

К КИНЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ ДВИЖЕНИЯ ГРАНИЦЫ ПЛАЗМЫ,
УДЕРЖИВАЕМОЙ СИЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНОЙ

Л. М. Горбунов, О. М. Градов, Д. Зюндер,
Р. Р. Рамазашвили

УДК 533.9

Рассмотрены условия равновесия и равномерного движения границы плазмы под влиянием давления высокочастотной электромагнитной волны. Выявлены соотношения между величинами напряженности электрического поля волны, скорости движения границы и плотности плазмы.

Вопрос о равновесии плазмы в высокочастотном электромагнитном поле обсуждался в ряде работ применительно к проблеме удержания и ускорения плазмы [1-5]. В последнее время этот вопрос стал снова привлекать к себе внимание в связи с исследованиями лазерной плазмы. В настоящей заметке мы обсудим условия равновесия и равномерного движения границы плазмы под влиянием давления поля волны.

1. Уравнение для напряженности высокочастотного электрического поля $E(x)$ с частотой ω в плазме имеет вид [1]:

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \left[1 - 2 \frac{4\pi e^2}{m_e \omega^2} \int_0^{\sqrt{w_0^2 - w^2}} dv f_e(\sqrt{v^2 + w_0^2(x)}) \right] E = 0, \quad (I)$$

где f_e — функция распределения электронов по скоростям, $w_0^2(x) = \beta e^2 E^2(x) / 2m_e \omega^2$, а β — величина, зависящая от функции распределения ионов и связанная с условием квазинейтральности плазмы. При написании уравнения (I) было предположено, что

максимальная скорость электронов в плазме равна максимальному значению W_0 , обозначенному через W_{m0} .

Если считать, что функции распределения ионов и электронов таковы, что в области больших положительных x , где $W_0(x) \rightarrow 0$, они переходят в функции распределения Максвелла, обрезанные при больших скоростях частиц, то β будет выражаться через температуры частиц ($\beta = (1 + T_i/zT_e)^{-1}$). Первый интеграл уравнения (1) при этом принимает вид:

$$\left(\frac{dW}{d\xi}\right)^2 = W_m^2 - W^2(\xi) - 4Q \int_0^W dp p \sqrt{p^2 - W^2(\xi)} e^{-p^2/2}, \quad (2)$$

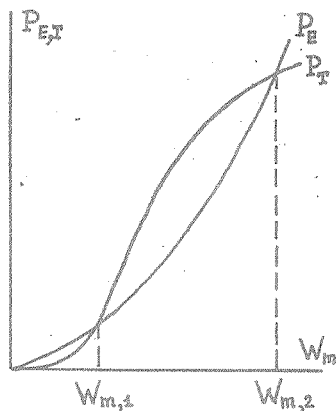
где $\xi = \omega x/c$, $W(\xi) = W_0/v_{Te}$, $W_m = W_{m0}/v_{Te}$, $Q = 4\pi e^2 n_0/m_e \omega^2 \sqrt{2\pi}$, $v_{Te} = \sqrt{T_e/m_e}$, а n_0 - нормировочный множитель в функции распределения, связанный с концентрацией частиц с нулевыми скоростями.

Условие существования стационарного состояния получим, потребовав, чтобы в плазме при $\xi \rightarrow \infty$ исчезли высокочастотные поля ($W(\xi)$, $dW/d\xi \rightarrow 0$ при $\xi \rightarrow \infty$). Это условие определит связь между величинами W_m и Q :

$$P_E \equiv W_m^2 = 4Q \int_0^{W_m} dp p^2 e^{-p^2/2} \equiv P_T. \quad (3)$$

Это соотношение выражает равенство давления высокочастотного поля P_E и давления частиц плазмы P_T . Поскольку при малых W_m функция $P_T(W_m) \propto W_m^2$, а при больших W_m она стремится к постоянному пределу, то уравнение (3) может быть удовлетворено при двух значениях W_m .

На рис. 1 приведены графики функций $P_E(W_m)$ и $P_T(W_m)$, показывающие, что равенство давлений действительно имеет место при двух разных значениях амплитуды высокочастотного поля (см. также /6/). Следует подчеркнуть, что хотя оба решения уравнения (3) соответствуют одному и тому же значению n_0 , плотность частиц на бесконечности для разных решений различна. Отметим, что в работе /1/ обсуждалось решение, соответствующее большому значению плотности.



Р и с. 1. Зависимость давления электромагнитного поля P_E и давления частиц P_T от амплитуды падающей на плазму волны W_m .

2. Из результатов первого раздела следует, что если при заданном значении n_0 амплитуда удерживающей плазму волны не удовлетворяет уравнению (3), граница раздела плазмы и высокочастотного поля не может быть неподвижной. Движение границы приводит к изменению давления плазмы и к установлению нового стационарного (в системе отсчета, движущейся вместе с границей плазмы) состояния. В условиях, когда давление поля много больше теплового давления плазмы, последним можно пренебречь и основную роль будет играть динамическое давление, связанное с движением плазмы как целого. Именно такой предельный случай был изучен в работах [2, 4]. Ясно, что в этом случае детали функций распределения по скоростям частиц не играют роли. Мы ограничимся случаем не столь сильных полей, чем и обусловлена необходимость кинетического рассмотрения движения плазмы.

Пусть индексы + и - соответствуют падающим на границу ($v < 0$) и отраженным ($v > 0$) частицам. Тогда в системе покоя границы функция распределения ионов может быть записана в виде

$$f_i = f_i^+ + f_i^-; f_i^{\pm} = \frac{n_0}{\sqrt{2\pi}v_{Ti}} \exp \left\{ -\frac{1}{2v_{Ti}^2} \left(v \sqrt{1 + \frac{2e_1\phi}{m_1 v^2}} \pm U_1 \right)^2 \right\}, \quad (4)$$

где φ — потенциал разделения зарядов, а U_i — скорость движения границы. На электроны кроме поля φ действует высокочастотный потенциал $U_E = eE^2/2m_e\omega^2$. Поэтому падающие и отраженные электроны будут описываться следующими функциями распределения

$$f_e^\pm = \frac{n_0}{\sqrt{2\pi}v_{Te}} \exp\left[-\frac{1}{2v_{Te}^2} \left(v\sqrt{1 + \frac{2e}{m_e v^2}(\varphi + U_E)} \pm U_e\right)^2\right]. \quad (5)$$

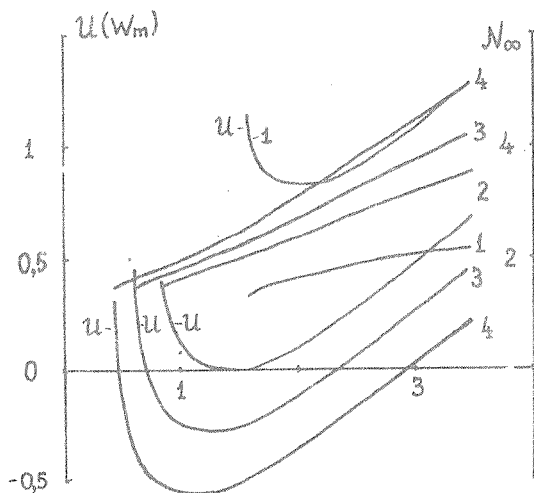
Найдя плотности электронов и ионов по заданным функциям распределения, легко убедиться, что условие квазинейтральности ($n_e = n_i$) будет выполнено, если

$$\varphi = \frac{eT_i}{e_i T_e - eT_i} U_E, \quad U_e = \frac{v_{Te}}{v_{Ti}} U_i. \quad (6)$$

Первое из этих равенств связывает электростатический потенциал с высокочастотным потенциалом таким же образом, как и в случае покоящейся плазмы, а второе равенство устанавливает строго определенное соотношение между параметрами U_e и U_i , характеризующими функции распределения электронов и ионов. Если эти соотношения выполнены, из уравнения поля следует условие равновесия:

$$W_m^2 = 4Q \int_0^W dp p^2 e^{-(p-u)^2/2}, \quad (7)$$

где $u \equiv U_i/v_{Ti}$. На рис. 2 показана зависимость скорости u от амплитуды высокочастотного поля W_m для ряда значений параметра Q . Видно, что величина u отрицательна между двумя равновесными значениями W_m , найденными в первом разделе. Это означает эффективное увеличение давления частиц на границу раздела плазмы с полем по сравнению со случаем покоящейся плазмы. Вне этого интервала значений W_m скорость u положительна и давление частиц меньше, чем при неподвижной границе, в соответствии с работой /2/.



Р и с. 2. Зависимость равновесной скорости границы плазмы u и концентрации электронов N_{∞} от амплитуды падающей на плазму волны W_m для различных значений параметра Q : $Q = 0,5$ (1); $0,94$ (2); $1,25$ (3); $1,75$ (4)

На рис. 2 показана также концентрация электронов на бесконечности, куда электромагнитная волна не проникает

$$N_{\infty} = 2Q \int_0^{W_m} dp e^{-(p-u)^2/2}. \quad (8)$$

Видно, что при всех значениях Q концентрации выше критической.

В заключение выражаем искреннюю признательность В. П. Силину за плодотворную критику при обсуждении результатов данной работы.

Поступила в редакцию
7 декабря 1981 г.

Л и т е р а т у р а

1. Р. Э. Сагдеев, Физика плазмы и проблема УТР, т. III, изд. АН СССР, М., 1958 г., с. 346.
2. А. В. Гуревич, В. П. Силин, Ядерная физика, 2, 250 (1965).
3. H. Motz, C. J. H. Watson, Adv. in Electronics and Electron Phys., 22, 153 (1967).
4. В. И. Домрин, Р. Р. Рамазашвили, Ядерная физика, 5, 312 (1967).
5. R. V. Hall, R. A. Gervin, Phys. Rev., A3, 1151 (1971).
6. Л. М. Горбунов и др., ЖЭТФ, 80, 1383 (1981).