

## О ВЛИЯНИИ РАЗЛИЧНЫХ ТИПОВ КОЛЕБАНИЙ НА НАГРЕВ ИОНОВ В ПЛАЗМЕННО-ПУЧКОВЫХ РАЗРЯДАХ

*О. Ф. Ковник, Е. А. Корнилов, С. М. Криворучко,  
С. С. Моисеев, Я. Б. Файнберг*

Известно, что высокочастотные и сверхвысокочастотные методы нагрева плазмы являются весьма перспективными, особенно в крупномасштабных плазменных установках (см. [1]). Хотя вопрос о том, какими волнами лучше греть плазму не столь очевиден, однако представляется, что с точки зрения проблемы удержания плазмы предпочтительнее коротковолновый нагрев. В самом деле, коэффициент диффузии на нерегулярных колебаниях  $D \sim \lambda^2$  ( $\lambda$  — характерный пространственный масштаб порядка длины волны) и поэтому, при прочих равных условиях, крупномасштабные диффузионные (а также конвекционные) потоки приводят к быстрому уходу частиц и тепла из плазменной установки.

Система плазма — пучок удобна для изучения проблемы нагрева, благодаря возбуждению широкого класса низкочастотных колебаний и возможности управления их спектром [2, 3], поэтому удастся на одной и той же установке выяснить относительную роль различных участков спектра колебаний в нагреве плазмы. Из экспериментальных результатов следует, что в плазменно-пучковом разряде наряду с высокочастотными колебаниями развиваются низкочастотные и, в частности, дрейфовые колебания, приводящие к потерям частиц и тепла с временем, близким к боровскому (см. [3]). Это согласуется как с теорией каскадного процесса развития неустойчивостей, так и с теорией порогового возбуждения высокочастотными колебаниями низкочастотных (см. [4–6]). Следует заметить, что теория каскадного процесса возбуждения неустойчивостей применима при произвольном соотношении между реальной и мнимой величинами частоты  $\omega$ .

Рост эффективной частоты соударений электронов с нерегулярными пульсациями  $\nu_{e\text{эфф}}$  приводит к дестабилизации плазмы [4] и по этой же причине также могут снижаться пороги параметрического возбуждения низкочастотных неустойчивостей, причем  $\nu_{e\text{эфф}}$  в неоднородной замагниченной плазме по порядку величины достигает больших значений (так при развитии ионно-звуковой неустойчивости  $\nu_{e\text{эфф}} \sim \omega_0 (W/P)$   $W$  – энергия шумов,  $P$  – давление плазмы [7]). При эффективном рассеянии ионов на пульсациях достаточно большой частоты, как например, в случае возбуждения колебаний в диапазоне нижнего гибридного резонанса можно, по-видимому, ожидать подавления дрейфовых мод, поскольку ион-ионная вязкость стабилизирует дрейфово-диссипативную неустойчивость [8]. Отметим также, что при развитии колебаний в нижнегибридном диапазоне можно ожидать также изменения  $\nu_{e\text{эфф}}$ , поскольку в этом случае, как показано экспериментально, происходит подавление и ионно-звуковой неустойчивости [3].

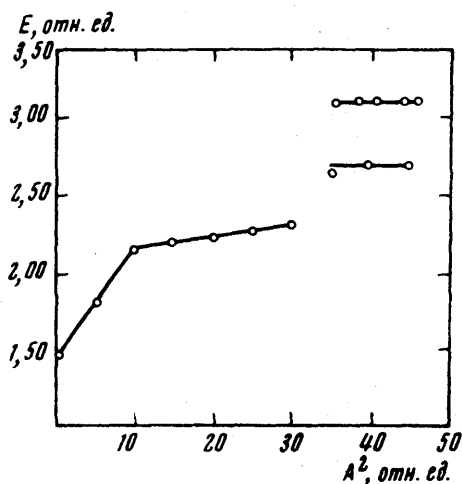


Рис. 1

Ниже приводятся экспериментальные результаты, подтверждающие преимущественное поглощение энергии ионами плазмы в области нижнегибридного резонанса  $\omega^2 \approx \omega_i \omega_e / [1 + (\omega_e^2 / \omega_0^2)]$  по сравнению с нагревом на колебаниях с  $\omega \lesssim \omega_i$  ( $\omega_0$  – электронная плазменная; циклотронные:  $\omega_e$  – электронная,  $\omega_i$  – ионная частота). Задание строго определенного типа колебаний осуществлялось методами, приведенными в [3], экспериментальная установка описана в [9]. Использовался электронный пучок в непрерывном режиме с током 100 ма, энергией 5 кэв, в однородном магнитном поле 2 кэ, пучок создавал плазму плотностью  $1 + 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$ . Возбуждение низкочастотных колебаний (0,01 – 30 МГц) достигалось с помощью низкочастотной амплитудой модуляции высокочастотного сигнала с частотой 3 ГГц, модулирующего электронный пучок. Кроме того, использовался метод модуляции двумя высокочастотными сигналами [3]. Высокочастотные и низкочастотные колебания снимались зондами и анализировались анализаторами. Энергетический спектр ионов плазмы, выходящих вдоль электронного пучка, исследовался с помощью электростатического анализатора.

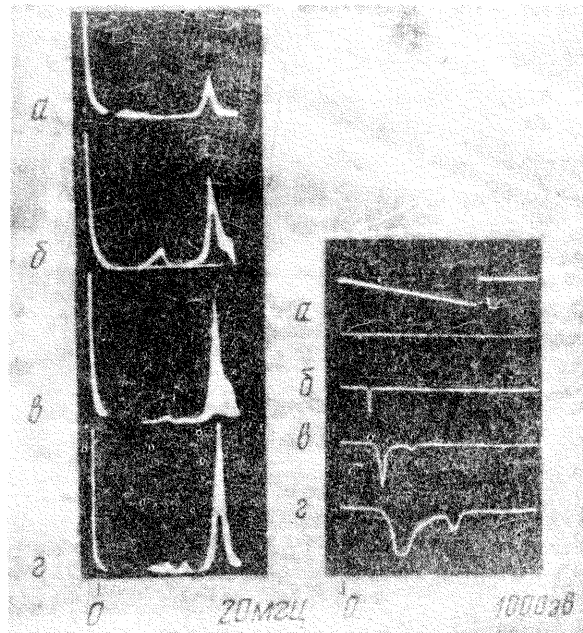


Рис. 2

Эксперимент показывает, что максимальный вклад в поглощение энергии ионами дают колебания вблизи ионно-циклотронной частоты  $f \cong 0,072$  МГц и нижнего гибридного резонанса  $f \cong 20$  МГц. На рис. 1 приведена зависимость энергии ионов от квадрата амплитуды колебаний в области  $\omega_i$ , из которого следует, что при малых амплитудах наблюдается линейный рост энергии ионов, но с некоторой величины  $A_{кр}$  возрастание энергии ионов замедляется. Превышение этой "пороговой" величины амплитуды приводит к последовательному возбуждению дрейфовых волн, а затем и релаксационных колебаний [3].

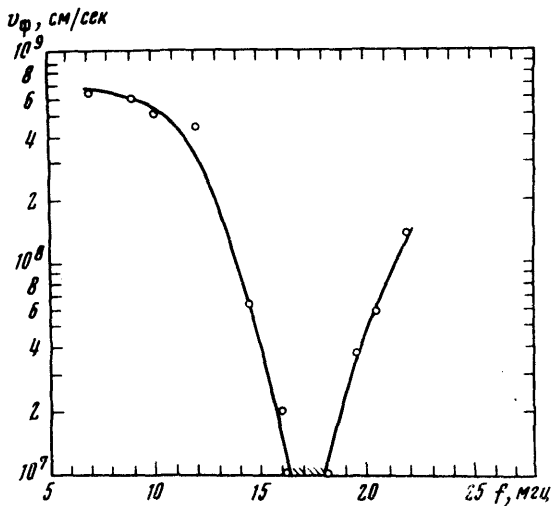


Рис. 3

На рис. 2 приведены энергетические спектры ионов (правые осциллограммы) при возбуждении колебаний на нижнегибридной частоте в зависимости от амплитуды колебаний (левые осциллограммы). Характерно также, что при тех же амплитудах, что и при возбуждении ко-

лебаний  $\omega_1$  при возбуждении колебаний на нижегибридной частоте не наблюдалось излома на кривой зависимости энергии от квадрата амплитуды. Причем ширина энергетического спектра оказывается значительно больше, чем в условиях возбуждения колебаний на ионно-циклотронной частоте. На рис. 3 приведена экспериментально снятая зависимость фазовой скорости от частоты, подтверждающая, что область  $\approx 20$  МГц соответствует быстрой магнитозвуковой волне.

Результаты экспериментов согласуются с утверждением, что ускорение и нагрев ионов наиболее эффективны колебаниями, вызывающими малую поперечную диффузию и теплопроводность (при возбуждении дрейфовых колебаний энергия ионов, как мы видим, меньше). Представляет интерес проведение аналогичных экспериментов не только в плазменно-пучковом разряде. Важным также является вопрос о непосредственном измерении эффективных частот соударений.

Авторы признательны А.С.Бакаю за обсуждение результатов и Л.И.Болотину – за интерес к работе.

Физико-технический институт  
Академии наук Украинской ССР

Поступила в редакцию  
7 марта 1972 г.

#### Литература

- [ 1 ] В.Е.Голант, А.Д.Шилия. УФН, 104, 413, 1971.
- [ 2 ] Ya. Fainberg. Czech. J. Phys., 18, 652, 1968.
- [ 3 ] А.С.Бакай и др. IV Междунар. конф. по исследованию физики плазмы и УТР, г.Медисон, 1971 г., CN-28/E9.
- [ 4 ] Е.Я.Коган, С.С.Моисеев, В.Н.Ораевский. ПМТФ, 6, 41, 1965.
- [ 5 ] А.Б.Михайловский, К.Юнгвирт. ЖЭТФ, 50, 1076, 1966.
- [ 6 ] A.S.Bakai. Nuclear Fusion., 10, 53, 1970.
- [ 7 ] Л.И.Рудаков, Л.В.Кораблев. ЖЭТФ, 50, 220, 1966.
- [ 8 ] Г.М.Заславский, С.С.Моисеев. ЖТФ, 34, 410, 1964.
- [ 9 ] Е.А.Корнилов, Е.В.Лифшиц, О.Ф.Ковпик. УФЖ, 13, 573, 1969.