

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ В КАЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ

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

(Новосибирск)

Исследуется возбуждение ионно-циклотронной неустойчивости в бесстолкновительной сильно ионизованной калиевой плазме; изучается состояние плазмы и диффузия при развитой неустойчивости, взаимодействие ионно-циклотронной неустойчивости с дрейфовой и ионно-звуковой.

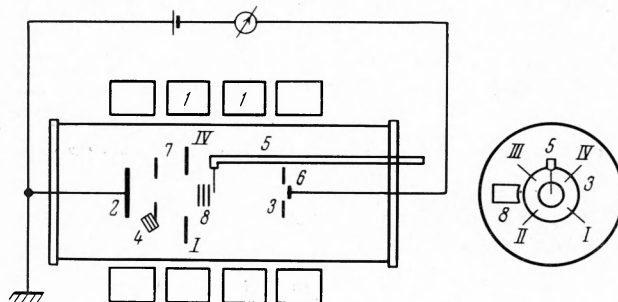
Ионно-циклотронная неустойчивость бесстолкновительной плазмы была предсказана и исследована теоретически в работах [1,2]. Было найдено, что в почти изотермической плазме неустойчивость возбуждается при скоростях дрейфа электронов относительно ионов (т. е. токовой скорости), выше критической

$$u_* = v_i \left(\frac{1}{\Gamma_1} \frac{T_i}{T_e} + 1 \right) \left(\ln \frac{M}{m} \right)^{1/2}, \quad \Gamma_1 = \frac{I_1(k_{\perp}^2 \rho_i^2)}{\exp(k_{\perp}^2 \rho_i^2)}$$

Здесь I_1 — функция Бесселя от мнимого аргумента; k_{\perp} , k_{\parallel} — поперечная и продольная составляющая волнового вектора; v_i — тепловая скорость ионов; ρ_i — ларморовский радиус ионов; T_i , T_e — температура ионов и электронов; M , m — масса ионов и электронов.

Неустойчивость проявляется в возбуждении электростатических почти радиальных волн ($k_{\perp} \gg k_{\parallel}$) на частотах, близких к ионно-циклотронной f_i . Как показано в работе [3], одновременно с ионно-циклотронной частотой могут возбуждаться и ее гармоники.

Неустойчивость такого типа была обнаружена в экспериментах со столкновительной термически ионизованной плазмой [4]. Было найдено, что при пропускании тока по оси плазменного цилиндра при скоростях дрейфа, близких к расчетным [1], возбуждаются радиальные волны с частотой, незначительно превосходящей ионно-циклотронную.



Фиг. 1. Схема установки: 1 — катушки магнитного поля; 2 — ионизатор; 3 — кольцевая пластина; 4 — напылитель; 5 — подвижный зонд; 6 — коллектор; 7 — ирисовая диафрагма; 8 — измеритель диффузии; I—IV — одиночные зонды

1. Описание установки. Эксперименты проводились на установке [5] (фиг. 1), в которой плазма образуется при термической ионизации калия на вольфрамовой пластине (ионизаторе) с радиусом $R = 2$ см, нагретой до температуры $\sim 2000^\circ$ К. Радиус плазменного столба может быть уменьшен до 0.9 см с помощью ирисовой диафрагмы, расположенной перед ионизатором. Со второго торца плазма ограничена коллектором радиусом 0.5 см и кольцевой пластиной радиусом 2 см, изолированными друг от друга. Длина плазменного столба $L = 36$ см.

Эксперименты проводились при магнитных полях 600—3000 *эрс* и плотности плазмы 10^9 — 10^{10} см^{-3} . При такой плотности длина свободного пробега $\lambda_{ei} \sim L$, так что плазму можно считать бесстолкновительной.

Плотность плазмы n и амплитуда колебаний плотности n° измерялись лэнгмюровским зондом по постоянной и переменной составляющим ионного тока насыщения, а амплитуда колебаний потенциала φ° по переменной составляющей тока на плавающий зонд [6]. Фазовые измерения проводились при помощи системы зондов, причем подвижный зонд мог перемещаться по оси и по радиусу.

Спектр колебаний исследовался анализаторами гармоник С5-2 и С5-3 (полоса пропускания ~ 200 гц), регистрирующих эффективную амплитуду.

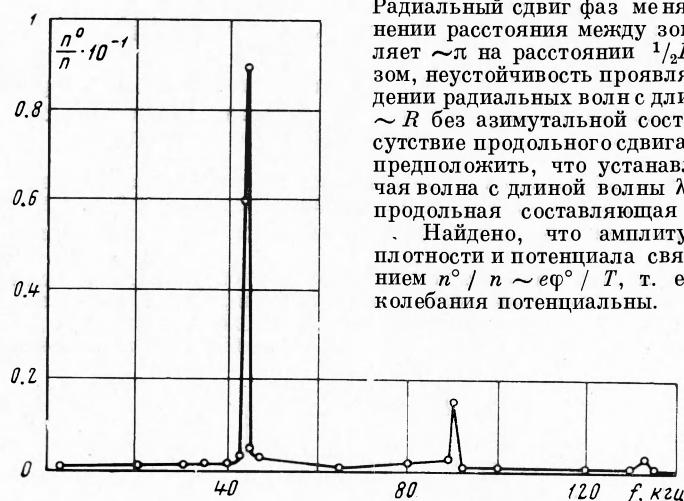
При исследовании состояния плазмы проводился качественный корреляционный анализ [7] и использовался коррелограф, измеряющий знаковую корреляционную функцию $F(\tau)$ [7,8]. Коэффициент диффузии поперек магнитного поля измерялся при помощи измерителя [6,7], регистрирующего поперечный поток плазмы.

2. Результаты эксперимента. Эксперименты проводились в режиме электронного слоя вблизи ионизатора, когда в отсутствие тока в плазме нет неустойчивостей [7]. При пропускании тока по оси плазменного цилиндра (напряжение приложено к коллектору, потенциал кольцевой пластины плавающий) наблюдается возбуждение неустойчивости. Типичный спектр колебаний, в котором четко видно несколько гармоник, приведен на фиг. 2. Частота первой гармоники близка к ионно-циклотронной и растет пропорционально магнитному полю (фиг. 3).

При фазовых измерениях, проводившихся при $H = 1000$ эрст, не обнаружено азимутального и продольного сдвига фаз (в последнем случае подвижный зонд передвигался в пределах 10–32 см от ионизатора).

Радиальный сдвиг фаз меняется при изменении расстояния между зондами и составляет $\sim \pi$ на расстоянии $1/2R$. Таким образом, неустойчивость проявляется в возбуждении радиальных волн с длиной волны $\lambda_r \sim R$ без азимутальной составляющей. Отсутствие продольного сдвига фаз позволяет предположить, что устанавливается стоячая волна с длиной волны $\lambda_z \geq 2L$ или что продольная составляющая отсутствует.

Найдено, что амплитуды колебаний плотности и потенциала связаны соотношением $n^0 / n \sim e\varphi^0 / T$, т. е. наблюдаемые колебания потенциальны.



Фиг. 2. Спектр колебаний: $H = 1000$ эрст; $n = 5 \cdot 10^9$ см $^{-3}$

Критическая скорость дрейфа электронов u_* , необходимая для возбуждения неустойчивости, определялась по формуле [9]

$$u_* = v_i I_* / I_i$$

Здесь I_i — ионный ток насыщения коллектора, I_* — критический ток. В этой формуле учтено, что плазма движется от горячего ионизатора к холодному торцу со скоростью $\sim v_i$ [10,11], вследствие чего $I_i \sim n v_i$. Оказалось, что критическая скорость дрейфа не зависит от магнитного поля, величина ее равна

$$u_* = (3.5 \pm 0.6) \cdot 10^6 \text{ см/сек} \sim 40 v_i$$

Было найдено, что четкие максимумы в спектре наблюдаются только при достаточно больших магнитных полях — $H > H_*$. При $H < H_*$ возбуждается только шумовой спектр в диапазоне частот $\sim f_i \div 4f_i$, причем амплитуда колебаний на порядок меньше амплитуды первой гармоники при $H > H_*$. При уменьшении радиуса плазменного столба было найдено, что значение H_* растет. Приведем критические значения H_* , соответствующие различным радиусам столба R .

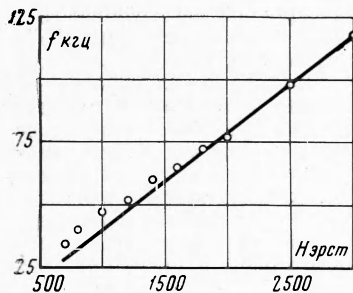
R мм	= 20	20	14	10	9	15	15
H_* эрст	= 800	700	1600	~ 2000	≥ 2000	1770	3500
R/ρ_i	= 4	4	6	5	5	7	7

Последние два значения для $R = 15$ мм взяты из работы [4] для калия и цезия соответственно. Здесь же приведены значения отношения радиуса столба к ларморовскому радиусу ионов при $H = H_*$.

Был исследован характер возбуждения неустойчивости. Как видно из фиг. 4, на которой показана зависимость амплитуд гармоник от скорости дрейфа электронов u , возбуждение является «мягким» [12]. Действительно, амплитуда при изменении скорости дрейфа меняется плавно, при увеличении и уменьшении u точки ложатся на одну кривую, при $u < u_*$ амплитуда равна нулю. С ростом u гармоники неустойчивости возбуждаются последовательно.

При возбуждении неустойчивости было найдено время нарастания амплитуды колебаний до максимальной величины. При этом напряжение на коллектор подавалось прямоугольными импульсами, передний фронт которых мал по сравнению с периодом колебаний. Из осциллограммы фиг. 5 видно, что это время составляет ~ 15 периодов колебаний.

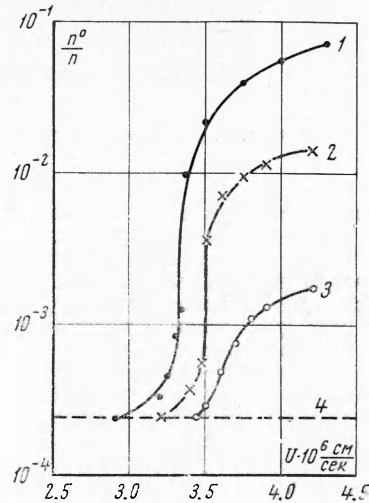
Измерение распределения амплитуды колебаний по радиусу показало, что колебания локализованы в пределах токового шнура и имеют максимальную амплитуду на его оси. Вне токового шнура амплитуда уменьшается примерно на порядок. О величине амплитуды можно судить по осциллограмме колебаний плотности (фиг. 6). Видно, что амплитуда невелика. Прямые измерения показывают, что при развитой неустойчивости амплитуда колебаний на оси не превышает величины $n^0/n \sim 0.1$.



Фиг. 3

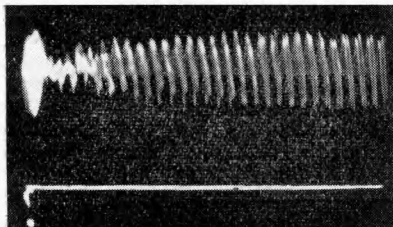
Фиг. 3. Зависимость частоты первой гармоники от магнитного поля: $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$

Фиг. 4. Зависимость амплитуд гармоник от скорости дрейфа электронов; кривые 1, 2, 3 соответствуют первой, второй и третьей гармоникам; штриховая прямая — начальный уровень шумов; $H = 1000 \text{ эрст}$; $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$



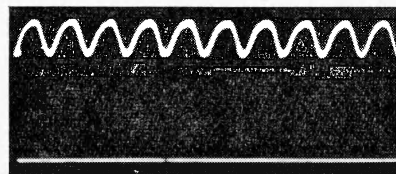
Фиг. 4

Было исследовано состояние плазмы при развитой неустойчивости. Из спектра фиг. 2 видно, что амплитуда гармоник \sim на два порядка выше амплитуды шумовых колебаний на промежуточных частотах. Осциллограммы фиг. 6,7 показывают, что возбуждающиеся колебания имеют регулярный характер, их фазы не сбиваются в течение очень большого числа колебаний, по крайней мере ~ 100 периодов. Это видно также из автокорреляционной функции $F(\tau)$ колебаний плотности, которая не отличается от автокорреляционной функции синусоидального сигнала с генератора (фиг. 8). Корреляционная функция, снятая с двух зондов, не изменяется при изменении расстояния (в частности, продольного) между ними, откуда следует, что фазы колебаний во всех точках плазменного столба скоррелированы.



Фиг. 5

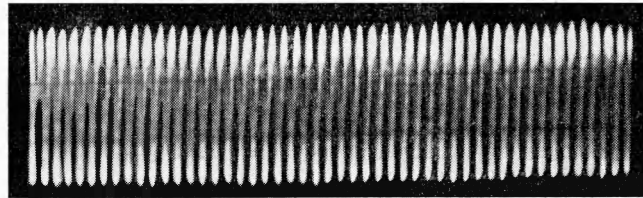
Фиг. 5. Развитие неустойчивости. Верхний луч — колебания плотности; нижний луч — потенциал коллектора; $H = 1200 \text{ эрст}$; $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; 50 мсек / см



Фиг. 6

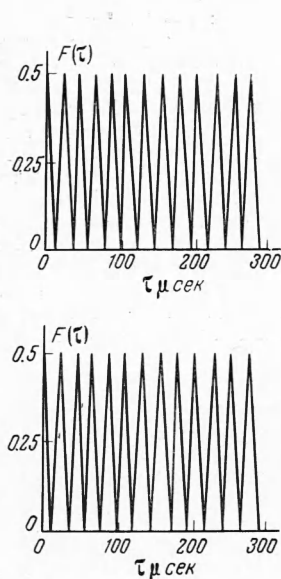
Фиг. 6. Осциллограмма тока на зонд (колебания плотности) при развитой неустойчивости. Прямая указывает нулевой уровень плотности $H = 1000 \text{ эрст}$; $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; $f = 44 \text{ кгц}$

Измерение коэффициента диффузии в режиме электронного слоя в отсутствие тока, когда неустойчивости нет, дает величину $D \lesssim 20 \text{ см}^2/\text{сек}^{-1}$ (при этом классическое $D \sim 1 \text{ см}^2/\text{сек}^{-1}$.) Как было показано в [7], эта величина, по-видимому, определяется паразитными токами и дает предел чувствительности измерителя. При возбуждении ионно-циклотронной неустойчивости возрастания коэффициента диффузии не наблюдалось. Из этого можно сделать вывод, что, если неустойчивость и приводит к увеличению диффузии, то $D \ll 20 \text{ см}^2/\text{сек}^{-1}$.

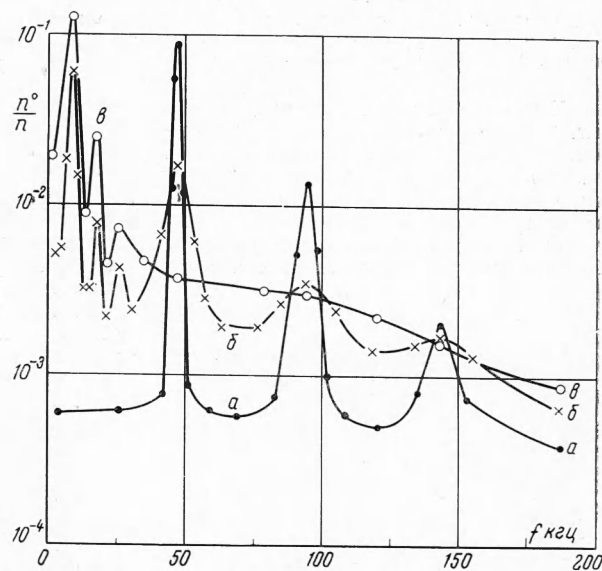


Фиг. 7. Колебания плотности (многократный запуск): $H = 1000 \text{ эрст}$;
 $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$; $f = 44.5 \text{ кгц}$

Было исследовано взаимодействие ионно-циклотронной неустойчивости с дрейфовой и ионно-звуковой. Как было показано ранее на этой же установке [13, 14], дрейфовая неустойчивость возбуждается в режиме ионного слоя у поверхности ионизатора. Амплитуда дрейфовых колебаний нарастает при переходе от электронного слоя к ионному (уменьшение температуры ионизатора при постоянном напылении) [14]. Если возбудить ионно-циклотронную неустойчивость в режиме электронного слоя, когда дрейфовой неустойчивости нет (фиг. 9, спектр *a*), а затем уменьшить температуру ионизатора, переходя в режим ионного слоя, то одновременно с ионно-циклотронной возбуждается дрейфовая неустойчивость. При малых амплитудах дрейфовых волн ($n^0/n \lesssim 10^{-2}$) дрейфовая и ионно-циклотронная неустойчивости возбуждаются независимо. По мере роста амплитуды дрейфовых колебаний максимумы ионно-циклотронных гармоник уширяются, а их амплитуда падает (фиг. 9, спектр *b*). При достаточно большой амплитуде дрейфовых колебаний ($n^0/n > 7 \cdot 10^{-2}$) выделенных ионно-циклотронных максимумов в спектре не наблюдается (фиг. 9, спектр *e*).



Фиг. 8

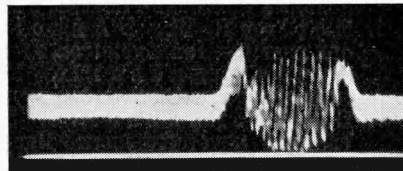


Фиг. 9

Фиг. 8. Автокорреляционная функция колебаний плотности. Внизу — автокорреляционная функция синусоидального сигнала с генератора ($f = 45 \text{ кгц}$); $H = 1000 \text{ эрст}$; $n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$

Фиг. 9. Спектры колебаний при одновременном возбуждении ионно-циклотронной и дрейфовой неустойчивости: кривые *a*, *b*, *e* соответствуют значениям $T = 2300, 2100, 1900^\circ\text{К}$ при $H = 1200 \text{ эрст}$

При пропускании тока по всему сечению плазменного столба в режиме электронного слоя при некоторой критической скорости электронов возбуждается ионно-звуковая неустойчивость [7]. При возбуждении неустойчивости амплитуда скачком возрастает до величины $n^{\circ}/n \sim 1$ («жесткий» режим возбуждения), так что при исследовании взаимодействия неустойчивостей можно наблюдать только случай взаимодействия с ионно-звуковыми колебаниями большой амплитуды. Если возбудить ионно-циклотронную неустойчивость, а затем пропустить ток на кольцевую пластину, возбуждив ионно-звуковые колебания (частота первой гармоники ~ 5 кгц), то в спектре исчезают ионно-циклотронные колебания и наблюдаются только ионно-звуковые. На фиг. 10 представлена осциллограмма колебаний плотности, снятая при постоянном потенциале коллектора и пилообразном напряжении на кольцевой пластине. Видно, что в момент возбуждения ионно-звуковых колебаний, отмеченный стрелкой, ионно-циклотронные колебания исчезают. Таким образом, дрейфовые и ионно-звуковые колебания достаточно большой амплитуды практически полностью подавляют ионно-циклотронные.



Фиг. 10 Колебания плотности при возбуждении ионно-циклотронной и ионно-звуковой неустойчивости. Прямая указывает нулевой уровень плотности: $H=1000$ эрст; $n = 5 \cdot 10^9$ см⁻³

3. Обсуждение результатов. Полученные результаты находятся в качественном согласии с результатами экспериментов [4] и теории [1]. Действительно, наблюдаемая неустойчивость проявляется в возбуждении электростатических радиальных волн на ионно-циклотронной частоте и ее гармониках. Критическая скорость дрейфа $u_* \sim 40v_i$ при $H = 1000$ эрст близка к расчетной $u_* \sim 20v_i$. Расхождение экспериментального значения u_* с результатами работы [4] ($u_* \sim 10v_i$) связано с тем, что при расчете u_* в [4] не было учтено движение плазмы со скоростью $\sim v_i$. Учет этого движения привел бы к значению $u_* \sim 40v_i$.

Следует отметить, что согласно [1] критическая скорость u_* должна расти при увеличении H . Однако эксперимент дает, что u_* не зависит от магнитного поля. Такой же результат получен в эксперименте со столкновительной плазмой [15]. В этой же работе построена теория, учитывающая роль слоя объемного заряда у поверхности коллектора. Найдено, что наличие слоя приводит к некоторому изменению u_* , в частности, в этом случае u_* не должно зависеть от магнитного поля. Применить результаты расчета [15] к бесстолкновительной плазме, по-видимому, нельзя. Однако не исключено, что и в этом случае наличие слоя приводит к изменению критической скорости.

Наличие магнитного поля, ниже которого не наблюдается выделенных максимумов на гармониках циклотронной частоты, и увеличение его обратно пропорционально R показывает, что для возбуждения ионно-циклотронной неустойчивости необходимо, чтобы ларморовский радиус ионов был достаточно мал по сравнению с радиусом плазменного столба. Из приведенных на стр. 150 данных видно, что минимальное отношение $R/\rho_i \sim 5 \pm 1$. В согласии с этим выводом находятся результаты работы [4], из которой можно найти, что минимальное $R/\rho_i \sim 7$.

При возбуждении неустойчивости гармоники возбуждаются последовательно, возбуждение имеет «мягкий» характер. Время нарастания амплитуды при возбуждении неустойчивости составляет ~ 15 периодов колебаний, так что инкремент неустойчивости, по-видимому, невелик. Амплитуда колебаний при развитой неустойчивости не превышает величины $n^{\circ}/n \sim 0.1$. Корреляционный анализ показывает, что состояние плазмы не является турбулентным. Действительно, колебания регулярны, фазы их скоррелированы в разных точках плазменного столба, корреляция фаз сохраняется в течение большого числа периодов колебаний. Таким образом, состояние плазмы при развитой ионно-циклотронной неустойчивости является ламинарным.

Для турбулентной плазмы в [1] сделаны оценки коэффициента диффузии поперек магнитного поля. Эти результаты, по-видимому, неприменимы к случаю ламинарного состояния плазмы, так как можно ожидать, что регулярные почти синусоидальные колебания не будут приводить к уходу плазмы поперек поля. Экспериментальные результаты свидетельствуют о том, что диффузия поперек поля или отсутствует или, во всяком случае, очень мала.

Ионно-звуковые и дрейфовые колебания достаточно большой амплитуды практически полностью подавляют ионно-циклотронные, причем для дрейфовых колебаний граничная амплитуда сравнима с амплитудой ионно-циклотронных колебаний. При малых амплитудах дрейфовых колебаний ионно-циклотронная и дрейфовая неустойчивости развиваются независимо. Таким образом, можно сделать вывод, что подавление ионно-циклотронных колебаний является нелинейным эффектом. Природа этого эффекта сейчас неясна.

Авторы благодарны А. А. Галееву за полезные обсуждения.

Поступила 5 IX 1967

