

Б.94
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт 57

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

**Исследование турбулентного состояния
плазмы при дрейфовой неустойчивости**

НОВОСИБИРСК 1966

v+

В настоящей работе исследовалось состояние плазмы /1,2/ и диффузия поперёк магнитного поля при дрейфовой неустойчивости /3/ в случае больших амплитуд колебаний $\kappa/n \sim 1$.

Можно было ожидать, что при таких амплитудах состояние плазмы будет сильнотурбулентным, Оказалось, однако, что хотя плазма и является турбулентной, полной хаотизации фаз колебаний не наблюдается - время корреляции фаз составляет ~ 10 периодов.

Диффузия поперёк магнитного поля растёт с ростом амплитуды. При $\kappa/n \sim 1$ и $H = 1000$ эрст коэффициент диффузии близок к Бомовскому. При этом диффузия носит конвективный характер.

Описание установки

Эксперименты проводились на установке /4/, схема которой приведена на рис.1.

Плазма образуется при термической ионизации калия на вольфрамовой пластине (ионизаторе) радиусом $R=2$ см, нагретой до температуры $\sim 2000^\circ\text{K}$. Вторая пластина, расположенная на расстоянии $L = 36$ см от первой, не нагревается. Плотность плазмы в такой системе максимальна на оси и спадает по радиусу.

Эксперименты проводились при плотности плазмы $10^9 - 10^{10}$ см $^{-3}$ и магнитном поле ~ 1000 эрст.

Плотность плазмы и амплитуда колебаний измерялись лэнгмювским зондом по постоянной и переменной составляющей ионного тока насыщения соответственно /5/.

Спектр колебаний исследовался с помощью избирательного указателя уровня ИУУ-300 (полоса пропускания ~ 1 кГц) и анализатора гармоник С5-3 (полоса ~ 200 Гц), регистрирующих эффективную амплитуду.

При исследовании состояния плазмы измерялась корреляционная функция и проводился качественный корреляционный анализ /1,8,6/, заключавшийся в том, что сигнал с зонда (полный или на заданной частоте) подавался на осциллограф в режиме многократного или однократного запуска. Первый режим позволяет различать регулярные и шумовые колебания, а

также качественно определять время потери корреляции фаз. Второй даёт возможность определять время между существенными изменениями амплитуды и фазы - "время жизни" волновых пакетов /1/.

Для измерения корреляционной функции (КФ) использовался автоматический коррелограф /2,7/, регистрирующий знаковую корреляционную функцию $\mathcal{F}(\tau)$. Блок-схема коррелографа представлена на рис.2. Время задержки меняется от 0 до 1200 мксек ступенями по 12 мксек. Время интегрирования составляет 500 мсек. Отметим, что знаковая КФ связана с нормированной КФ $\rho(\tau)$ соотношением /2,8/

$$\rho(\tau) = -\cos 2\pi \mathcal{F}(\tau).$$

Для определения коэффициента диффузии измерялся поток плазмы поперек магнитного поля $(nV)_z$. Измеритель потока /5/ представляет собой установленные на границе столба плазмы пластины (рис.1), между которыми приложен потенциал, достаточный для полного разделения электронов и ионов. Зная радиальный градиент плотности $dn/dr \sim n_0/R$ (n_0 - плотность на оси столба), находим коэффициент диффузии $D = (nV)_z / \frac{dn}{dr}$.

Коэффициент диффузии оценивался также по продольному градиенту плотности /2/. Предполагая, что продольная скорость дрейфа плазмы постоянна по сечению и длине плазменного столба и равна тепловой скорости ионов V_i , имеем $D = \frac{\alpha R}{2} V_i \frac{dn}{dr}$, где $\alpha < 1$ - коэффициент, учитывающий радиальное распределение плотности.

Результаты эксперимента

Как было показано ранее на этой же установке /3/, в неоднородной по плотности плазме в отсутствие электрических полей и тока развивается дрейфовая неустойчивость. Неустойчивость проявляется в возбуждении азимутальных волн, имеющих продольную составляющую. При этом волна является стоячей по оси и бегущей по азимуту, причём длины волн гармоник кратны длине окружности плазменного цилиндра. Волны потенциальны, т.е. выполняется соотношение $\tilde{n}/n \approx e\tilde{\varphi}/T/5/$.

В работе /3/, где исследования проводились в системе с двумя горячими пластинами, неустойчивость наблюдалась и при ионном и при элект-

ронном слое у поверхности ионизатора. Однако, при этих измерениях не было контроля за величиной амплитуды колебаний. Оказалось, что при переходе в электронный слой амплитуды падают. В случае работы с одной холодной пластиной при переходе в электронный слой неустойчивость затухает. Только на краю столба, где амплитуда максимальна, сохраняются верхние гармоники. Причиной затухания неустойчивости, по-видимому, является компенсация азимутальных возмущений за счёт эффекта типа Саймоновского /9/.

При переходе в ионный слой амплитуды растут, достигая при достаточно глубоком ионном слое величины $\tilde{n}/n \sim 1$. Следует обратить внимание на то, что при переходе в ионный слой наблюдается возбуждение колебаний одновременно в довольно широкой области спектра, причём нарастают и гармоники и шумовые колебания на промежуточных частотах (рис.3). Таким образом, можно утверждать, что турбулентное состояние плазмы в этом случае развивается не вследствие последовательного возбуждения степеней свободы системы и взаимодействия гармоник /10/, а в результате нарастания начальных флуктуаций во всей области спектра, где возможна неустойчивость. Этот вывод находится в согласии с результатами теоретических работ /11-13/, в которых было показано, что при приближении к границе неустойчивости флуктуации неограниченно нарастают.

При исследовании состояния плазмы при развитой неустойчивости следовало выяснить следующие вопросы. Если состояние плазмы не является турбулентным, а исследуемые колебания представляют собой стационарную волну, должна наблюдаться регулярная картина, сохраняющаяся во времени. В случае турбулентного состояния колебания имеют шумовой характер. При этом слаботурбулентное состояние характеризуется тем, что взаимодействие волн мало. Вследствие этого каждой частоте соответствует свое волновое число \tilde{k} (функция спектральной плотности имеет δ -образный характер /14/, а "время жизни" волновых пакетов велико по сравнению с периодом колебаний^x). Таким образом, корреляция фаз колебаний в данной точке сохраняется в течение большого числа периодов. Расстояние, на котором теряется корреляция фаз, велико по сравнению с длиной волны.

^x) Отметим, что употребляемое в теории понятие "слаботурбулентное состояние" предполагает, в отличие от изложенного выше, полную хаотичность фаз.

При переходе к сильнотурбулентному состоянию растёт взаимодействие волн, "время жизни" уменьшается, становясь сравнимым с периодом колебаний, происходит "расплывание по \vec{k} " функции спектральной плотности, т.е. каждому ω теперь соответствует набор \vec{k} . В этом случае малы и время потери корреляции фаз в данной точке и расстояние, на котором теряется корреляция.

Состояние плазмы в случае малых амплитуд колебаний (первая гармоника $\tilde{n}/n \sim 10^{-2}$, полный сигнал $\tilde{n}/n \sim 0,1$) было исследовано ранее /6/. Было показано, что состояние плазмы является слаботурбулентным, причём колебания на частотах гармоник близки к когерентным, а промежуточные являются шумовыми. В настоящей работе измерено "время жизни" по полному сигналу и первой гармонике. Оказалось, что колебания гармоник не являются чисто когерентными, а характеризуются большим временем жизни - оно превышает 50-60 периодов.

При увеличении амплитуды колебаний "время жизни" уменьшается.

Типичный спектр колебаний, снятый при больших амплитудах, показан на рис.4. Видно, что амплитуда первой гармонике достигает величины $\tilde{n}/n \sim 0,25$, при этом для полного сигнала $\tilde{n}/n \sim 0,5-0,6$. Напомним, что измеряется эффективная амплитуда. Истинная амплитуда может быть получена из осциллограммы колебаний плотности, представленной на рис.5 (многократная развертка). Видно, что плотность падает практически до нуля, так что амплитуда достигает величины $\tilde{n}/n \sim 1$. Отметим, что частота колебаний в полном сигнале совпадает с частотой первой гармонике.

Наблюдается модуляция колебаний верхней части спектра с частотой полного сигнала (рис.6). При этом амплитуда высоких частот максимальна в области фазы максимальной плотности, откуда можно сделать вывод, что эти колебания сосредоточены в пределах сгустка плазмы, соответствующего первой гармонике.

Из осциллограммы (рис.5) видно, что колебания носят шумовой характер, причём хаотизация фаз происходит через 6-7 периодов.

На рис.7 приведена осциллограмма, снятая в режиме однократной развертки. Чётко виден случай срыва фазы колебаний. Среднее значение "времени жизни" ~ 10 периодов. Отметим, что после срыва фазы амплитуда колебаний нарастает до своей максимальной величины за несколько (3-4) периодов. Откуда можно сделать вывод, что инкремент нарастания неустойчивости сравним с частотой ($\gamma \sim \omega$).

На рис.8 представлена автокорреляционная функция (АКФ) колеба-

ний плотности. Шкала АКФ по оси ординат задана по амплитуде АКФ синусоидального сигнала. Видно, что амплитуда АКФ падает, что указывает на хаотизацию фаз колебаний. Амплитуда АКФ обращается в нуль (полная хаотизация фаз) \sim через 10 периодов. Отметим, что АКФ полного сигнала практически совпадает с АКФ первой гармонике.

Таким образом, разные методы измерения дают практически одинаковое время сохранения корреляции фаз ~ 10 периодов.

Отметим, что и АКФ и многократная развертка регистрируют и изменение фазы (в том числе малые) и "расплывание по \vec{k} " (многократная развертка реагирует также на изменения амплитуды), а "время жизни" характеризует только сбой фазы. Близость времени потери корреляции из АКФ и "времени жизни" говорит о том, что "расплывания по \vec{k} " практически нет.

К тому же выводу приводит тот факт, что КФ практически не меняется при изменении расстояния между зондами (за исключением сдвига по фазе). На рис.9 показана КФ, снятая зондами, расположенными под углом 180° . Чётко виден сдвиг фаз на π , а в остальном КФ совпадает с АКФ. Таким образом, можно утверждать, что на расстоянии порядка половины длины волны существенной хаотизации фаз не происходит.

Итак, анализ состояния плазмы при дрейфовой неустойчивости в случае больших амплитуд колебаний $\tilde{n}/n \sim 1$ показывает, что плазма является турбулентной, причём корреляция фаз колебаний сохраняется ~ 10 периодов, а "расплывания по \vec{k} " нет.

Измерение диффузии показано, что коэффициент диффузии растёт с ростом амплитуды колебаний. При электронном слое, когда неустойчивость практически отсутствует и амплитуда колебаний плотности $\tilde{n}/n \ll 10^{-2}$, коэффициент диффузии имеет величину $\ll 10-20 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$. Так как классический коэффициент D_{cl} при этом должен иметь величину $\ll 1 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$, можно предполагать, что измеряемое значение D определяется паразитным потоком на измеритель /15/ и считать его пределом точности измерений.

На рис.10 показана зависимость коэффициента диффузии от ампли-

тудн колебаний. Видно, что D растёт \sim как $(\frac{\delta}{n})^2$. Отметим, что при амплитуде сигнала $\delta/n \sim 0,1$ коэффициент диффузии имеет величину $D \sim 10^2 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$, что совпадает с прежними результатами /5/.

При $\frac{\delta}{n} \sim 1$ D достигает величины $\sim 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$, среднее значение по измерителю $(7,5 \pm 2,5) \cdot 10^2 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$, оценка по продольному градиенту даёт $D \sim 3 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$. Таким образом, коэффициент диффузии \sim на 3 порядка превосходит классический и по абсолютной величине близок к Бомовскому $D_B = \frac{1}{16} \frac{cT}{en} = 2 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$.

Был исследован механизм диффузии поперек магнитного поля. Оказалось, что ток измерителя или ток на зонд вне столба плазмы имеют вид пиков, наблюдающихся в фазе с максимумом плотности в волне (рис. II). Таким образом, поток плазмы поперёк магнитного поля имеет вид выбросов, скоррелированных с колебаниями в дрейфовой волне. Выброс происходит практически одновременно по всей длине столба (нет продольного сдвига фаз) и бежит вместе с волной по азимуту (азимутальный сдвиг фаз выбросов совпадает со сдвигом фаз колебаний плотности). Выброс наблюдался на расстояниях до 5,5 см ($\sim 3R$) от центра столба. Скорость движения выброса поперек поля, определенная по радиальному сдвигу фаз, оказалась равной $\sim 8 \cdot 10^4 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$. Диффузия имеет характер выбросов и при меньших амплитудах.

Отметим, что коэффициент диффузии, определяемый с помощью измерителя или по продольному градиенту плотности, характеризует усредненный поток плазмы поперек магнитного поля. Итак, можно утверждать, что при дрейфовой неустойчивости диффузия носит конвективный характер. Коэффициент диффузии растёт с ростом амплитуды колебаний и при $\frac{\delta}{n} \sim 2$ близок к Бомовскому. Отметим, что вывод о конвективном характере диффузии согласуется с теоретическими представлениями о диффузии при дрейфовой неустойчивости /17/.

Выражаем благодарность В.Н.Цитовичу и Г.М.Заславскому за полезные обсуждения, а также Э.М.Смокотину за помощь в экспериментах.

Л и т е р а т у р а

1. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. Неустойчивость сильно неоднородной плазмы. ЖТФ. Препринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 1966г.
2. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. Исследование турбулентной плазмы при ионно-звуковой неустойчивости, ЖТФ. Препринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 1966г.
3. Н.С.Бучельникова. Ядерный синтез 4, 165, 1964.
4. Н.С.Бучельникова. Теплофизика высоких температур 2, 309, 1964.
5. Н.С.Бучельникова. Ядерный синтез 2, 1966.
6. Н.С.Бучельникова. Доклад на УП международной конференции по явлениям в ионизованных газах. Белград, 1965.
7. А.В.Недоспасов, С.С.Соболев. ПТЭ, 1966. Доклад на УП международной конференции по явлениям в ионизованных газах, Белград, 1965.
8. Б.С.Синичин. Автоматические корреляторы. Новосибирск, 1964.
9. Н. Lashinsky. Доклад на УП международной конференции по физике плазмы и исследованиям в области управляемого термоядерного синтеза. КАЛЭМ, 1965.
10. Л.Д.Ландау, Е.М.Лифшиц. Механика сплошных сред. Москва. Гостехиздат, 1953.
11. Л.С.Богданкевич, А.А.Рухадзе, В.П.Силин. Радиофизика 5, 1098, 1962.
12. S. Ichimaru, D.Pines, N.Rostoker. Phys. Rev. Lett. 8, 231, 1962.
13. И.А.Ахизер. Диссертация. Харьков, 1965.

14. Б.Б.Кадошцев. "Plasma Physics", стр.543, Vienna, 1965.

15. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. Диффузия при неустойчивости сильнонеоднородной плазмы. ИТФ. Препринт ИЯФ СО АН СССР, Новосибирск, 1966.

16. D. Bohm, E. Vuzhop et. al. "The Characteristics of Electrical Discharges in Magnetic Fields", A. Guthrie, R.K. Wakerling, New York, 1949.

17. Б.Б.Кадошцев. Вопросы теории плазмы, вып.4. Москва, Атомиздат, 1964.

Подписи к рисункам.

Рис. I. а) схема установки:

1-катушки магнитного поля; 2-ионизатор; 3-электрод; 4-напылитель; 5-подвижный зонд; 6-измеритель диффузии; I - IV - азимутальные зонды.

б) измеритель диффузии:

$$l = 28 \text{ мм}; \quad d = 8 \text{ мм}; \quad h = 40 \text{ мм}.$$

Рис. 2. Блок-схема коррелографа.

Рис. 3. Спектр колебаний при малых амплитудах:

$$H = 1000 \text{ э}; \quad n = 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}; \quad \kappa/n \sim 0,1.$$

Рис. 4. Спектр колебаний при больших амплитудах:

$$H = 1000 \text{ э}; \quad n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}; \quad \kappa/n \sim 0,5.$$

Рис. 5. Колебания плотности (многократный запуск). Верхняя кривая - полный сигнал (стрелкой указан нулевой уровень); нижняя кривая - колебания на частоте первой гармоники.

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

Рис. 6. Модуляция колебаний верхней части спектра. Верхний луч - колебания плотности, нижний - $f = 90 \text{ кгц}$ $H = 800 \text{ э}; n = 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Рис. 7. Колебания плотности (одноразовый запуск). Верхняя кривая - полный сигнал (стрелкой указан нулевой уровень); нижняя кривая - колебания на частоте первой гармоники $H = 1000 \text{ э}; n = 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

Рис. 8. АКФ полного сигнала.

Рис. 9. КФ полного сигнала. Расстояние между зондами 180° .

Рис. 10. Зависимость коэффициента диффузии от амплитуды колебаний $H = 1000 \text{ э}$.

Рис. II. Корреляция тока измерителя диффузии с колебаниями плотности. Верхняя кривая - колебания плотности; нижняя кривая - ток измерителя (стрелками указаны нулевые уровни): $H = 1000 \text{ э}; n = 3 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}$.

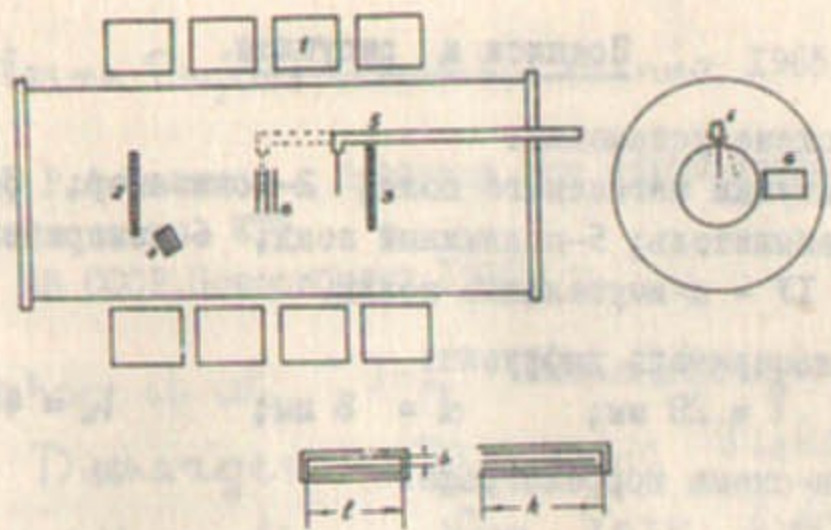


Рис. 1.

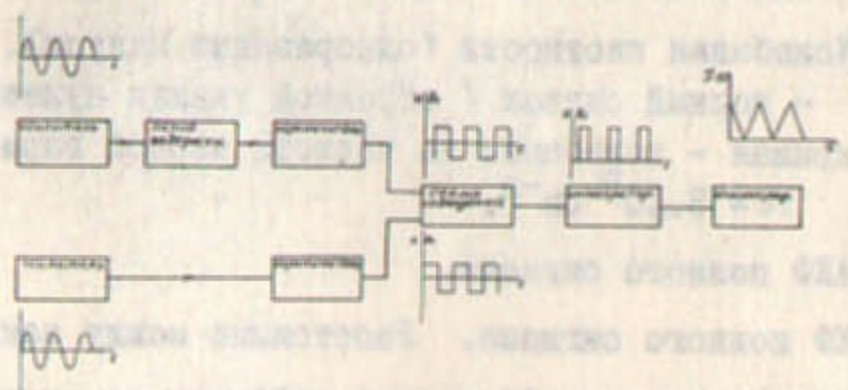


Рис. 2.

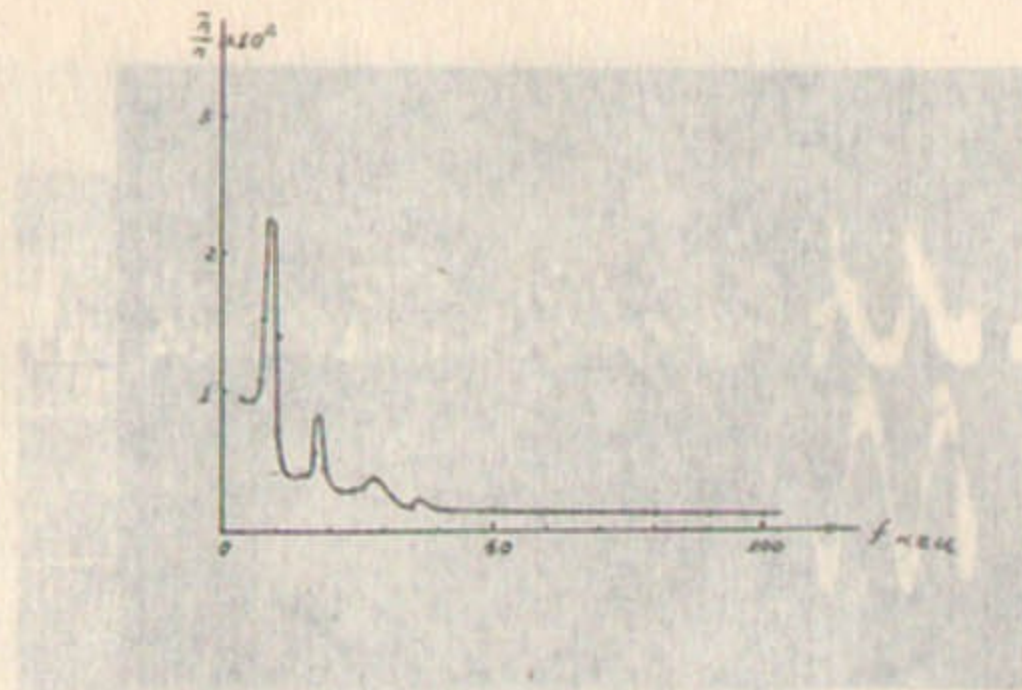


Рис. 3.

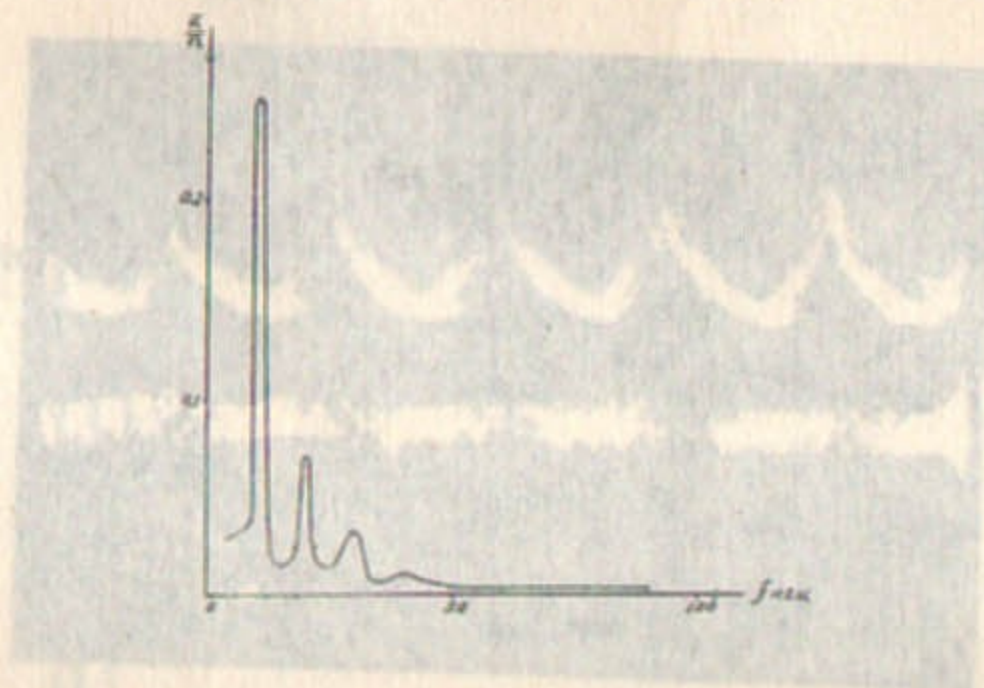


Рис. 4.

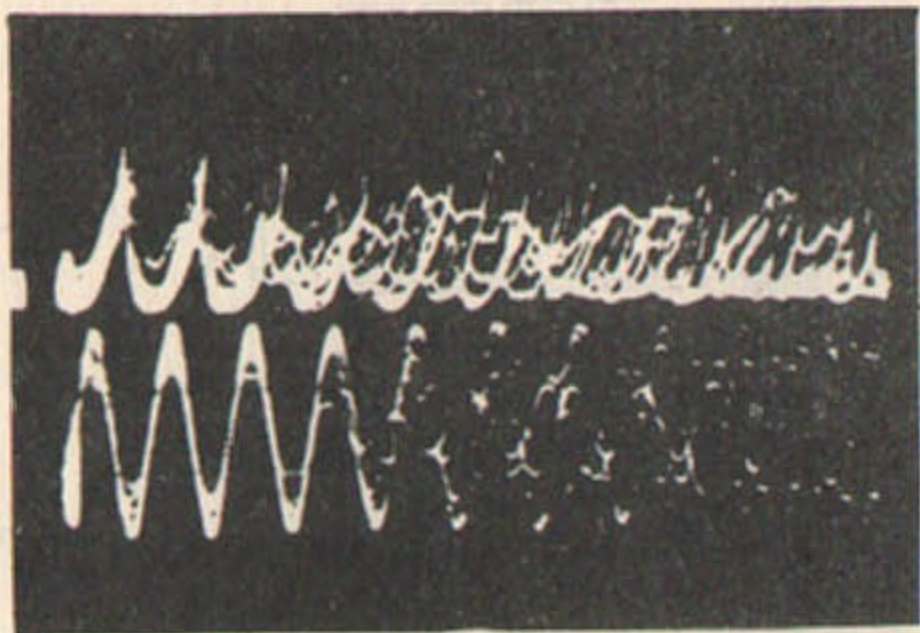


Рис. 5.



Рис. 6.

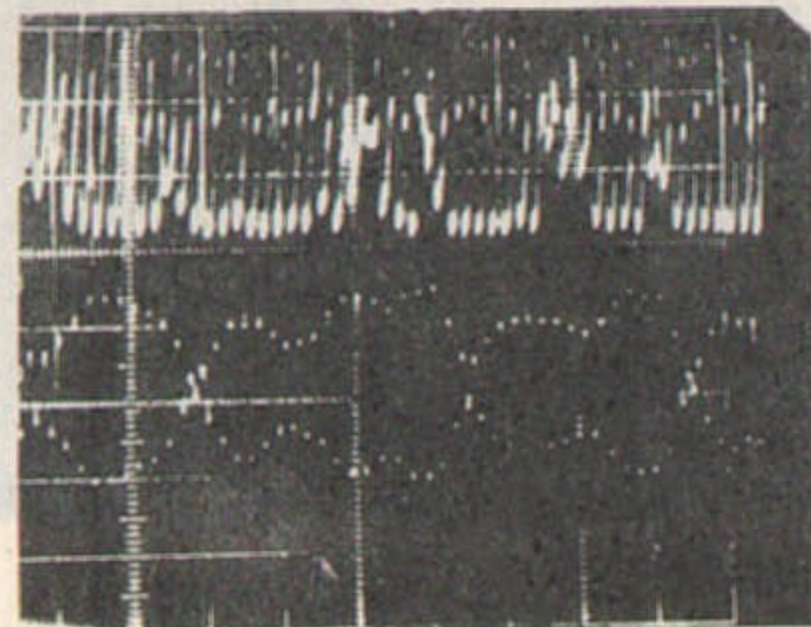


Рис. 7.

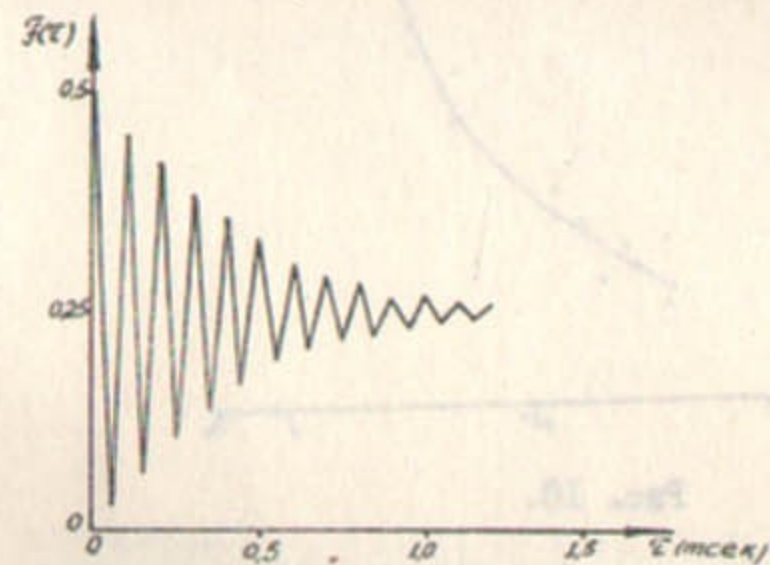


Рис. 8.

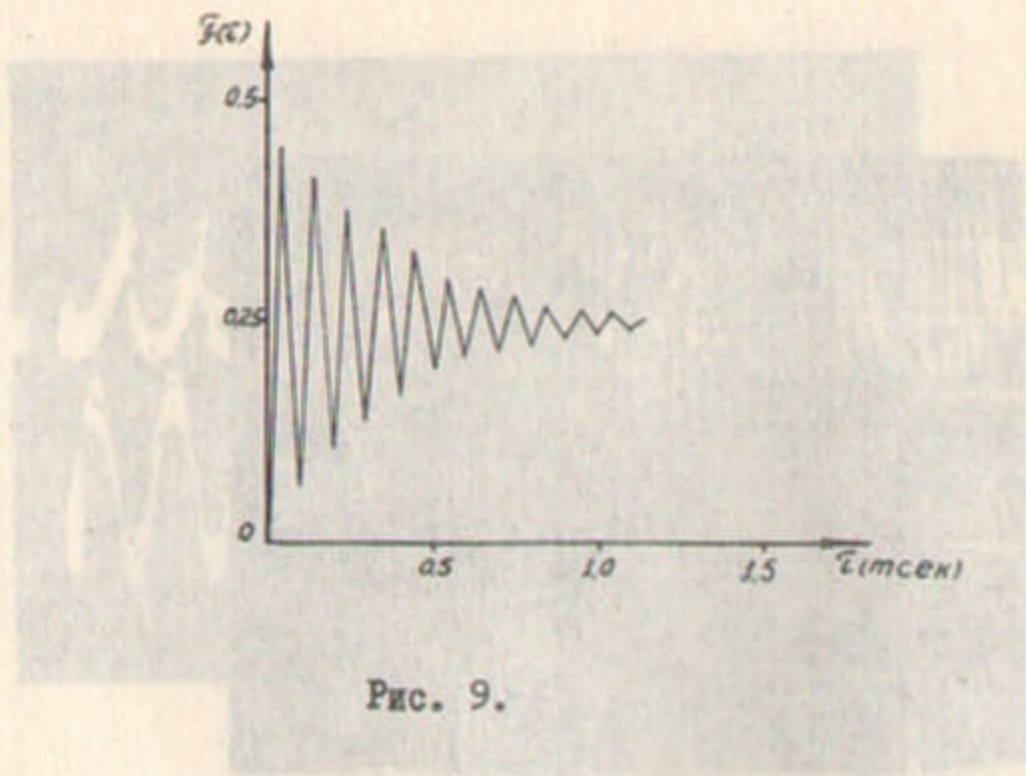


Рис. 9.

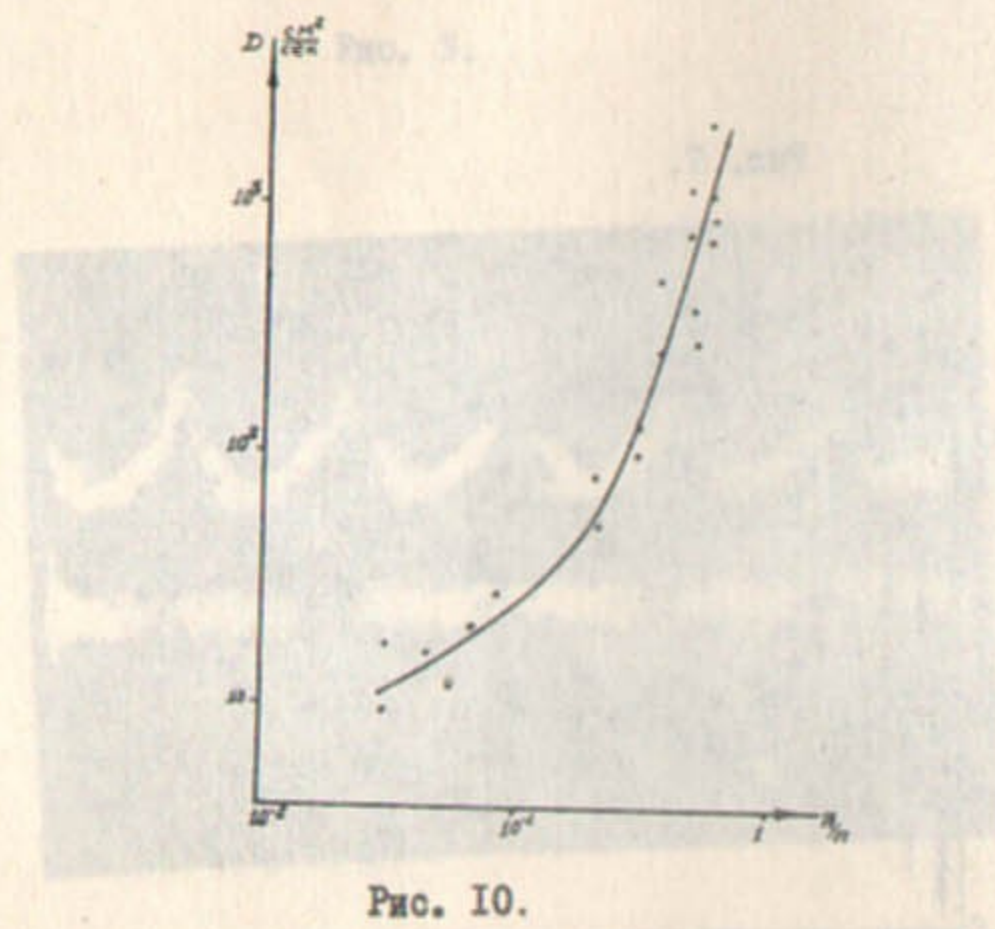


Рис. 10.

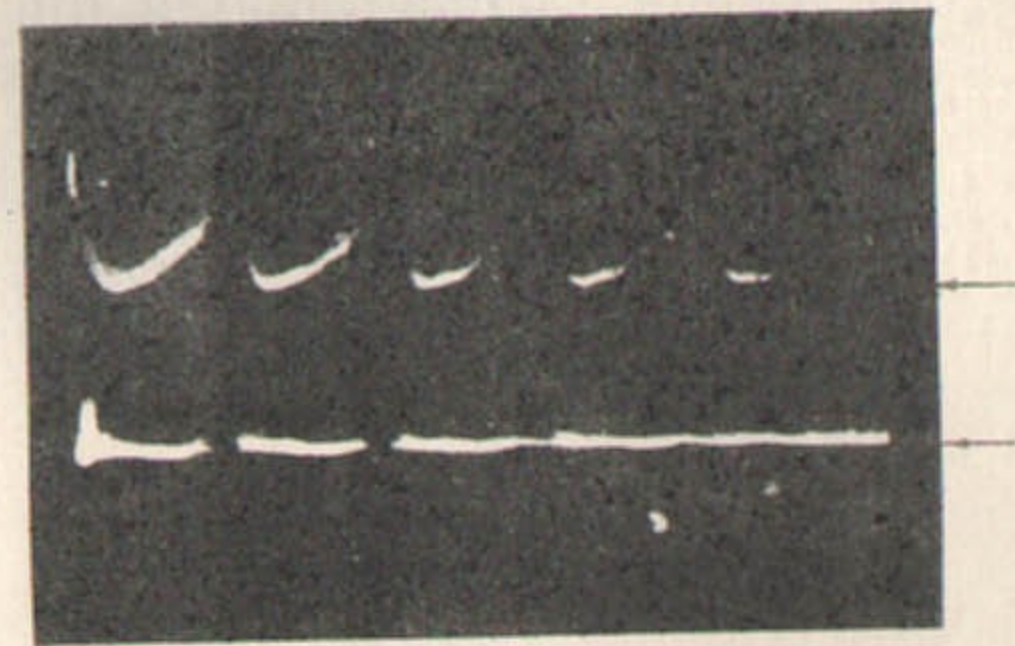


Рис. 11.

Одобрено в печать 1.11.1954 г.
 Тираж 500 экз. Издательство ЦАГИ.
 17.07.54. № 1.
 Подписано в печать 1.11.54 г.