

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт

89

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

**Исследование
ионно-циклотронной неустойчивости
в калиевой плазме**

г.Новосибирск 1967

Препринт

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

ИССЛЕДОВАНИЕ ИОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

В КАЛИЕВОЙ ПЛАЗМЕ

г.Новосибирск

1967 г.

А Н Н О Т А Ц И Я

В бесстолкновительной калиевой плазме при пропускании тоска обнаружено возбуждение ионно-циклотронной неустойчивости, проявляющейся в раскачке радиальных волн на ионно-циклотронной частоте и ее гармониках. Найдено, что возбужденные неустойчивости носят "мягкий" характер. Амплитуда колебаний при развитой неустойчивости не превышает величины $\tilde{n}/n \sim 10^{-1}$. Наблюдаемые колебания имеют характер стационарных волн, т.е. состояние плазмы является ламинарным. Увеличение диффузии поперек магнитного поля при возбуждении неустойчивости не наблюдается.

Настоящая работа посвящена исследованию ионно-циклотронной неустойчивости, возбуждаемой продольным током в бесстолкновительной сильноионизованной плазме. Подобная неустойчивость была предсказана Драммондом и Розенблютом [1] и рассмотрена в нелинейном приближении Галеевым, Карпманом и Согдеевым [2].

В этих работах показано, что в почти изотермической плазме при скоростях дрейфа электронов не ниже

$$U_{др} \geq V_i \left(4,5 \frac{T_i}{T_e} + 1 \right) \left(\ln \frac{M}{m} \right)^{1/2}$$

должны раскачиваться электростатические радиальные волны с $\omega \approx \Omega_i$ (здесь $\Omega_i = \frac{eH}{mc}$ - ионная циклотронная частота, T_i (T_e), M (m) - температура и масса ионов (электронов) соответственно, а V_i - ионная тепловая скорость).

В этих же работах найдено, что неустойчивость приводит к аномальной диффузии поперек магнитного поля с коэффициентом диффузии $D \sim H^{-1}$.

Эта неустойчивость была обнаружена Д. Анжело и Мотли [3] в экспериментах с термической столкновительной плазмой. Они нашли, что при пропускании через плазменный цилиндр осевого тока радиуса меньшего, чем радиус столба, возбуждаются радиальные волны с частотой, превышающей Ω_i на $\approx 15\%$. Фазовые измерения показали, что удовлетворительно выполняется предсказываемое теорией условие на длину волны неустойчивости $k_z \rho_i \leq 1$, где $\lambda_z = 2\pi/k_z$ - радиальная длина волны, а ρ_i - ларморовский радиус ионов).

В настоящей работе исследовалось возбуждение ионно-циклотронной неустойчивости в бесстолкновительной плазме, исследовался характер возбуждения неустойчивости, состояние плазмы при развитой неустойчивости, взаимодействие ее с другими неустойчивостями плазмы.

Эксперименты проводились на установке Ц-1 [4]. Плазма образуется при термической ионизации калия на вольфрамовой пластине (ионизаторе) радиуса 2 см, нагретой до температуры $\sim 2000^\circ\text{K}$. Радиус плазменного столба может быть уменьшен до 0,9 см с помощью ирисовой диафрагмы, расположенной перед иониза-

тором. Со второго торца плазма ограничена коллектором радиуса 0,5 см и кольцевой пластиной радиуса 2 см, электрически изолированными друг от друга. Длина плазменного столба $L = 36$ см.

Эксперименты проводились при плотности плазмы $10^9 - 10^{10}$ см $^{-3}$ и магнитных полях от 600 до 2500 э.

Плотность плазмы и амплитуда колебаний измерялись лэнгмюровским зондом по постоянной и переменной составляющим ионного тока насыщения соответственно [5].

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

При исследовании состояния плазмы проводился качественный корреляционный анализ и использовался коррелограф, измеряющий знаковую корреляционную функцию $F(\tau)$ [6, 7].

Коэффициент диффузии поперек магнитного поля измерялся с помощью измерителя [6], регистрирующего поперечный поток плазмы.

Результаты эксперимента

При пропускании осевого тока через плазму (напряжение приложено к коллектору; потенциал кольцевой пластины плавающий) происходит возбуждение неустойчивости, типичный спектр которой показан на рис. 1. Обычно возбуждаются три гармоники. Зависимость частоты первой гармоники от магнитного поля показана на рис. 2. Видно, что экспериментальные значения частоты отличаются от значения $f_i = \Omega_i / 2\pi$ не более, чем на 10%.

Фазовые измерения показали, в согласии с результатами Д. Анжелс и Мотли [3], что неустойчивость проявляется в возбуждении радиальных волн без азимутальных составляющих. Волны характеризуются потенциалностью: $\tilde{n}_i / n_i \approx e\tilde{\varphi} / T_e$ (\tilde{n}_i - переменная составляющая плотности ионов n_i , $\tilde{\varphi}$ - переменная составляющая потенциала).

Приведенные данные свидетельствуют, таким образом, что исследуемая неустойчивость проявляется в раскачке ионно-циклотронных волн.

Критическая скорость дрейфа электронов, необходимая для возбуждения неустойчивости, определялась по формуле

$$U_{др\ кр} = 0,9 V_i \frac{J_{кр}}{J_i}$$

где $J_{кр}$, J_i - критический ток коллектора для возбуждения неустойчивости и его ионный ток насыщения (коэффициент 0,9 в этой формуле появляется вместо коэффициента 0,25 [3] при учете движения плазмы со скоростью $\sim V_i$ от горячего ионизатора к холодному торцу [8, 9]; последнее не учитывалось в работе [3]). Оказалось, что

$$U_{др\ кр} = (4 \pm 1) \cdot 10^6 \text{ см/сек.}$$

Обнаружено, что неустойчивость наблюдается при магнитных полях, превышающих некоторое критическое значение $H_{кр}$. При $H < H_{кр}$ в спектре не наблюдается максимумов выше уровня шумов на частотах $\sim f_i$. Эксперименты с разными радиусами плазменного столба показали, что с уменьшением радиуса растет значение $H_{кр}$. В таблице I приведены значения $H_{кр}$, соответствующие различным радиусам R плазменного столба. Там же приведены значения отношения радиуса столба к ларморовскому радиусу ионов при $H = H_{кр}$.

Таблица I

R мм	20	20	14	10	9	15	15
$H_{кр}$ э	800	700	1600	~ 2000	≥ 2000	1770	3500
R/ρ_i $H=H_{кр}$	4,3	3,7	6,1	5,3	4,8	6,8	7,5

(Последние два значения в таблице взяты из работы [3] для калия и цезия соответственно).

Был исследован характер возбуждения неустойчивости. Известно [10], что возбуждение неустойчивости может носить как "жесткий", так и "мягкий" характер. Оказалось, что возбуждение рассматриваемой неустойчивости является "мягким". Это иллюстрируется рис. 3, на котором показана зависимость амплитуд гармоник неустойчивости от скорости дрейфа электронов $U_{др}$. Видно, что с ростом

$U_{др}$ гармоники неустойчивости возбуждаются последовательно одна за другой. Отсутствует гистерезис в изменении амплитуд гармоник при увеличении и уменьшении $U_{др}$ относительно критического

значения $U_{кр}$. О "мягкости" возбуждения неустойчивости можно судить также по осциллограмме рис.4, где видно, что амплитуда колебаний нарастает плавно от уровня шумов (осциллограмма получена следующим образом: на коллектор подавались прямоугольные импульсы с частотой 100 гц; запуск осциллографа осуществлялся передним фронтом положительных импульсов; длительность фронта импульсов не превышает одного периода колебаний ионно-циклотронной неустойчивости).

Эта же осциллограмма позволяет судить об инкременте неустойчивости. Из нее видно, что амплитуда колебаний нарастает до своего максимального значения за ≈ 15 периодов, т.е. $\frac{1}{\gamma} \sim 15 T$ ($T = \frac{1}{\omega}$; γ - инкремент неустойчивости).

Измерения распределения амплитуды неустойчивости по радиусу показали, что колебания локализованы в пределах токового шнура и имеют максимальную амплитуду на его оси. Вне токового шнура амплитуда колебаний уменьшается \sim на порядок. Во всех экспериментах амплитуда первой гармоники не превышает величины $(\frac{\delta n}{n})_{эф} \sim 0,1$ (см, например, спектр на рис.1). Об абсолютной величине амплитуды колебаний можно судить также по рис.5, на котором показана осциллограмма тока зонда (колебания плотности) при развитой неустойчивости. Видно, что амплитуда колебаний действительно невелика.

Был исследован характер состояния плазмы при развитой ионно-циклотронной неустойчивости. Осциллограммы рис.5,6 показывают, что возбуждающиеся колебания носят очень регулярный характер. Это видно также из автокорреляционной функции $\Phi(\tau)$ (АКФ) — АКФ сигнала из плазмы не отличается от АКФ синусоидального сигнала с генератора (см.рис.7). Из спектра (рис.1) видно, что даже при развитой неустойчивости в плазме отсутствуют шумовые колебания.

При измерении коэффициента диффузии ^{не} было зарегистрировано увеличение поперечного потока плазмы при возбуждении ионно-циклотронной неустойчивости. Предел чувствительности измерителя D не позволяет измерять коэффициент диффузии, меньший $D \lesssim 20 \text{ см}^2/\text{сек.}$

Ранее на этой же установке было обнаружено возбуждение дрейфовых [11] и ионно-звуковых колебаний [6, 12]. Представляло интерес выяснить, как влияют на ионно-циклотронную дрейфовая и ионно-звуковая неустойчивости. Оказались, что они подавляют колебания плазмы на ионно-циклотронной частоте.

Известно [13], что амплитуда дрейфовой неустойчивости зависит от характера слоя вблизи ионизатора и падает при переходе к электронному слою (что соответствует более высоким температурам ионизатора при неизменном напылении). На рис.8 приведены спектры колебаний плазмы при различных температурах ионизатора. Видно, что при высоких температурах (электронный слой) в плазме при пропускании осевого тока возбуждается только ионно-циклотронная неустойчивость. По мере перехода из электронного слоя в ионный (уменьшение температуры ионизатора) в плазме раскачиваются дрейфовые волны и растет их амплитуда. При этом амплитуда циклотронной неустойчивости падает и сравнивается с уровнем шумов.

В случае электронного слоя вблизи ионизатора при пропускании тока через все сечение плазменного столба в плазме возбуждается только ионно-звуковая неустойчивость [6]. Поэтому ясно, что если через плазму, в которой уже присутствуют ионно-циклотронные волны, возбужденные осевым током, пропустить кольцевой электронный ток (прикладывая соответствующее напряжение к кольцевой пластине), то ионно-циклотронные волны должны быть подавлены развивающимися в плазме ионно-звуковыми колебаниями. Это хорошо иллюстрируется осциллограммой колебаний плотности плазмы, приведенной на рис.9. Осциллограмма получена следующим образом. К коллектору приложено постоянное напряжение, причем такое, что осевой ток возбуждает в плазме колебания на ионно-циклотронной частоте. К кольцевой пластине приложено пилообразное напряжение U . Когда U достигает некоторого значения $U_{кр}$, электронный ток на кольцевую пластину достигает критической величины и происходит возбуждение ионно-звуковых колебаний (этот момент отмечен на осциллограмме стрелкой). В предшествующий момент наблюдается возрастание плотности, причина которого пока неясна. Колебания на ионно-циклотронной частоте присутствуют в плазме вплоть до момента раскачки ионно-звуковой неустойчивости, которой они подавляют.

ся. На обратном ходе напряжения на кольцевой пластине при соответствующем электронном токе происходит срыв ионно-звуковых колебаний после чего в плазме вновь возбуждаются ионно-циклотронные волны.

Обсуждение результатов

Полученные результаты дают основание утверждать, что в бесстолкновительной сильноионизованной плазме осевой ток возбуждает колебания на ионно-циклотронной частоте и ее гармониках.

Критическая скорость дрейфа электронов, необходимая для возбуждения неустойчивости, согласуется с предсказаниями теории. Действительно, из формулы для $U_{др\ кр}$ получаем (калиевой плазмы)

$$U_{др\ кр} \approx 18V_i \quad \text{при} \quad T_e/T_i = 1;$$

$$U_{др\ кр} \approx 11V_i \quad \text{при} \quad T_e/T_i = 2;$$

экспериментальное значение $U_{др\ кр}$ равно $(40 \pm 10)V_i$. Расхождение экспериментального значения $U_{др\ кр}$ с результатами, приведенными в работе [3] ($U_{др\ кр} \approx 10V_i$), связано с тем, что в последней авторы не учитывали движение плазмы (см. выше) и поэтому получили заниженное \sim в 4 раза значение $U_{др\ кр}$.

Тот факт, что неустойчивость раскачивается в плазме при $N > N_{кр}$, нетрудно понять, если учесть, что, во-первых, неустойчивость согласно теории [1, 2] должна возбуждаться в области длин волн $k_z \rho_i \leq 1$, а во-вторых, длина радиальной волны видимо не может превышать диаметра плазменного столба R . Тогда легко получаем следующее условие для существования неустойчивости:

$$2R > \lambda_z \sim 2\pi \rho_i \quad \text{откуда} \quad \frac{R}{\rho_i} > \pi.$$

Это означает, что неустойчивость раскачивается только при $\rho_i < \rho_{i\ кр} \approx R/\pi$ т.е. при $N > N_{кр}$, определяемого через $\rho_{i\ кр}$. Из таблицы I видно, что действительно экспериментальное значение R/ρ_i всегда больше π .

Сравнение полученного экспериментального значения инкремента нарастания неустойчивости ($1/\gamma \approx 15T$, где $T = 2\pi/\Omega_i$) с его теоретическим значением затрудняется тем, что исследуемая неустойчивость возбуждается в ограниченном плазменном цилиндре, а в теории плазма считается неограниченной.

Как известно, состояние плазмы при развитой неустойчивости может быть ламинарным или турбулентным. Полученные результаты (отсутствие шумовой составляющей в спектре, регулярность колебаний) показывают, что состояние плазмы при развитой ионно-циклотронной неустойчивости является ламинарным. Форма сигнала (рис. 5) близка к синусоидальной, что свидетельствует о линейности волн.

В случае, когда ионно-циклотронная неустойчивость приводит к турбулентному состоянию плазмы, теория [1, 2] предсказывает аномальную диффузию поперек магнитного поля с коэффициентом диффузии $D \sim I$ см²/сек. В ламинарном состоянии, которое реализуется в настоящем эксперименте, эта оценка, по-видимому, не применима. Видимо неудивительно, что не наблюдалось поперечного ухода плазмы, связанного с ионно-циклотронной неустойчивостью.

Подавление ионно-циклотронной неустойчивости дрейфовыми и ионно-звуковыми волнами связано, по-видимому, с нелинейностью дрейфовых и ионно-звуковых колебаний. Действительно, при небольших амплитудах дрейфовых колебаний (спектр б/на рис. 8) ионно-циклотронные и дрейфовые волны существуют в плазме одновременно, а дрейфовые колебания большой амплитуды подавляют ионно-циклотронную неустойчивость. Ионно-звуковая же неустойчивость в данном случае возбуждается жестко и сразу переходит в нелинейный режим, подавляя колебания на ионно-циклотронной частоте.

В заключение авторы благодарят А.А. Галеева за полезные обсуждения.

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Спектр колебаний

$$H = 1000 \text{ э}; \quad n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}.$$

Рис.2. Зависимость частоты первой гармоники от магнитного поля

$$n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}.$$

Рис.3. Зависимость амплитуд гармоник неустойчивости от скорости дрейфа электронов

.- I-я гармоника; x-II гармоника;

o-III гармоника;

--- начальный уровень шумов.

$$H = 1000 \text{ э}, \quad n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}.$$

Рис.4. Развитие неустойчивости.

Верхний луч - колебания плотности; нижний луч - потенциал коллектора

$$H = 1200 \text{ э}, \quad n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}, \quad 50 \text{ мсек/см}.$$

Рис.5. Осциллограмма тока на зонд (колебания плотности) при развитой неустойчивости.

Прямая указывает нулевой уровень плотности

$$H = 1000 \text{ э}, \quad n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}, \quad f = 44 \text{ кгц}.$$

Рис.6. Колебания плотности (многократный запуск)

$$H = 1000 \text{ э}, \quad n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}, \quad f = 44,5 \text{ кгц}.$$

Рис.7. Автокорреляционная функция колебаний плотности. Внизу - автокорреляционная функция синусоидального сигнала с генератора ($f = 45 \text{ кгц}$).

$$H = 1000 \text{ э}, \quad n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}.$$

Рис.8. Спектры колебаний.

а) .- Тиониз. = 2300°K , б) x-Тиониз. = 2100°K ,

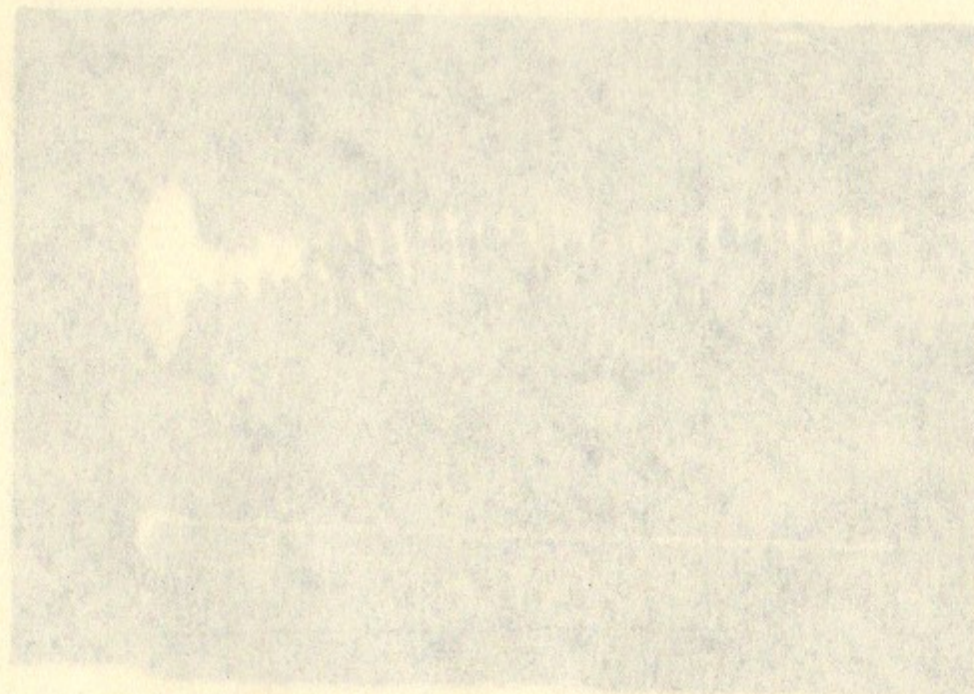
в) o- Тиониз. = 1900°K , $H = 1200 \text{ э}$.

Рис.9. Колебания плотности.

Прямая указывает нулевой уровень плотности.

$$H = 1000 \text{ э}, \quad n = 5 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$$

Пояснения в тексте.



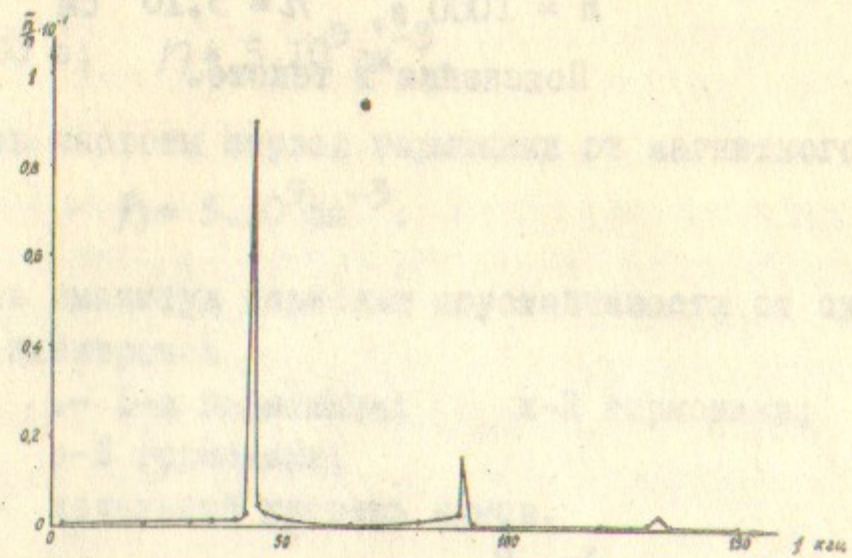


Рис.1

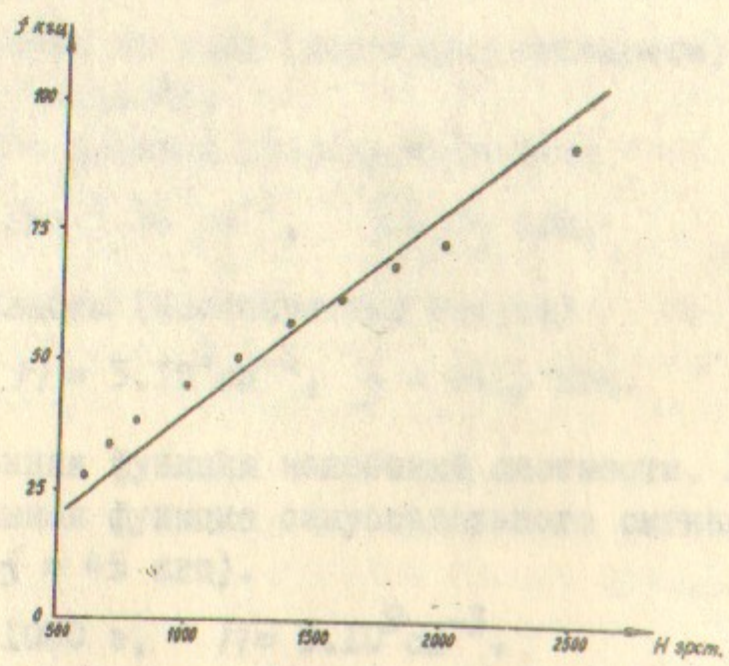


Рис.2

12

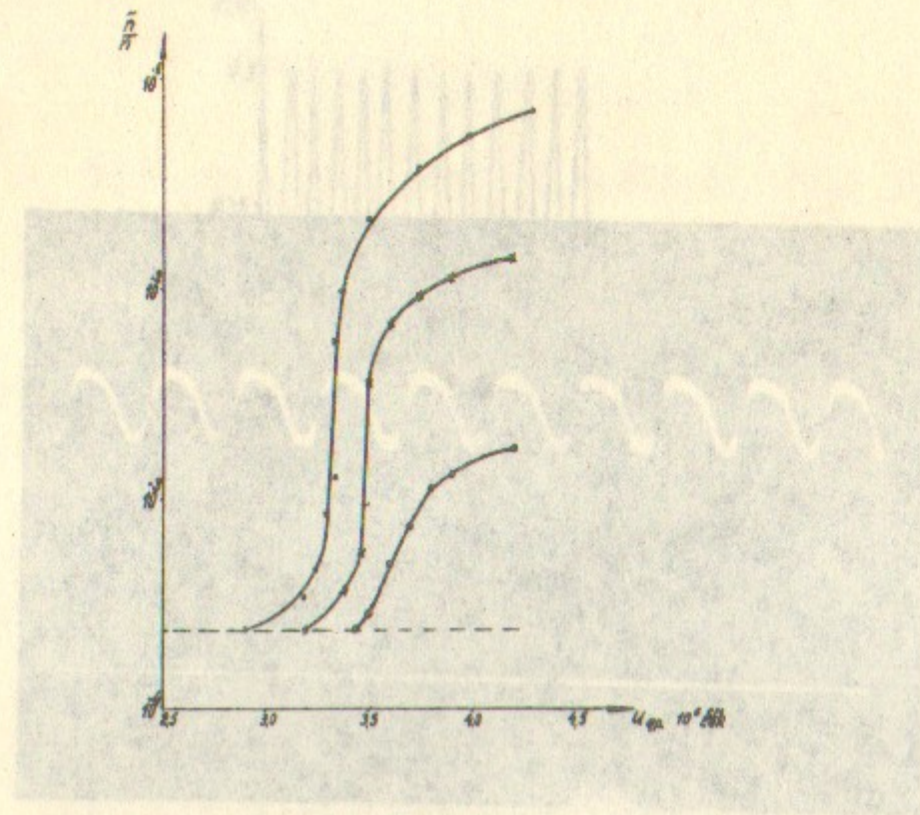


Рис.3

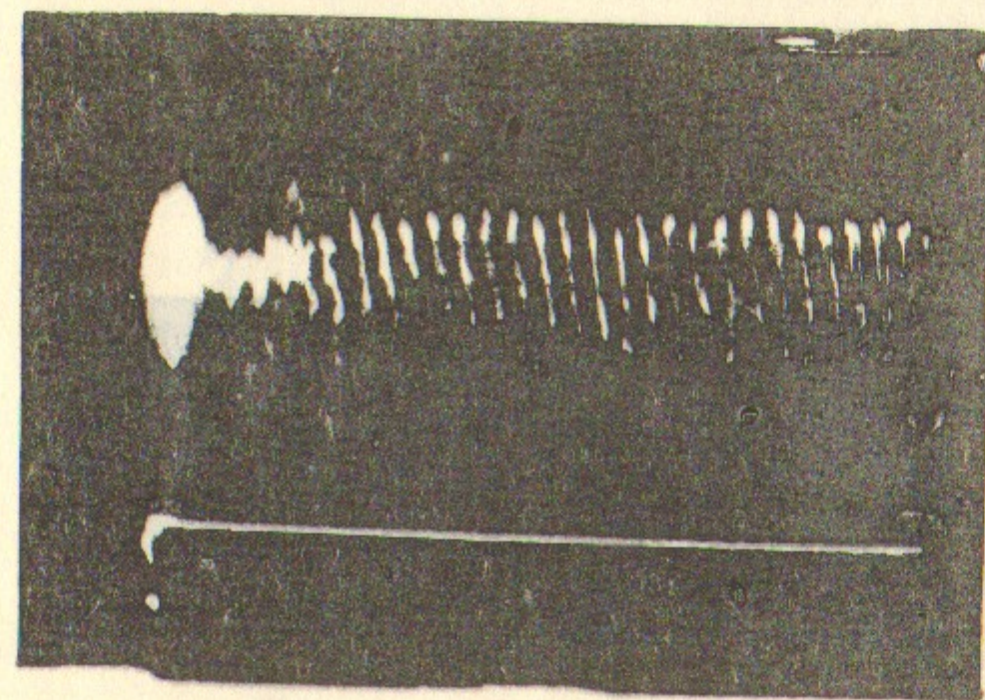


Рис.4

13

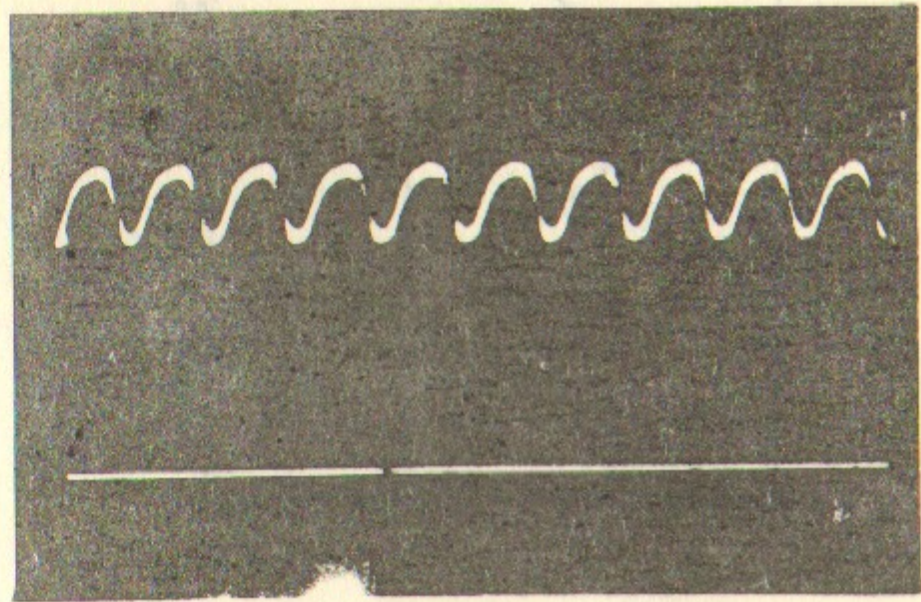


Рис. 5

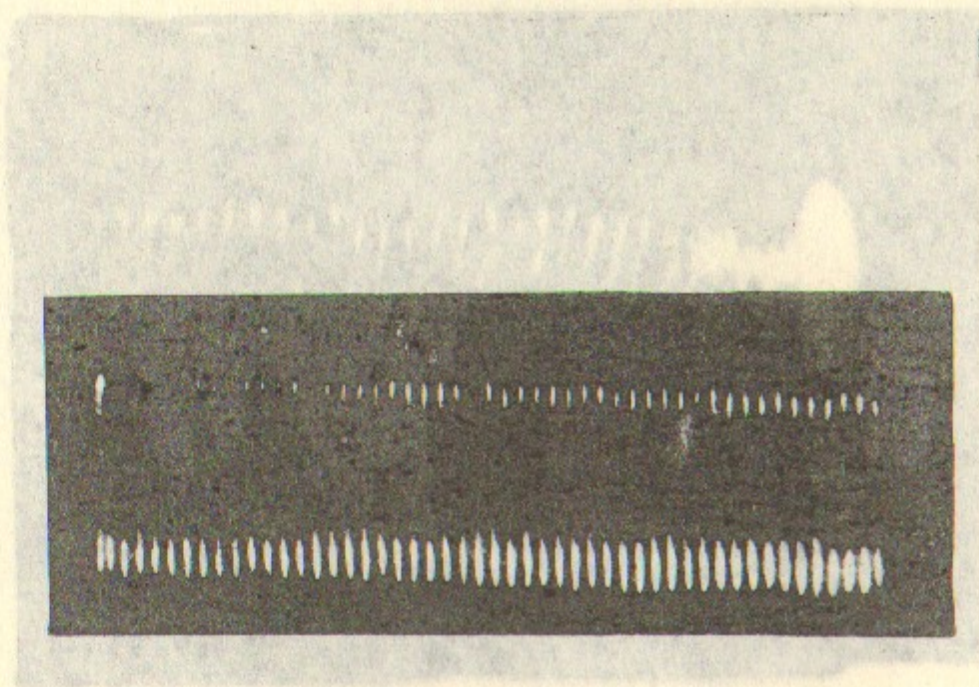


Рис. 6

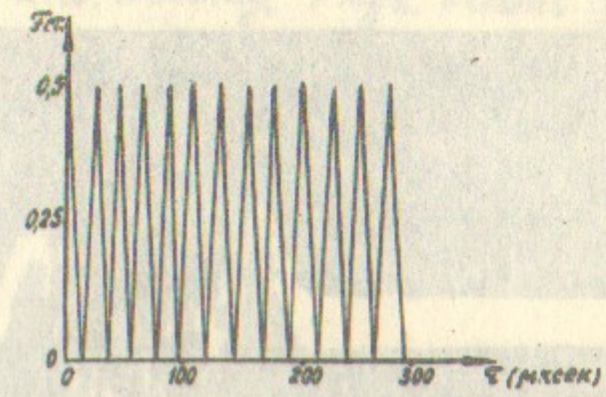
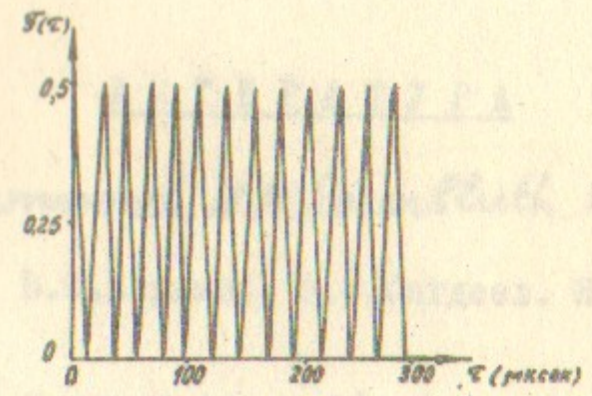


Рис. 7

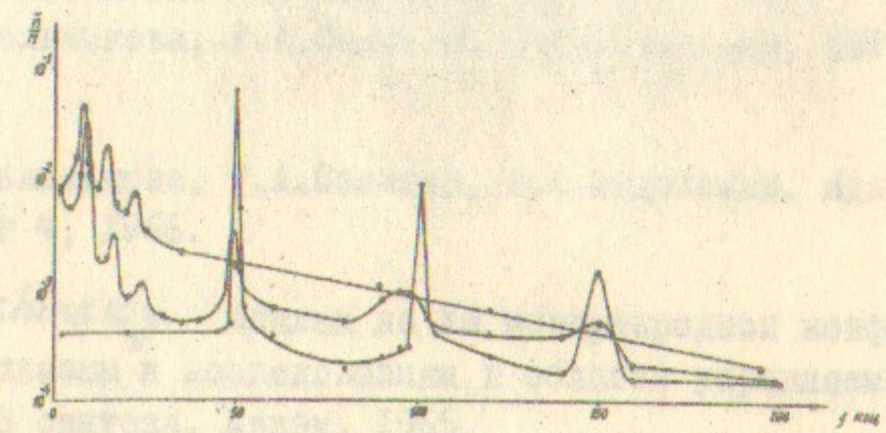


Рис. 8

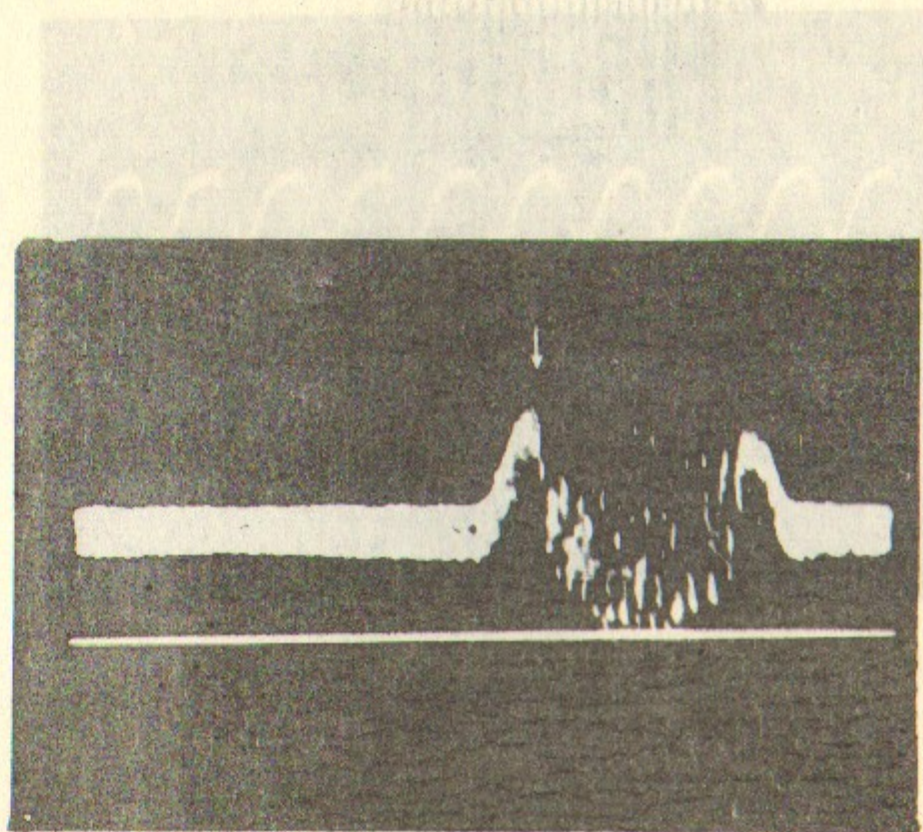
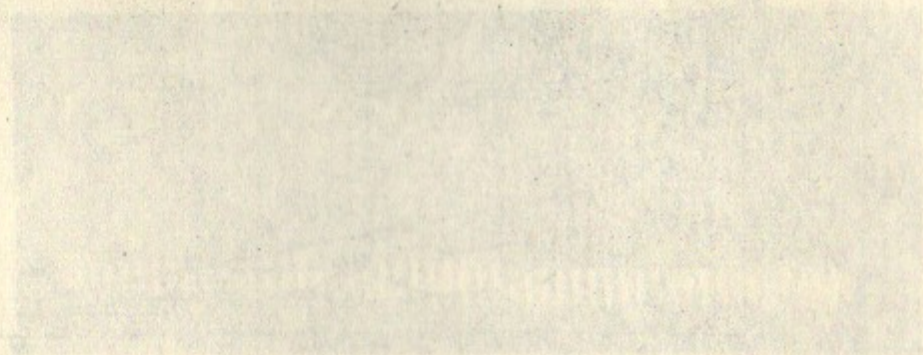


Рис.9



ЛИТЕРАТУРА

1. W.E. Drummond, M.N. Rosenbluth. *Phys. Fl.* 5, 1507, 1962.
2. А.А.Галеев, В.И.Карпман, Р.З.Сагдеев. *Ядерный синтез*, 5, 20, 1965.
3. N. D'Angelo, R.W. Motley. *Phys. Fluids* 5, 633, 1962, 6, 296, 1963.
4. Н.С.Бучельникова, *ТВТ* 2, 509, 1964.
5. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. *ЖЭТФ* 52, № 2, 1967.
6. Н.С.Бучельникова. *Ядерный синтез* 6, 122, 1966.
7. А.В.Недоспасов, С.С.Соболев. Доклад на УП международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Белград, 1965.
8. Q.Y. Wong, R.W. Motley, N. D'Angelo. *Phys. Rev.* 133, 2A, 436, 1964.
9. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. *ТВТ* 4, 27, 1966.
10. А.А.Веденов. *УФН* 84, 533, 1962.
11. Н.С.Бучельникова. *Ядерный синтез* 4, 165, 1964.
Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. *ЖЭТФ* (в печати), 1967.
12. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. *Ядерный синтез* 6, № 4, 1966.
13. H. Lashinsky. Доклад на УШ международной конференции по физике плазмы и исследованиям в области управляемого термоядерного синтеза. Калэм, 1965.

1965.10.21 каталоги и библиография СВН Санкт-Петербургского филиала Института ВЭО АН УССР

Содержание

1. В.Е. Шварцман, А.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.
2. А.А. Тарасов, В.А. Тарасов, В.С. Тарасов. 1967 г., 25 с.
3. К.В. Шварцман, В.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.
4. В.С. Шварцман, В.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.
5. В.С. Шварцман, В.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.
6. А.А. Тарасов, В.А. Тарасов, В.С. Тарасов. 1967 г., 25 с.
7. А.А. Тарасов, В.А. Тарасов, В.С. Тарасов. 1967 г., 25 с.
8. В.С. Шварцман, В.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.
9. В.С. Шварцман, В.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.
10. А.А. Тарасов, В.А. Тарасов, В.С. Тарасов. 1967 г., 25 с.
11. В.С. Шварцман, В.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.
12. В.С. Шварцман, В.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.
13. В.С. Шварцман, В.К. Шварцман, В.К. Шварцман. 1967 г., 25 с.

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Заказ №89, подписан к печати 13.01.1967 г.,
тираж 200 экз., 0,5 печ.л., бесплатно.

Отпечатано на ротاپринтере в ИЯФ СО АН СССР