

НАБЛЮДЕНИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ ПЛАЗМЫ В СИЛЬНОМ ПЕРЕМЕННОМ ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ ПОЛЕ

*Л.И.Григорьева, Б.И.Смердов, К.Н.Степанов,
Б.А.Фетисов, В.В.Чечкин*

В работах [1 – 3] теоретически показано, что в плазме при наличии перпендикулярных к внешнему магнитному полю токов, вызванных сильным переменным электрическим полем, возникает неустойчивость, связанная с возбуждением мелкомасштабных высокочастотных колебаний, если электроны и ионы плазмы приобретают достаточно большую относительную скорость u_{\perp} . Обратное воздействие колебаний на пучок вызывает торможение пучка и нагрев либо ионов, либо электронов, либо и тех и других в зависимости от соотношения между u_{\perp} , T_e и T_i [1, 4, 5].

По-видимому, развитием неустойчивостей такого типа объясняется имевший место в ряде экспериментов быстрый нагрев плазмы сильным ВЧ-полем [2, 6, 7], а также аномалии в поглощении ионных циклотронных и быстрых магнитозвуковых волн [6 – 9]. Однако непосредственно эти неустойчивости, играющие фундаментальную роль в ВЧ-турбулентном нагреве плазмы [1, 4, 5], еще не наблюдались.

В настоящем сообщении излагаются предварительные результаты опытов по обнаружению и исследованию токовой неустойчивости в водородной плазме, находящейся в электрическом поле быстрой магнитозвуковой волны большой амплитуды [7] (плотность плазмы $n \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, напряженность постоянного поля $H_0 \sim 500 \text{ э}$, амплитуда напряженности аксиального переменного магнитного поля, создаваемого в плазме ударным контуром на частоте 7 МГц , $H_x \sim 300 - 500 \text{ э}$; при этом напряженность электрического поля на периферии $\sim 300 \text{ в/см}$, что соответствует максимальной скорости дрейфа электронов $u_{\perp \text{мах}} \sim 6 \cdot 10^7 \text{ см/сек}$). Электростатические колебания в плазме регистрировались тремя двойными электрическими зондами под плавающим потенциалом. Каждый зонд состоял из двух вольфрамовых проволочек диаметром $0,3 \text{ мм}$ и длиной 2 мм ; расстояния между проволочками составляли $l = 0,75; 1,5 \text{ и } 4 \text{ мм}$. Радиотехническая схема каждого зонда позволяла регистрировать колебания электрического поля в плазме в диапазоне частот $20 - 120 \text{ МГц}$ при напряженности $E \geq 50 \text{ в/см}$.

При включении контура нагрев распадающейся плазмы после свечения сопровождался интенсивными ($E_r \sim E_\phi \sim 100 - 300$ в/см) шумами с характерными частотами порядка $30 - 80$ МГц. При этом амплитуда шумов определялась величиной низкочастотного электрического поля в месте расположения зонда. Это иллюстрируется рис. 1, где представлены осциллограммы шумов и поля H_z в плазме, измеряемого магнитным зондом. Рис. 1, а относится к случаю, когда зонды расположены на периферии разряда, на радиусе $2,7$ см, где низкочастотное электрическое поле велико и медленно затухает. Осциллограммы на рис. 1, б соответствуют случаю, когда оба зонда помещены вблизи оси, где низкочастотное электрическое поле мало и быстро затухает.

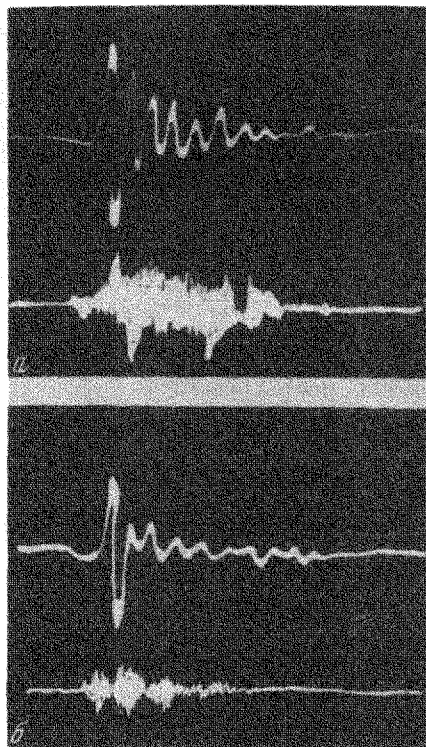


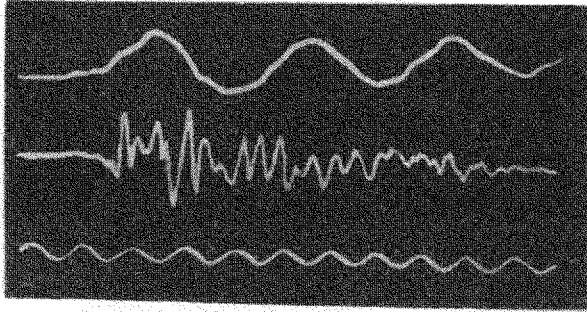
Рис. 1

На рис. 2, б показана типичная осциллограмма шумов в плазме, полученная с помощью зонда с $\ell = 4$ мм, помещенного на расстоянии $2,7$ см от оси. На рис. 2, а и 2, в показаны, соответственно, поле H_z в плазме и калибровочная синусоида 20 МГц. Из рис. 2 следует, что шумы возникают практически одновременно с появлением низкочастотного поля и достигают амплитудного значения за время $\Delta t \sim (2 - 3) \cdot 10^{-8}$ сек.

При уменьшении ℓ характерная частота принимаемых зондом шумов увеличивается. При ориентации зонда вдоль постоянного магнитного

поля амплитуда шумов уменьшается приблизительно в три раза ($E_z \sim \sim 50 - 100$ в/см).

Как показывают оценки, электронная температура плазмы после включения контура должна возрасти до значения ~ 10 эв вследствие джоулева нагрева полем волны за время порядка нескольких наносекунд. При этом происходит отрыв температуры электронов от температуры ионов, которые остаются холодными. В такой плазме при наличии пучка, скорость которого к этому времени достигает значения $u_1 \sim 10^7$ см/сек $\gg \sqrt{T_e/m_e}$, возможно возбуждение либо ионнозвуковых колебаний [1], либо гидродинамических колебаний с частотой и



инкрементом порядка $\omega_k \sim \gamma_k \sim \sqrt{\omega_{He} \omega_{HI}} \sim k u_1$ распространяющихся почти поперек магнитного поля [3]. За время Δt ионнозвуковые колебания с максимальным инкрементом $\gamma_{max} \sim 0,1 \sqrt{\omega_{He} \omega_{HI}}$ не успевают развиться ($\gamma_{max} \Delta t \lesssim 1$). Гидродинамические колебания успеют возрасти за это время, согласно линейной теории, в $e^{\gamma_k \Delta t} \sim 10^3$ раз; их частоты $\sqrt{\omega_{He} \omega_{HI}} \sim 2 \cdot 10^8$ сек $^{-1}$ совпадают по порядку величины с наблюдавшимися частотами. Амплитуда колебаний ограничивается нелинейным взаимодействием волн на уровне, когда энергия колебаний

$$W \approx \frac{\omega_{pe}^2}{\omega_{He}^2} \frac{E^2}{8\pi} \sim \frac{1}{2} n m_e u_1^2.$$

Отсюда получаем, что

$$E \sim (u_1/c) H_0 \sim 100 \text{ в/см},$$

что соответствует экспериментальным данным. Эти колебания распространяются в интервале углов $\theta_0 < \theta < \pi/2$ к магнитному полю, где $\theta = \theta_0$ оценивается из условия, что

$$\frac{\omega}{k \cos \theta_0} \sqrt{T_e/m_e} = v_{Te}$$

(при $\theta < \theta_0$ возбуждение колебаний невозможно из-за сильного черенковского затухания на электронах). Таким образом,

$$\cos\theta_0 \sim u_{\perp} / v_{Te} \sim 0,2.$$

Так как колебания потенциальные, то $(E_z/E) \sim \cos\theta \sim \cos\theta_0 \sim 0,2$. Экспериментальное значение $(E_z/E)_{\text{изм}} \sim 0,2$ согласуется с этой оценкой.

Следует ожидать, что зонды обладают максимальной чувствительностью к длинам волн $\lambda = 2\ell$, то-есть зонд должен регистрировать частоты $\omega = ku_{\perp} = 3u_{\perp}/\ell$. Так как $\ell \sim 2$ мм, а $u_{\perp} = 1 + 6 \cdot 10^7$ см/сек, то должны приниматься частоты $\omega/2\pi \sim 20 - 150$ МГц. Наблюдавшиеся частоты попадают в этот интервал.

Соответствие выполненных теоретических оценок с экспериментальными данными позволяет сделать вывод, что обнаруженные нами высокочастотные колебания следует отождествить с гидродинамической неустойчивостью, теоретически рассмотренной в [3].

Приносим благодарность А.В. Лонгинову и В.Л. Сизоненко за обсуждение работы и В.Т. Пилипенко за помощь в проведении измерений.

Физико-технический институт
Академии наук Украинской ССР

Поступило в редакцию
17 сентября 1968 г.

Литература

- [1] В.Л. Сизоненко, К.Н. Степанов. Ядерный синтез, 7, 131, 1967.
- [2] М.В. Бабыкин, П.П. Гаврик, Е.К. Завойский, Л.И. Рудаков, В.А. Скорюпин, Г.В. Шолик. ЖЭТФ, 46, 511, 1964.
- [3] К.Н. Степанов. ЖТФ, 34, 2146, 1964.
- [4] V. L. Sizonenko, K. N. Stepanov, J. Teichmann. Comptes Rendus du Colloque International sur l'Interaction des Champs H. F. Associes a un Champ Magnetique Statique avec Plasma, Sacley, 15-18 Janvier 1968; В.Л. Сизоненко, К.Н. Степанов. ЖЭТФ, 56, вып. 1, 1969.
- [5] В.И. Арефьев, И.А. Кован, Л.И. Рудаков. Письма ЖЭТФ, 7, 286, 1968.
- [6] Л.В. Дубовой, В.П. Федяков. ЖЭТФ, 53, 789, 1967.
- [7] М.П. Васильев, Л.И. Григорьева, А.В. Лонгинов, Б.И. Смердов, В.В. Чечкин. ЖЭТФ, 54, 1646, 1968.
- [8] В.В. Чечкин, М.П. Васильев, Л.И. Григорьева, Б.И. Смердов. Ядерный синтез, 4, 145, 1964.
- [9] В.В. Чечкин, М.П. Васильев, Л.И. Григорьева, Б.И. Смердов. Сб. Высокочастотные свойства плазмы. Изд. АН УССР, Киев, 1965, стр. 15.