

## ВОЗБУЖДЕНИЕ ИОННО-ЗВУКОВОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЕ

Н. С. Бучельникова, Р. А. Салимов и Ю. И. Эйдельман

Исследовалось возбуждение ионно-звуковой неустойчивости при пропускании тока в калиевой плазме. Показано, что наблюдается и жесткий и мягкий режимы возбуждения, причем последний в случае, когда одновременно с ионно-звуковой возбуждается дрейфовая неустойчивость.

В связи с изучением турбулентного состояния плазмы представляет интерес исследование характера возбуждения неустойчивостей в плазме.

Известно, что при потере устойчивости системой с одной степенью свободы возможно два типа возбуждений — мягкий и жесткий [1]. Если параметр, с которым связано возбуждение, больше критического, то в мягком режиме амплитуда колебаний плавно меняется при изменении параметра, обращаясь в нуль в критической точке. В жестком режиме при увеличении параметра амплитуда возрастает скачком при критическом значении, а при уменьшении параметра скачком падает до нуля при значении, меньшем критического. Можно ожидать, что два типа возбуждения будут наблюдаться и при развитии неустойчивости в плазме (система с многими степенями свободы) [2].

В настоящей работе наблюдалось мягкое и жесткое возбуждения при развитии ионно-звуковой неустойчивости в сильноионизованной неоднородной плазме. При этом мягкое возбуждение наблюдалось в системе, где одновременно возбуждается два типа неустойчивостей — ионно-звуковая и дрейфовая, а жесткое в системе, где возбуждается только ионно-звуковая.

Эксперименты проводились на установке [3], схема которой представлена на рис. 1. Плазма образуется при термической ионизации калия на вольфрамовой пластине (ионизаторе) радиусом 2 см. Температура пластины  $\sim 2000^\circ\text{K}$ . Вторая пластина (электрод) не нагревается. Расстояние ионизатор—электрод 36 см.

Магнитное поле направлено вдоль оси системы. Пределы изменения поля 400—2000 э.

Плотность плазмы максимальна на оси и спадает по радиусу. Эксперименты проводились при плотности плазмы  $10^9$ — $10^{10}$  см $^{-3}$ . Остаточное давление  $\sim (2 \div 8) \cdot 10^{-7}$  мм рт. ст., так что плазма является сильноионизованной.

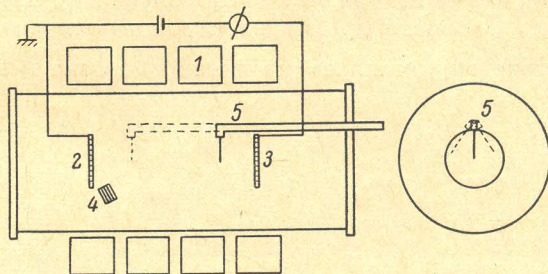


Рис. 1. Схема установки.

1 — катушки магнитного поля; 2 — ионизатор; 3 — электрод;  
 4 — напылитель; 5 — подвижный зонд.



Плотность плазмы и амплитуда колебаний плотности измерялись с помощью лэнгмюровских зондов соответственно по постоянной и переменной составляющим ионного тока насыщения.

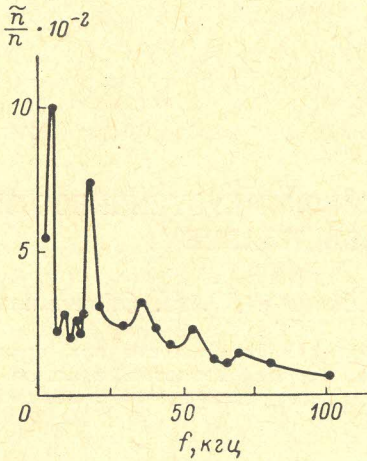


Рис. 2. Спектр колебаний (ионный слой).

$H=1000$  э,  $n=4 \cdot 10^9$  см $^{-3}$ .

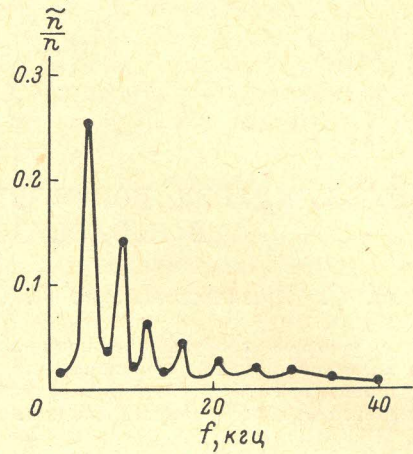


Рис. 3. Спектр колебаний (электронный слой).

$H=1000$  э,  $n=3.5 \cdot 10^9$  см $^{-3}$ .

Спектр колебаний исследовался с помощью селективных микровольтметров с полосой пропускания  $\sim 200$  гц. Отметим, что использованные приборы измеряют эффективную амплитуду.

Скорость дрейфа электронов относительно ионов  $U$  при некотором токе определялась по плотности тока  $j$  и плотности плазмы  $n$ :  $U = \frac{j}{n}$ .

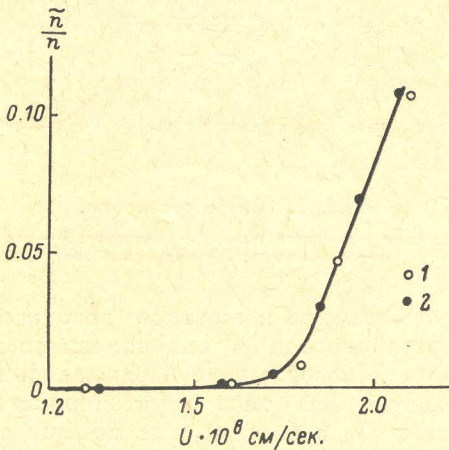


Рис. 4. Зависимость амплитуды колебаний от скорости дрейфа электронов (ионный слой).

$f=5$  кГц; 1 — увеличение  $U$ ; 2 — уменьшение  $U$ .

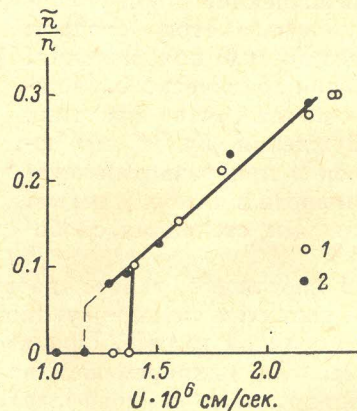


Рис. 5. Зависимость амплитуды колебаний от скорости дрейфа электронов (электронный слой).

$f=5$  кГц; 1 — увеличение  $U$ ; 2 — уменьшение  $U$ .

При этом плотность тока определялась по полному току, отнесенному к площади электрода, а плотность плазмы находилась усреднением по сечению плазменного столба вблизи электрода.

Ранее на этой же установке было показано, что в отсутствие тока в неоднородной плазме развивается дрейфовая неустойчивость [4, 5]. При развитии неустойчивости в системе с холодным электродом существенную роль играет электрический слой у поверхности ионизатора, опре-



деляемый соотношением потоков электронов и ионов. Неустойчивость наблюдается только при ионном слое. При электронном слое азимутальные возмущения компенсируются за счет эффекта типа Саймоновского и дрейфовая неустойчивость не развивается [6].

Неустойчивость, возбуждающаяся при протекании тока в случае ионного слоя (случай I), описана в работе [7]. Оказалось, что в этом случае сохраняется дрейфовая ветвь (причем амплитуды ее растут), и при некоторой критической скорости дрейфа  $U_c$  появляется новая ионно-звуковая ветвь. Для дрейфовой ветви частота колебаний обратно пропорциональна магнитному полю, волны азимутальные, причем азимутальные фазовые скорости всех гармоник одинаковы. Для ионно-звуковой ветви частота не зависит от магнитного поля и меняется обратно пропорционально длине системы. Фазовая скорость продольной составляющей практически совпадает со скоростью ионного звука. Типичный спектр колебаний представлен на рис. 2. Ионно-звуковая ветвь имеет меньшие частоты.

В случае электронного слоя (случай II), когда дрейфовой неустойчивости нет, возбуждается только ионно-звуковая ветвь (рис. 3). Критическая скорость дрейфа практически одинакова в обоих случаях.

Было исследовано развитие ионно-звуковой неустойчивости в случае ионного и электронного слоев. Роль параметра при развитии этой неустойчивости играет скорость дрейфа электронов.

На рис. 4, 5 показана зависимость амплитуды колебаний первой гармоники от скорости дрейфа. Видно, что характер зависимости существенно различен в случаях I и II. В случае I амплитуда меняется при изменении скорости дрейфа плавно, при увеличении и уменьшении  $U$  точки ложатся на одну кривую, при  $U \leq U_c$  амплитуда равна нулю.

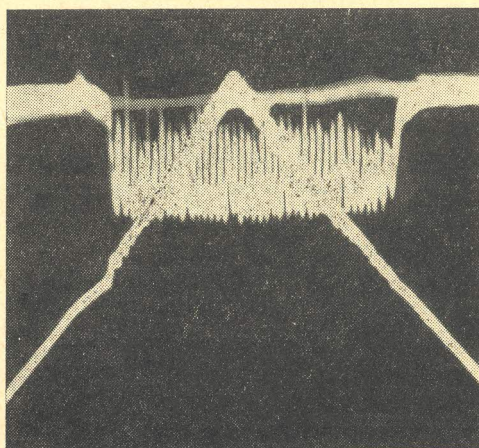


Рис. 6. Колебания плотности (электронный слой).

Нижняя кривая — напряжение на электроде.

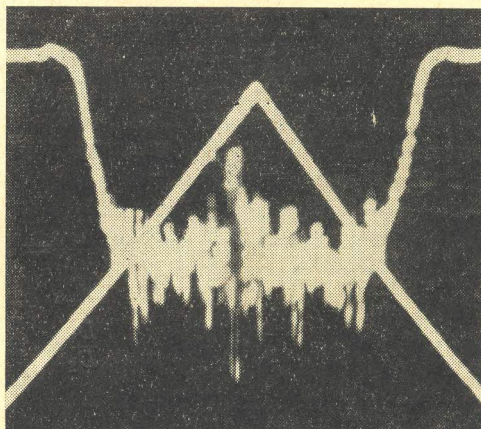


Рис. 7. Осциллограмма тока (ионный слой).

Нижняя кривая — напряжение на электроде.

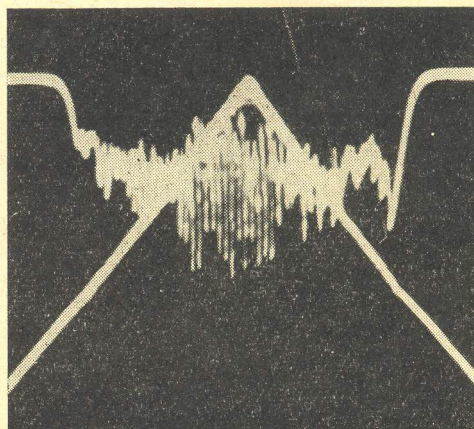


Рис. 8. Осциллограмма тока (электронный слой).

Нижняя кривая — напряжение на электроде.



В случае II при критическом значении  $U_c$  амплитуда скачком возрастает до значения  $\left(\frac{\bar{n}}{n}\right)_1$ . При уменьшении  $U$  она также резко падает от значения  $\left(\frac{\bar{n}}{n}\right)_2$  до нуля при значении  $U$ , меньшем  $U_c$ .

Из рис. 6 видно, что амплитуда колебаний плотности нарастает и падает за времена нескольких периодов колебаний.

Наличие гистерезиса в случае II и отсутствие его в I видно также из осциллограмм тока (рис. 7, 8). Действительно, в случае I критическое значение тока одинаково и при увеличении и при уменьшении его, так что кривая симметрична. В случае II ток, при котором появляются колебания, больше того, при котором они исчезают. Следует отметить, что при возбуждении неустойчивости возрастает диффузия [7] и, как следствие этого, падают плотность и ток, что и наблюдается на осциллограммах.

Таким образом, в случае I, когда ионно-звуковая неустойчивость развивается одновременно с дрейфовой, осуществляется мягкое возбуждение, а в случае II, когда она развивается одна, — жесткое.

Теория [8], где рассматривается вопрос о характере перехода системы в неустойчивое состояние, предсказывает, что отношение амплитуд возбуждения и срыва неустойчивости  $\left(\frac{\bar{n}}{n}\right)_1 : \left(\frac{\bar{n}}{n}\right)_2$  должно быть равно  $\sqrt{2}$ , а для любой величины, являющейся усредненной по пульсациям, соответствующее отношение должно быть равно 2. В настоящем эксперименте усредненной величиной является коэффициент поперечной диффузии  $D$ , измеряемый по потоку плазмы поперек магнитного поля [9].

Оказалось, что

$$\left(\frac{\bar{n}}{n}\right)_1 = 1.6 \pm 0.3,$$

$$\left(\frac{\bar{n}}{n}\right)_2$$

$$\frac{D_1}{D_2} = 2.2 \pm 0.3,$$

т. е. наблюдается удовлетворительное согласие с теорией.

При этом отношение критических скоростей возбуждения и срыва неустойчивости равно:  $\frac{(U_c)_1}{(U_c)_2} = 1.5 \pm 0.2$ .

Выражаем благодарность Э. М. Смокотину за помощь в проведении экспериментов.

#### Литература

- [1] А. А. Андронов, А. А. Витт, С. Э. Хайкин. Теория колебаний. Физматгиз, 1959. — [2] Б. Б. Кадомцев. Вопросы теории плазмы, т. IV. Госатомиздат, 1964. — [3] Н. С. Бучельникова. Теплофизика высоких температур, 2, 309, 1964. — [4] Н. С. Бучельникова. Ядерный синтез, 4, 165, 1964. — [5] Н. С. Бучельникова. Доклад на VII Международной конференции по явлениям в ионизированных газах, Белград, 1965. — [6] Н. Lashinsky. Доклад на II Международной конференции по физике плазмы и исследованиям в области управляемого ядерного синтеза, Калэм, 1965. — [7] Н. С. Бучельникова, Р. А. Салимов, Ю. И. Эйдельман. Ядерный синтез, 6, № 4, 1966. — [8] А. А. Веденов. УФН, 84, 533, 1964; А. А. Веденов, Ю. Б. Пономаренко. ЖЭТФ, 46, 2247, 1964. — [9] Н. С. Бучельникова. Ядерный синтез, 6, 122, 1966.

Поступило в Редакцию  
30 мая 1966 г.