . Равенство  $r_{ie} = r_D$  достигается при условии

$$n_{0e} = \frac{B^2}{4\pi c^2 m_i}. \quad (3)$$

На рисунке сплошная кривая соответствует равенству (3). Из рисунка видно, что равенство  $r_{ie} = r_D$  с ростом магнитного поля достигается при все больших концентрациях  $n_{0e}$ . Так, в водородной плазме при  $B = 1$  кГс равенство (3) обнаруживается при  $n_{0e} = 5,3 \cdot 10^7$  см<sup>-3</sup>. При магнитном же поле  $B = 50$  кГс соответствующее значение концентрации  $n_{0e} = 1,3 \cdot 10^{11}$  см<sup>-3</sup>. Приведенные в последнем примере значения магнитного поля и концентрации электронов достигаются в пристеночной плазме устройств, предназначенных для получения управляемого термоядерного синтеза. На самом же деле дестабилизирующий плазму фактор неквaziнейтральности возмущений в развитии неустойчивых колебаний дрейфово-диссипативного механизма возбуждения может оказаться существенным и при несколько больших концентрациях электронов, чем это определяется выражением (3).

Заметим, что наличие значительной неквaziнейтральности в длинноволновых возмущениях в неустойчивой плазме в магнитном поле подтверждается экспериментально [6].

Таким образом, при описании длинноволновых дрейфовых колебаний ( $kr_D \ll 1$ ) в плазме в магнитном поле в условиях, когда ионный ларморовский радиус, сосчитанный при электронной температуре, сравним с дебаевским радиусом, к дестабилизации плазмы ведет не только действие эффекта инерции ионов, но и неквaziнейтральность возмущений.

## Список литературы

1. Шафранов В Д В кн. Вопросы теории плазмы (Под ред. Леонтовича М А) (М.: Атомиздат, 1964) т. 3, с. 3; Shafranov V D In *Reviews of Plasma Physics* (Ed. Leontovich M A) (New York: Consultants Bureau, 1967) Vol. 3
2. Тимофеев А В *ЖТФ* **33** (8) 909 (1963)
3. Жилинский А П *ЖТФ* **42** (5) 925 (1972)
4. Александров А Ф, Богданкевич Л С, Рухадзе А А *Основы электродинамики плазмы* (М.: Высшая школа, 1987)
5. Бондаренко В Е, Иванова О П, Швилкин Б Н *Физ. плазмы* **13** (1) 66 (1987)
6. Бондаренко В Е, Швилкин Б Н *Физ. плазмы* **13** (7) 876 (1987)
7. Ellis R F, Marden-Marshall E, Majeski R *Plasma Phys.* **22** (2) 113 (1980)
8. Frank P, Himmel G, Schlüter H *Plasma Phys. and Controlled Fusion* **34** (7) 1201 (1992)
9. Praburam G, Sugawa M *Phys. Soc. Japan* **61** (12) 4449 (1992)
10. Швилкин Б Н *Неустойчивости газоразрядной плазмы низкого давления*. Докторская диссертация (М.: Российский Научный центр "Курчатовский институт", 1993)

## CONCERNING THE ROLE OF NONQUASINEUTRALITY IN PLASMA INSTABILITIES

B.N. Shvilkin

M.V. Lomonosov State University, Physics Department,

Leninskiye Gory, 119899, Moscow, Russia

Tel. (095) 939-2908, Факс (095) 932-8820, E-mail: aleks@crysto.phys.msu.su

In nonequilibrium plasma with the density gradient across a homogeneous axial magnetic field the nonquasineutrality in perturbations is the factor destabilizing the plasma at excitation of both short and long waves of drift-dissipative instability. At the excitation of long drift waves the nonquasineutrality in perturbations can also destabilize plasma when combined with ion inertia. In strong magnetic fields the role of nonquasineutrality in perturbations turns out to be essential even at high densities of charged particles.

Bibliography — 10 references

Received 4 April 1994