

ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СИБИРСКОГО ОТДЕЛЕНИЯ АН СССР

препринт

138

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

**Неустойчивость плазмы  
с различной степенью неоднородности**

г.Новосибирск 1967

Препринт

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ

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

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПЛАЗМЫ С РАЗЛИЧНОЙ СТЕПЕНЬЮ НЕОДНОРОДНОСТИ

Новосибирск  
1967

### А Н Н О Т А Ц И Я

Исследована неустойчивость неоднородной плазмы при изменении степени неоднородности. Показано, что в слабо-неоднородной плазме возбуждаются дрейфовые волны, переходящие в случае сильной неоднородности в азимутальные ионно-звуковые. Исследовано состояние плазмы и диффузия поперёк магнитного поля при развитой ионно-звуковой неустойчивости.

В работах /1-3/ на установке Ц-1 /4/ исследовалась дрейфовая неустойчивость неоднородной по плотности калиевой плазмы в случае, когда ларморовский радиус ионов меньше размеров системы ( $\rho_i < R$ ). Неустойчивость сильнонеоднородной плазмы ( $\rho_i \geq R$ ) исследовалась на аналогичной установке Ц-2 в работах /5-7/.

Настоящая работа, выполненная на установке Ц-1, посвящена исследованию перехода от случая  $\rho_i < R$  к случаю  $\rho_i \geq R$ , изучению неустойчивости в случае  $\rho_i \geq R$ , исследованию турбулентного состояния плазмы и диффузии поперек магнитного поля при неустойчивости сильно-неоднородной плазмы.

I. Плазма образуется при термической ионизации калия на вольфрамовой пластине (ионизаторе) радиусом 2-2,5 см, нагретой до температуры  $\sim 2000^\circ\text{K}$ . Вторая пластина, расположенная на расстоянии  $L \sim 36$  см от первой, не нагревается. Плотность в такой системе максимальна на оси и спадает по радиусу. Диаметр плазменного столба  $d$  можно изменять в пределах от 5 до 0,7 см с помощью ирисовой диафрагмы, расположенной в 2 см от ионизатора.

Эксперименты проводились при плотности плазмы  $10^9 - 10^{10} \text{ см}^{-3}$  и магнитных полях 400-3000 э.

Плотность плазмы и амплитуда колебаний измерялись лэнгмюровским зондом по постоянной и переменной составляющим ионного тока насыщения соответственно /2/. Спектр колебаний исследовался с помощью анализатора гармоник С5-2 (полоса  $\sim 200$  гц), регистрирующего эффективную амплитуду.

При исследовании состояния плазмы определялась знаковая

корреляционная функция  $F(r)$  (с помощью автоматического коррелографа /3,7-9/) и проводился качественный корреляционный анализ /3,6,10/.

Для определения коэффициента диффузии  $D$  измерялся поток плазмы  $(nv)_z$  поперек магнитного поля /2/. В некоторых экспериментах величина  $D$  оценивалась по продольному градиенту плотности плазмы  $dn/dz$  /9/.

Отметим, что установка Ц-2, на которой были выполнены эксперименты /5-7/, отличается от Ц-1 геометрией и диапазоном магнитных полей. Для Ц-2  $d = 2$  см,  $L \sim 20$  см,  $H \sim 400-1200$  э. Профиль плотности  $n(r)$  в этом случае существенно зависит от режима напыления калия. Полуширина  $n(r)$  на установке Ц-2, как правило, меньше, чем на Ц-1 при том же  $d = 2$  см.

2. В экспериментах /1-3/, выполненных на установке Ц-1 при  $d = 4$  см ( $\rho_i < R$ ), наблюдалась дрейфовая неустойчивость, проявляющаяся в возбуждении потенциальных волн, имеющих азимутальную и продольную составляющие. Волны являются стоячими по оси, причем  $\lambda_z \sim 2L$ ,  $v_i < v_z < v_e$  ( $v_z$  - продольная фазовая скорость волны,  $v_i$ ,  $v_e$  - тепловые скорости ионов и электронов), и бегущими по азимуту. Направление распространения волн совпадает с направлением дрейфа электронов. Длины волн гармоник кратны длине окружности плазменного цилиндра, так что фазовые скорости их одинаковы. Частота колебаний  $\sim$  обратно-пропорциональна магнитному полю и по абсолютной величине близка к дрейфовой  $\omega^* \sim k_y \frac{cTe}{eH} \frac{dn/dr}{n}$  (наблюдаемая частота несколько превышает расчетную, но не более, чем в 1,5 раза).

Найдено, что состояние плазмы при развитой дрейфовой неустойчивости является турбулентным /3/, причем время корреляции фаз колебаний составляет  $\sim 10$  периодов колебаний.

Коэффициент поперечной диффузии  $D$  растет пропорционально квадрату амплитуды колебаний  $\tilde{n}/n$  и при развитой неустойчивости ( $\tilde{n}/n \sim 1$ ) достигает величины  $\sim 10^3$  см<sup>2</sup>/сек ( $H = 1000$  э; при этом  $D_{ei} \leq 10 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$ ,  $D_{am} = \frac{1}{16} \frac{cTe}{eH} \sim 2 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$ ). Коэффициент диффузии обратно-пропорционален квадрату магнитного поля. Показано, что диффузия имеет конвективный характер.

3. В экспериментах /5-7/, выполненных на установке Ц-2, где плазма является сильно-неоднородной ( $\rho_i \geq R$ ) наблюдалась неустойчивость, проявляющаяся в возбуждении волн того же типа, что и в предыдущем случае. Действительно, волны являются стоячими по оси, причем  $\lambda_z \sim 2L$ ,  $v_i < v_z < v_e$  и бегущими по азимуту в направлении электронного дрейфа. Фазовые скорости гармоник одинаковы и близки по величине к скорости ионного звука. Однако, частота колебаний в этом случае не зависит от магнитного поля и по абсолютной величине близка к частоте азимутальных ионно-звуковых волн  $\omega \sim k_y c_s$ .

Оказалось, что состояние плазмы при развитой неустойчивости является турбулентным; время корреляции фаз колебаний при этом  $\sim 5-6$  периодов /7/. Коэффициент поперечной диффузии пропорционален квадрату амплитуды колебаний и при развитой неустойчивости ( $\tilde{n}/n \sim 1$ ) как по величине, так и по зависимости от магнитного поля ( $D \propto H^{-1}$ ) близок к Бомовскому. Диффузия при этом имеет конвективный характер.

4. Сравнение результатов работ /1-3/ и /5-7/ показывает, что характер неустойчивости, по-видимому, определяется степенью неоднородности плотности плазмы. Действительно, хотя неустойчивости в обоих случаях проявляются в возбуждении волн подобного типа, частота колебаний в первом случае ( $\rho_i < R$ )  $\omega \sim \omega^*$ , а во втором ( $\rho_i \geq R$ )  $\omega \sim k_y c_s$ .

В настоящей работе выяснялось, действительно ли степень неоднородности определяет характер неустойчивости. Исследовалось, представляют ли наблюдавшиеся неустойчивости независимые ветки или при изменении неоднородности могут переходить одна в другую. Исследовалась неустойчивость сильно-неоднородной плазмы при больших, чем в /5/7/ отношениях  $\rho_i/R$  и в более широком диапазоне магнитных полей.

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Измерения проводились при изменении диаметра плазменного столба. На рис.1 показана зависимость частоты колебаний от полуширины столба  $\phi$  ( $\phi \leq d$ ). Видно, что частота плавно возрастает при уменьшении полуширины, причем  $f \propto \phi^{-1} \propto R^{-1}$  ( $H = 1000$  э).

2. Характер возбуждающихся волн сохраняется при изменении диаметра: волны азимутальные, распространяются в сторону электронного дрейфа, имеют продольную составляющую с  $v_1 < v_2 < v_e$ , длины волн гармоник кратны  $\pi d$ , т.е. их азимутальные фазовые скорости одинаковы.

3. Зависимость частоты колебаний от магнитного поля меняется при изменении диаметра. Из рис.2 видно, что при малом диапазоне частота практически не зависит от магнитного поля, а при большом  $f \propto H^{-1}$ . В таблице I для разных значений диаметра приведена величина коэффициента  $k$ , характеризующего степень зависимости  $f(H) (f \propto H^{-k})$ , а также значения коэффициента  $\alpha = 2\pi / R$  при нескольких значениях магнитного поля и параметра неоднородности  $a = (dn/dr / n)^{-1}$  в максимуме градиента плотности  $dn/dr$ .

Таблица I

$d$ см	0,7	0,9	1,6	2,8	3,8	5,0
$k$	0	0	0,3	0,4	0,7	1,0
$\alpha$ ( $H = 400$ э)	5,3	4,3	2,3	1,3	1,0	0,7
$\alpha$ ( $H = 1000$ э)	2,1	1,7	0,9	0,5	0,4	0,3
$\alpha$ ( $H = 2000$ э)	1,1	0,9	0,5	0,3	0,2	0,15
$a$ см	0,2	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5

Видно, что при малых диаметрах  $\alpha \gg 1$ , а при больших ( $d$  4-5 см)  $\alpha < 1$  практически во всем диапазоне магнитных полей.

4. При малых диаметрах плазменного столба, когда плазма является сильно-неоднородной подробно исследована возбуждающаяся неустойчивость, состояние плазмы и диффузия при развитой неустойчивости.

Типичный спектр колебаний показан на рис.3. Характер волн

совпадает с описанным в 2. Частота колебаний не зависит от  $H$  так что азимутальная фазовая скорость также не зависит от  $H$ . Величина  $V_{\varphi} \sim 1,3 \cdot 10^5 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$  близка к скорости ионного звука  $c_s = 1,8 \cdot 10^5 \frac{\text{см}}{\text{сек}}$ . Частота колебаний обратно-пропорциональна и по абсолютной величине близка к  $\omega \sim k_y c_s$ , где  $k_y \sim \frac{2}{\phi}$ .

5. Из спектра рис.3 видно, что амплитуда первой гармоники достигает величины  $\bar{n}/n \sim 0,2$ , при этом для полного сигнала  $\bar{n}/n \sim 0,5-0,6$  (напомним, что измеряется эффективная амплитуда). Истинная амплитуда может быть найдена из осциллограммы колебаний плотности, представленной на рис.4 (многократная развертка). Из неё видно, что плотность падает практически до нуля, так что амплитуда достигает величины  $\bar{n}/n \sim 1$ . Из этой же осциллограммы видно, что колебания носят шумовой характер, причем хаотизация фаз наступает через 3-4 периода колебаний. Осциллографирование в режиме многократного запуска показывает, что на всех частотах спектра, включая гармоники, колебания являются шумовыми. Так на рис.5 приведены осциллограммы для первой гармоники, из которых четко виден шумовой характер колебаний и хаотизация фаз через 5-6 периодов.

На рис.6 приведена осциллограмма колебаний плотности на частоте первой гармоники, снятая в режиме однократного запуска. Отчетливо видны случаи срыва фазы колебаний. Среднее значение "времени жизни"  $\sim 5-6$  периодов. После срыва фазы амплитуда колебаний за несколько периодов нарастает до своей максимальной величины, откуда можно сделать вывод, что инкремент нарастания неустойчивости сравним с её частотой ( $\gamma \sim \omega$ ).

На рис.7 представлена АКФ колебаний 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 ноль (полная хаотизация) через  $\sim 5-6$  периодов.

6. В согласии с тем, что было показано ранее [3,6,7], меняя характер слоя у поверхности ионизатора можно менять амплитуду колебаний неустойчивости, причем амплитуда колебаний минимальна в случае электронного слоя. Измерение коэффициента диффузии показало, что коэффициент поперечной диффузии падает с уменьшением

амплитуды. При малых амплитудах колебаний (электронный слой) имеет величину  $\lesssim 50 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$ , что дает предел точности измерений, определяющийся паразитным потоком на измеритель /7/ ( $\mathcal{D}$  при этом  $\lesssim 10 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$ ). На рис.8 показана зависимость  $\mathcal{D}$  от амплитуды колебаний (приведена максимальная по радиусу амплитуда). Из него видно, что  $\mathcal{D} \propto (\tilde{n}/n)^2$ . Среднее значение  $\mathcal{D}$  в случае развитой неустойчивости ( $\tilde{n}/n \sim 1$ ) при  $H \sim 1000$  э достигает величины  $\sim (1,1 \pm 0,2) \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$  ( $d \approx 9$  мм). Оценка значения  $\mathcal{D}$  по продольному градиенту плотности плазмы в этом случае даёт  $\mathcal{D} \sim (1,6 \pm 0,6) \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$ . Как видно из рис.9 в случае развитой неустойчивости  $\mathcal{D} \propto H^{-1}$ . Таким образом, как по абсолютной величине, так и по зависимости от  $H$  коэффициент поперечной диффузии близок к Бомовскому ( $\mathcal{D}_{\text{Бом}} \sim 2 \cdot 10^3 \frac{\text{см}^2}{\text{сек}}$  при  $H = 1000$  э).

Для исследования механизма диффузии снимались осциллограммы колебаний плотности в столбе плазмы и тока измерителя. В электронном слое (малые амплитуды колебаний неустойчивости) ток на измеритель мал по величине и постоянен во времени (рис.10). При развитой неустойчивости ( $\tilde{n}/n \sim 1$ ) ток на измеритель имеет вид пиков, скоррелированных с колебаниями плотности (рис.11). При этом максимумы тока наблюдаются в фазе с максимумами плотности. Таким образом, поток плазмы поперёк магнитного поля имеет вид выбросов, скоррелированных с колебаниями в 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). Диффузия имеет характер выбросов и при меньших амплитудах. При увеличении магнитного поля амплитуды выбросов падают  $\sim$  обратно пропорционально  $H$ .

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

1. Сравнение результатов, полученных в настоящих экспериментах в случае малых диаметров плазменного столба (так что  $\rho_i \gtrsim R$ ) с экспериментами на установке Ц-2 /5-7/ показывает, что в обоих случаях возбуждаются волны одного типа, при этом характеристики колебаний (абсолютные значения частот при одинако-

вых  $\phi$ , зависимости  $f(H)$ ,  $f(\phi)$ , направление распространения волн, их фазовые скорости и т.д.) совпадают. Это означает, что в настоящих экспериментах в случае  $\rho_i \gtrsim R$  развивается та же неустойчивость, что и наблюдавшаяся ранее, т.е. при малых диаметрах плазменного столба (в том числе в случаях более сильной неоднородности, чем на установке Ц-2) возбуждаются волны типа азимутальных ионно-звуковых.

2. Как видно из рис.1 при изменении диаметра столба плазмы частота плазменных колебаний меняется плавно ( $\propto R^{-1}$ ), при этом зависимость  $f(H)$  также меняется (рис.2), так что в области больших диаметров  $\omega \sim \omega^*$ , а в области малых -  $\omega \sim k_y c_s$ .

Следует отметить, что для дрейфовых колебаний можно было ожидать зависимости  $f(R) \propto R^{-2}$  (если  $k_y \propto R^{-1}$  и  $a^2 \propto 1/R$ ). В настоящем эксперименте оказалось, что при больших диаметрах  $a \approx \text{const}$  (табл.1), так что ожидаемая зависимость  $f(R) \propto R^{-1}$  согласуется с наблюдаемой. При малых диаметрах  $a$  меняется, однако, зависимость  $f \propto R^{-1}$  сохраняется, что согласуется с предположением об ионно-звуковой природе колебаний в этой области. Малые значения  $a$  (табл.1) наблюдались только в данном эксперименте. В экспериментах /1-3/, /5-7/, как правило,  $a \sim R/2$ .

Степень неоднородности плазмы, по-видимому, имеет смысл характеризовать отношением ионного ларморовского диаметра к параметру неоднородности. Считая  $a \sim R$ , введем параметр  $\alpha = 2\rho_i/R$ , приведенный в табл.1. Зная, что при  $d \gtrsim 4$  см возбуждается дрейфовая неустойчивость, а при  $d \lesssim 1$  см ионно-звуковая, можно приблизительно оценить граничные параметры: для возбуждения дрейфовой неустойчивости  $\alpha < 0,6$ , для возбуждения ионно-звуковой  $\alpha > 1$ . Промежуточная область соответствует переходу одного типа волн в другой, возбуждающаяся здесь неустойчивость отличается и от дрейфовой и от ионно-звуковой. По-видимому, именно эта переходная область наблюдалась в экспериментах /11/. При данном диаметре степень неоднородности, естественно, меняется при изменении магнитного поля. Таким образом, характер неустойчивости может меняться при изменении  $H$ , если  $\alpha$  во всем диапазоне не является достаточно малой или достаточно большой величиной.

Оценка граничных параметров, конечно, является довольно произвольной. Однако, на основании проведенных экспериментов можно с уверенностью утверждать, что характер неустойчивости неоднородной по плотности плазмы зависит от степени неоднородности. При  $\alpha \ll 1$  возбуждается дрейфовая неустойчивость, а при  $\alpha \gtrsim 1$  — ионно-звуковая. При изменении  $\alpha$  эти неустойчивости плавно переходят одна в другую, т.е. они не являются независимыми ветками.

3. Анализ состояния плазмы при развитой ионно-звуковой неустойчивости ( $\tilde{n}/n \sim 1$ ) показывает, что плазма является турбулентной, при этом время корреляции фаз (по основной частоте, т.к. в полном сигнале колебания на частотах первой гармоники являются основными) такое же, как и в /6-7/ и составляет  $\sim 5-6$  периодов колебаний. Согласие результатов с /6,7/ указывает на то, что время корреляции фаз не связано с геометрией установки и является величиной, характерной для данной неустойчивости (напомним, что для дрейфовой неустойчивости оно составляет  $\sim 10$  периодов).

4. В согласии с ранее полученными результатами /7/, коэффициент поперечной диффузии при ионно-звуковой неустойчивости пропорционален квадрату амплитуды колебаний и при  $\tilde{n}/n \sim 1$  по абсолютной величине и зависимости от магнитного поля близок к Бомовскому. Отметим, что в настоящем эксперименте измерения выполнены двумя различными методами, дающими хорошее согласие.

В согласии с /7/ найдено, что диффузия имеет конвективный характер. Хотя механизм диффузии при ионно-звуковой и дрейфовой неустойчивостях сходен, величина коэффициента диффузии и его зависимость от магнитного поля являются характерными для каждой неустойчивости. Действительно, для ионно-звуковой неустойчивости  $D \propto H^{-1}$ , в то время как для дрейфовой  $D \propto H^{-2}$ .

## ЛИТЕРАТУРА

1. Н.С.Бучельникова. Ядерный синтез 4, 165, 1964.
2. Н.С.Бучельникова. Ядерный синтез 6, 122, 1966.
3. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. ЖЭТФ 52, № 4, 1967.
4. Н.С.Бучельникова. ТВТ 2, 309, 1964.
5. Н.С.Бучельникова, А.М.Кудрявцев, Р.А.Салимов. ЖТФ 35, 72, 1965.
6. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. "Неустойчивость сильно-неоднородной плазмы". ЖТФ 37, 1967.
7. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов. "Диффузия при неустойчивости сильно-неоднородной плазмы". ЖТФ 37, 1967.
8. А.В.Недоспасов, С.С.Соболев. *Proc. VII International Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Gravedinska Knijga Publishing House, Beograd, v. II, 633, 1966.*
9. Н.С.Бучельникова, Р.А.Салимов, Ю.И.Эйдельман. ЖЭТФ 52, 387, 1964.
10. Н.С.Бучельникова. *Proc. VII International Conf. on Phenomena in Ionized Gases, Gravedinska Knijga Publishing House, Beograd, v. II, 671, 1966.*
11. P. F. Little, P. J. Barrett. *Proc. Conf. Physics of Quiescent Plasmas, Frascati, v. I, 173, 1967.*

ПОДПИСИ К РИСУНКАМ

Рис.1. Зависимость частоты колебаний неустойчивости от полуширины плазменного столба  $\Phi$  при изменении его диаметра (·)

$$H = 1000 \text{ э.}$$

• - результаты работы /6/  $H = 800 \text{ э.}$

Рис.2. Зависимости частоты колебаний неустойчивости от магнитного поля при разных диаметрах  $d$  плазменного столба

$$\bullet - d = 9,5 \text{ мм; } \times - d = 16 \text{ мм; } \circ - d = 38 \text{ мм;}$$

$$\triangle - d = 50 \text{ мм.}$$

Рис.3. Спектр колебаний

$$d \approx 9 \text{ мм; } H = 1000 \text{ э; } n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}.$$

Рис.4. Колебания плотности (многократный запуск). Стрелкой указан нулевой уровень плотности.

$$d \approx 9 \text{ мм; } H = 1000 \text{ э; } n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}; 10 \frac{\mu\text{сек}}{\text{см}}.$$

Рис.5. Колебания плотности на частоте первой гармоники (многократный запуск).

$$d \approx 9 \text{ мм; } H = 1000 \text{ э; } n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3};$$

$$\text{верхняя кривая} - 10 \frac{\mu\text{сек}}{\text{см}};$$

$$\text{нижняя кривая} - 20 \frac{\mu\text{сек}}{\text{см}}.$$

Рис.6. Колебания плотности на частоте первой гармоники (однократный запуск).

$$d \approx 9 \text{ мм; } H = 1000 \text{ э; } n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}; f \approx 50 \text{ кГц.}$$

Рис.7. Автокорреляционная функция сигнала с зонда (верхняя кривая) и синусоидального сигнала с генератора ( $f \approx 50 \text{ кГц}$ ).

$$d \approx 9 \text{ мм; } H = 1000 \text{ э; } n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}.$$

Рис.8. Зависимость коэффициента диффузии от амплитуды колебаний.

$$d \approx 9 \text{ мм; } H = 1000 \text{ э.}$$

Рис.9. Зависимость коэффициента диффузии от магнитного поля при развитой неустойчивости.

$$d \approx 9 \text{ мм; } n = 4 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}; \tilde{\alpha}/n \sim 1.$$

Рис.10. Корреляция тока измерителя диффузии (нижняя кривая) с колебаниями плотности. Стрелками указаны нулевые уровни.

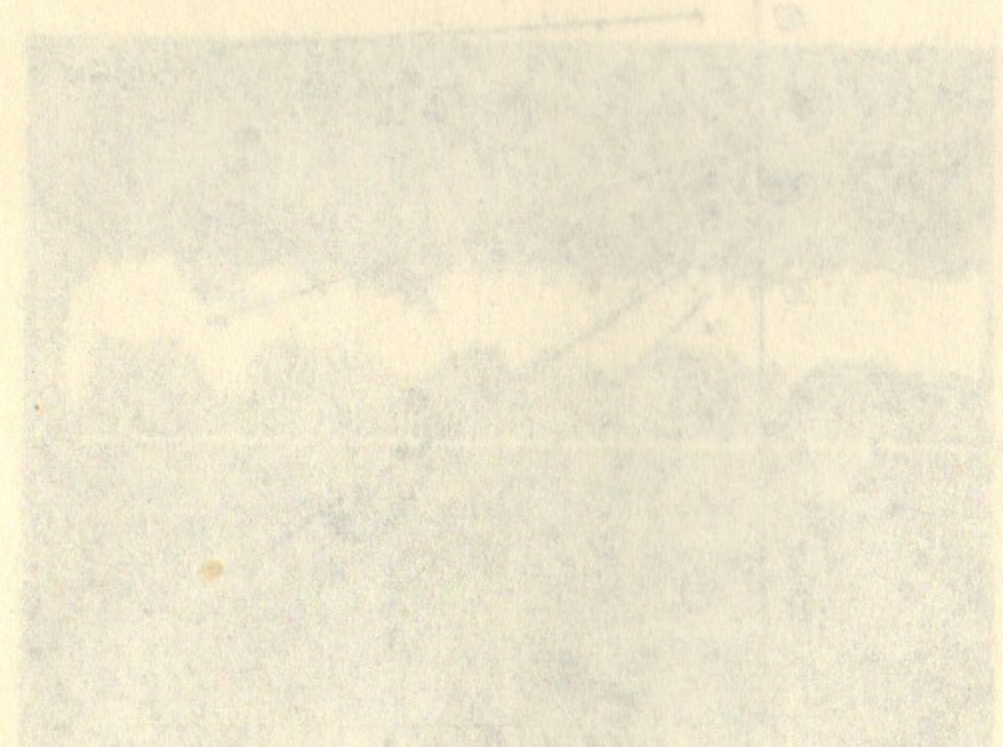
$$d \approx 9 \text{ мм; } H = 1000 \text{ э; } n = 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}; \tilde{\alpha}/n \approx 10^{-2};$$

$$10 \frac{\mu\text{сек}}{\text{см}}.$$

Рис.11. Корреляция тока измерителя диффузии (нижняя кривая) с колебаниями плотности. Стрелками указаны нулевые уровни.

$$d \approx 9 \text{ мм; } H = 1000 \text{ э; } n = 6 \cdot 10^9 \text{ см}^{-3}; \tilde{\alpha}/n \sim 1;$$

$$10 \frac{\mu\text{сек}}{\text{см}}.$$





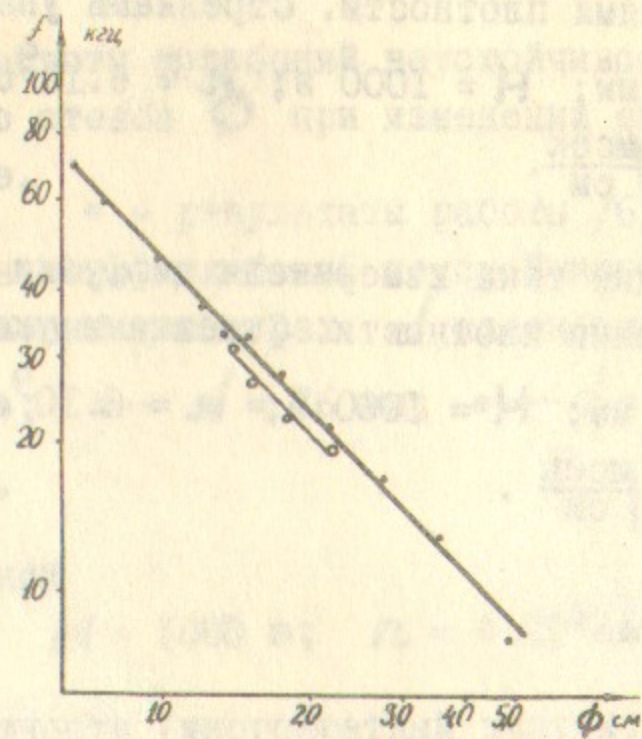


Рис. 1

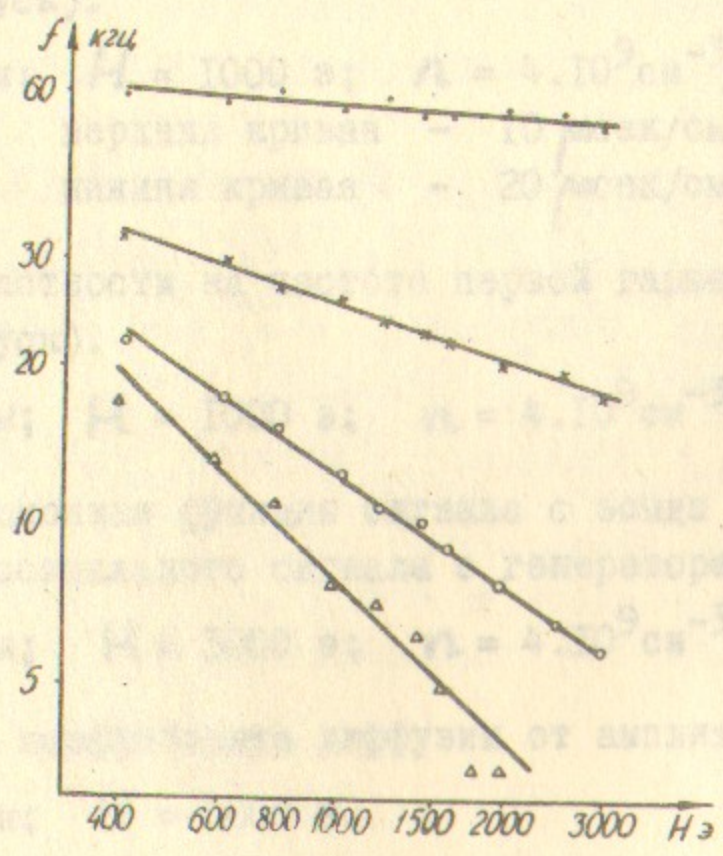


Рис. 2

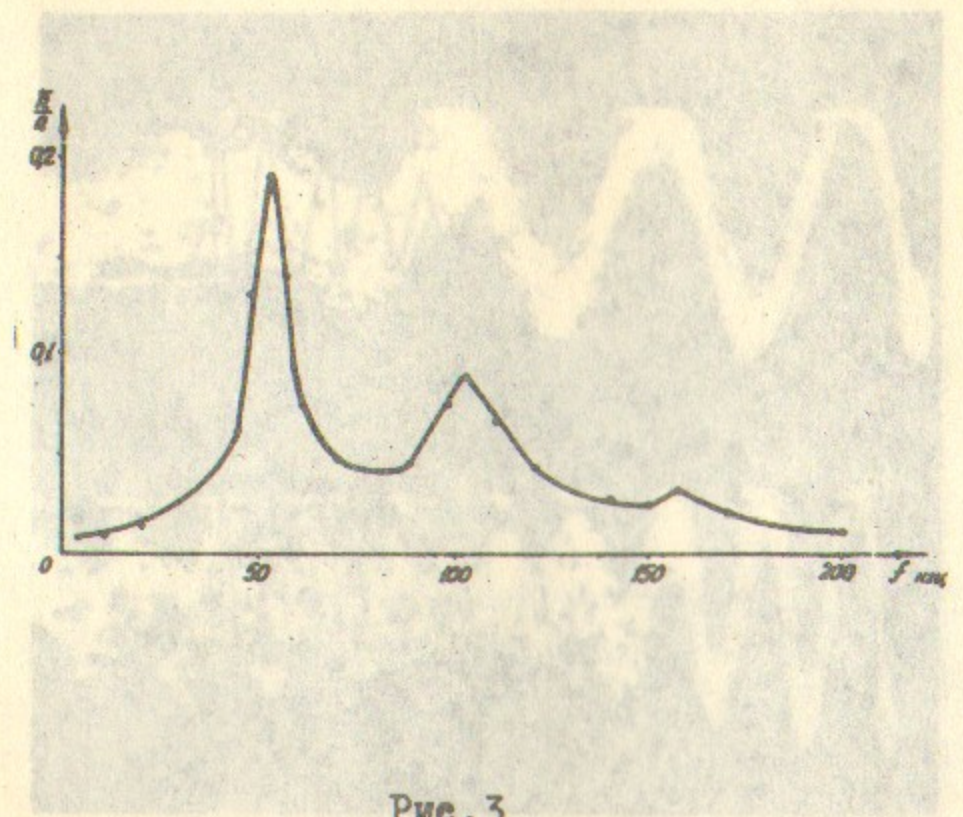


Рис. 3

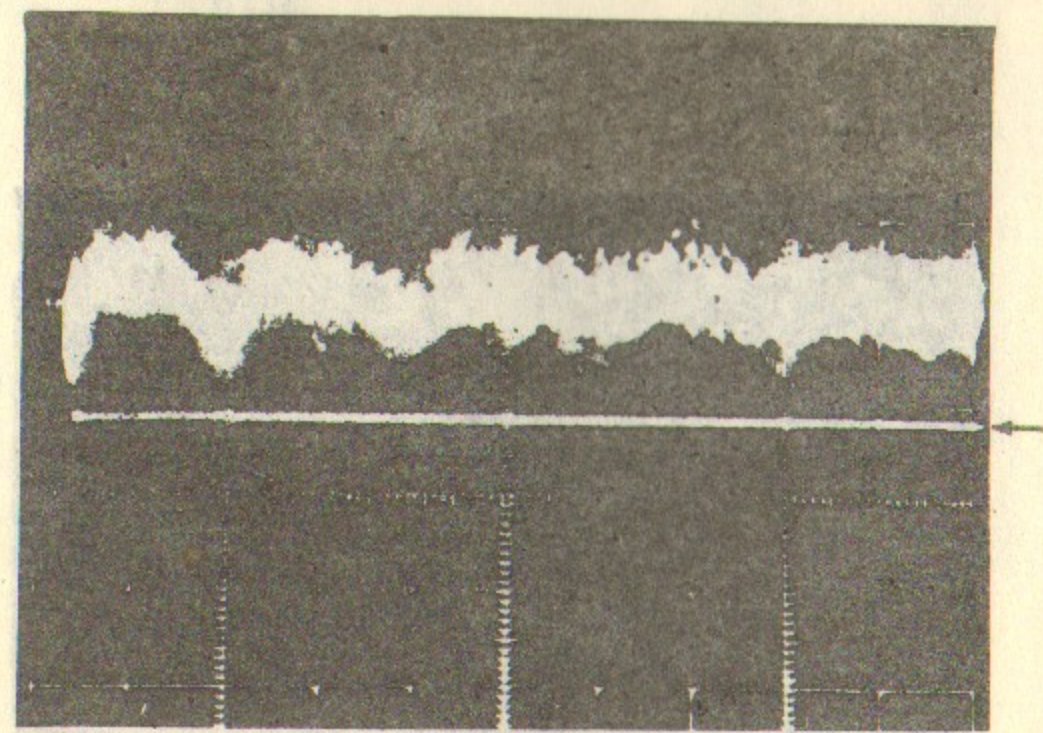


Рис. 4

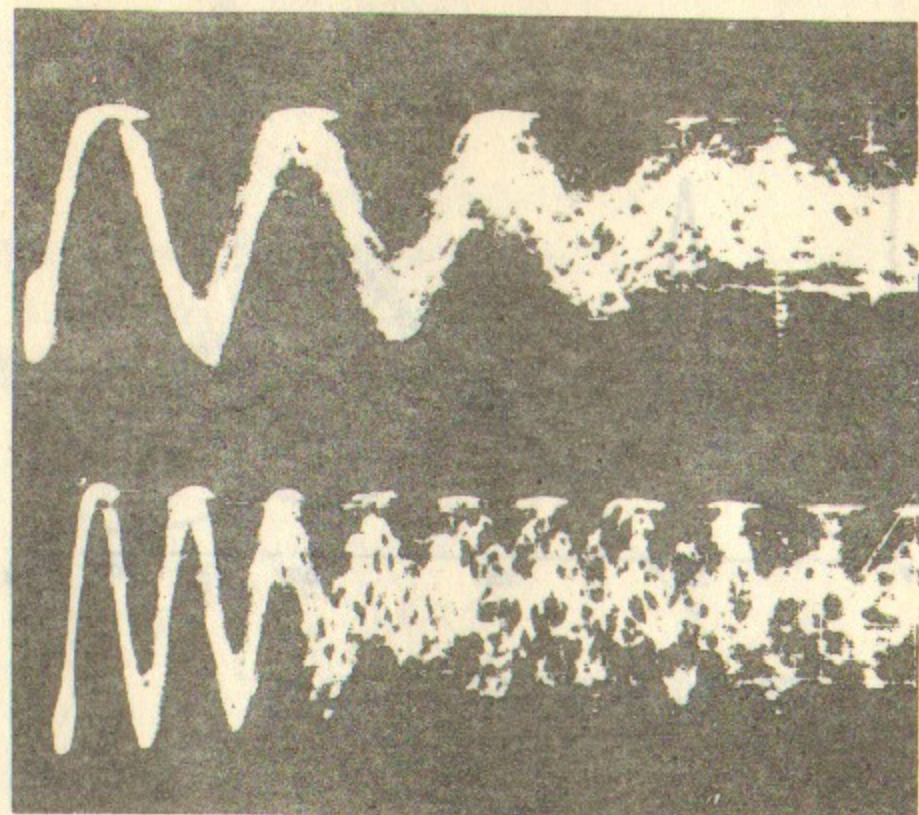


Рис. 5

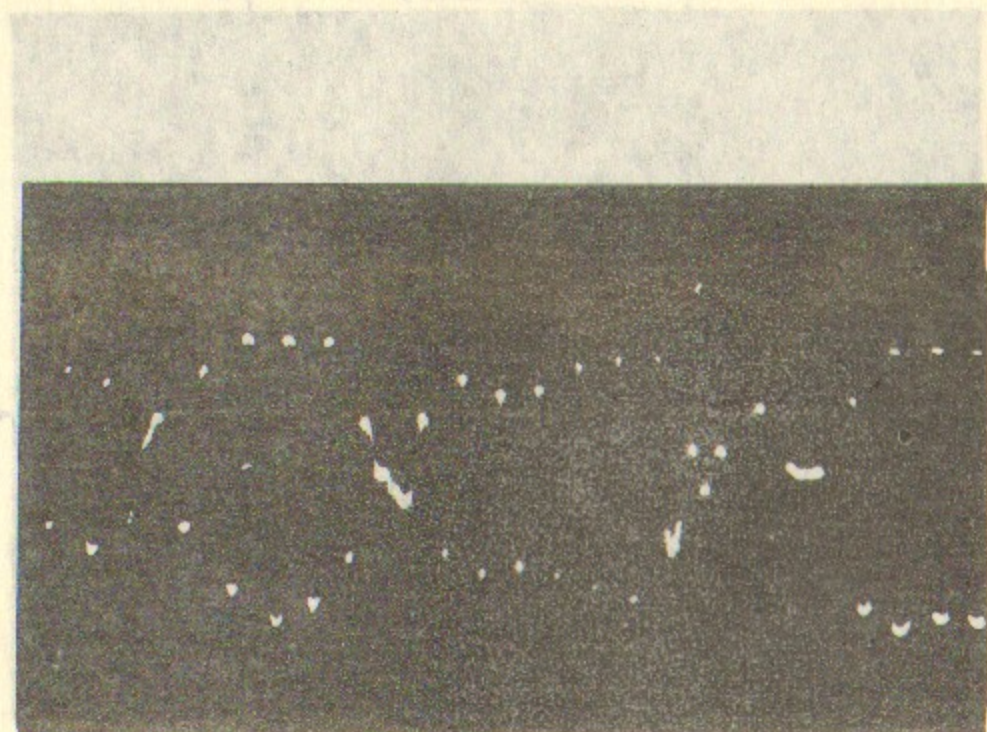


Рис. 6

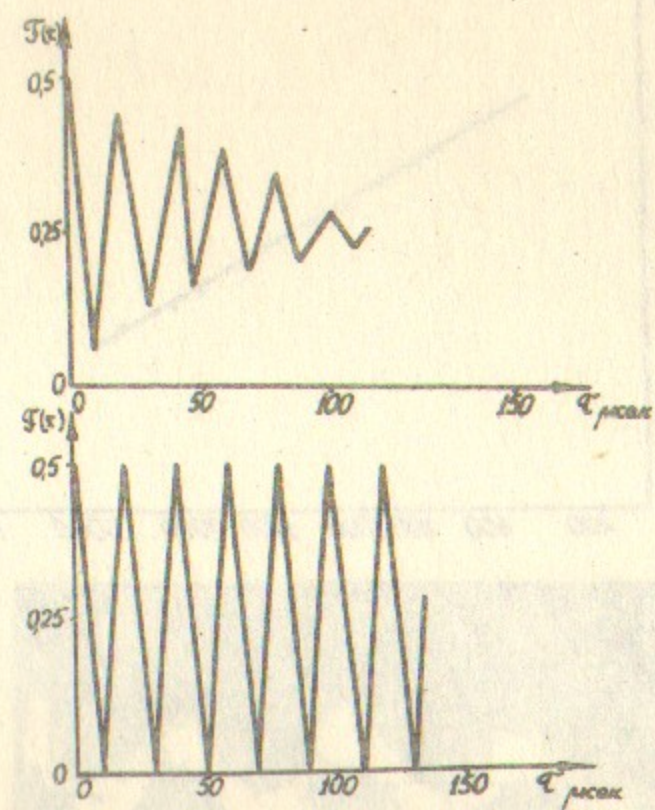


Рис. 7

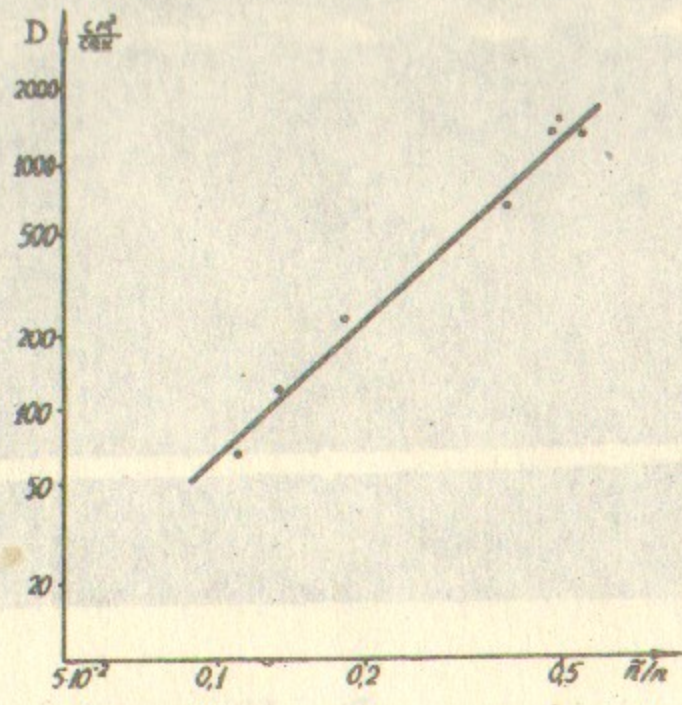


Рис. 8

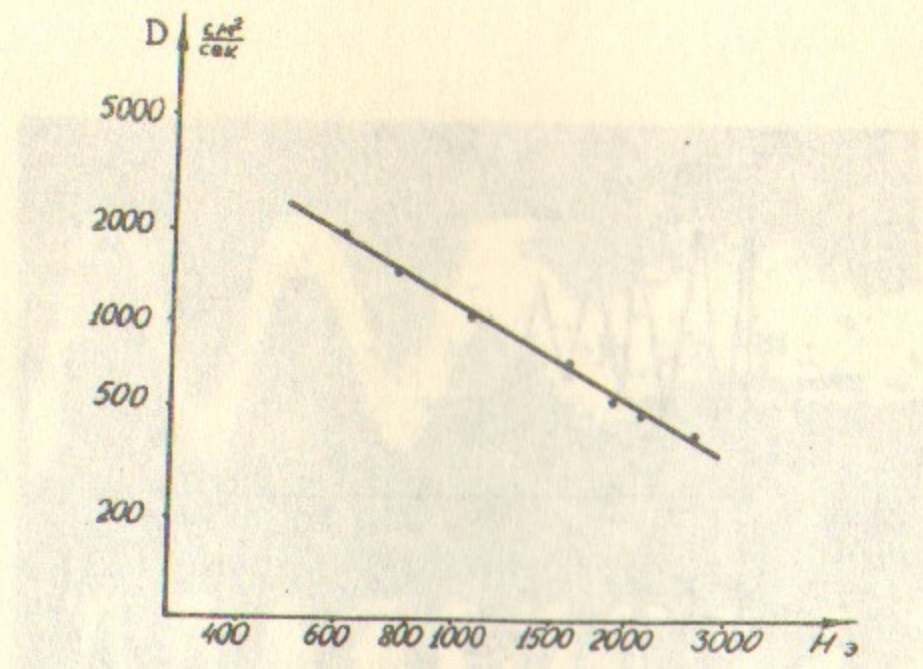


Рис. 9

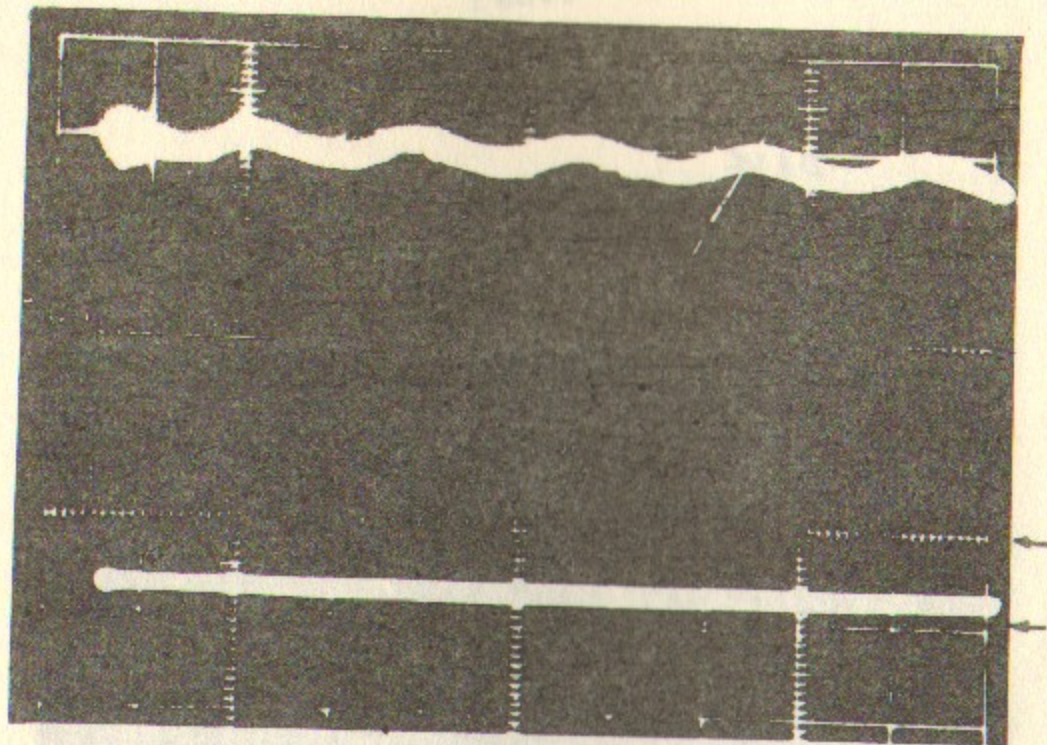


Рис. 10

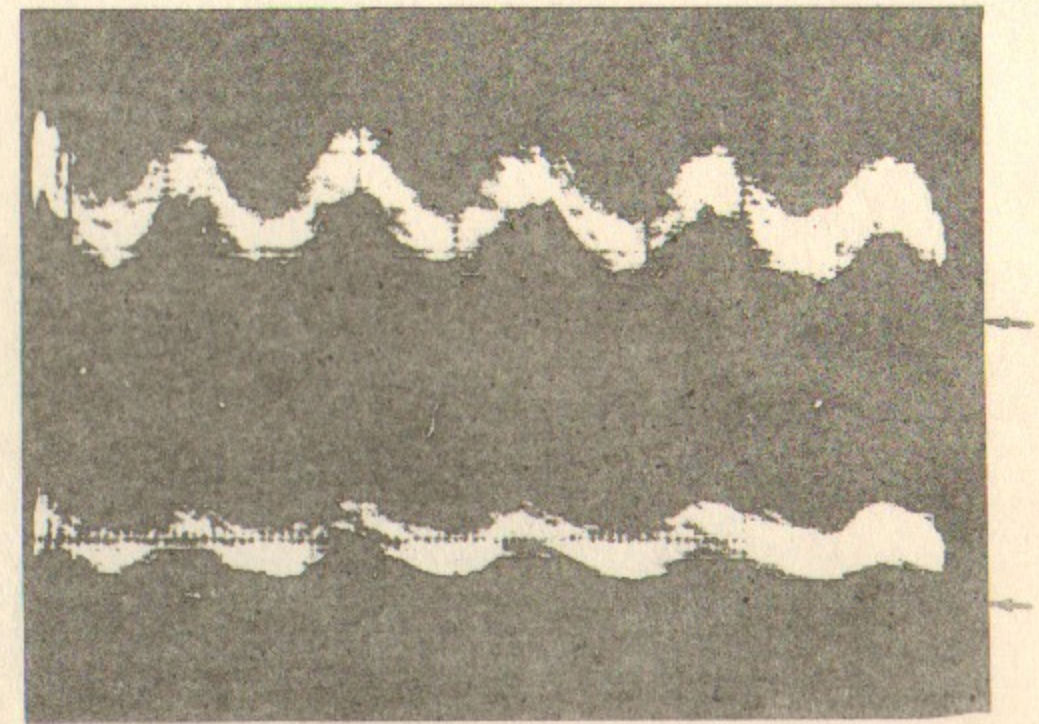
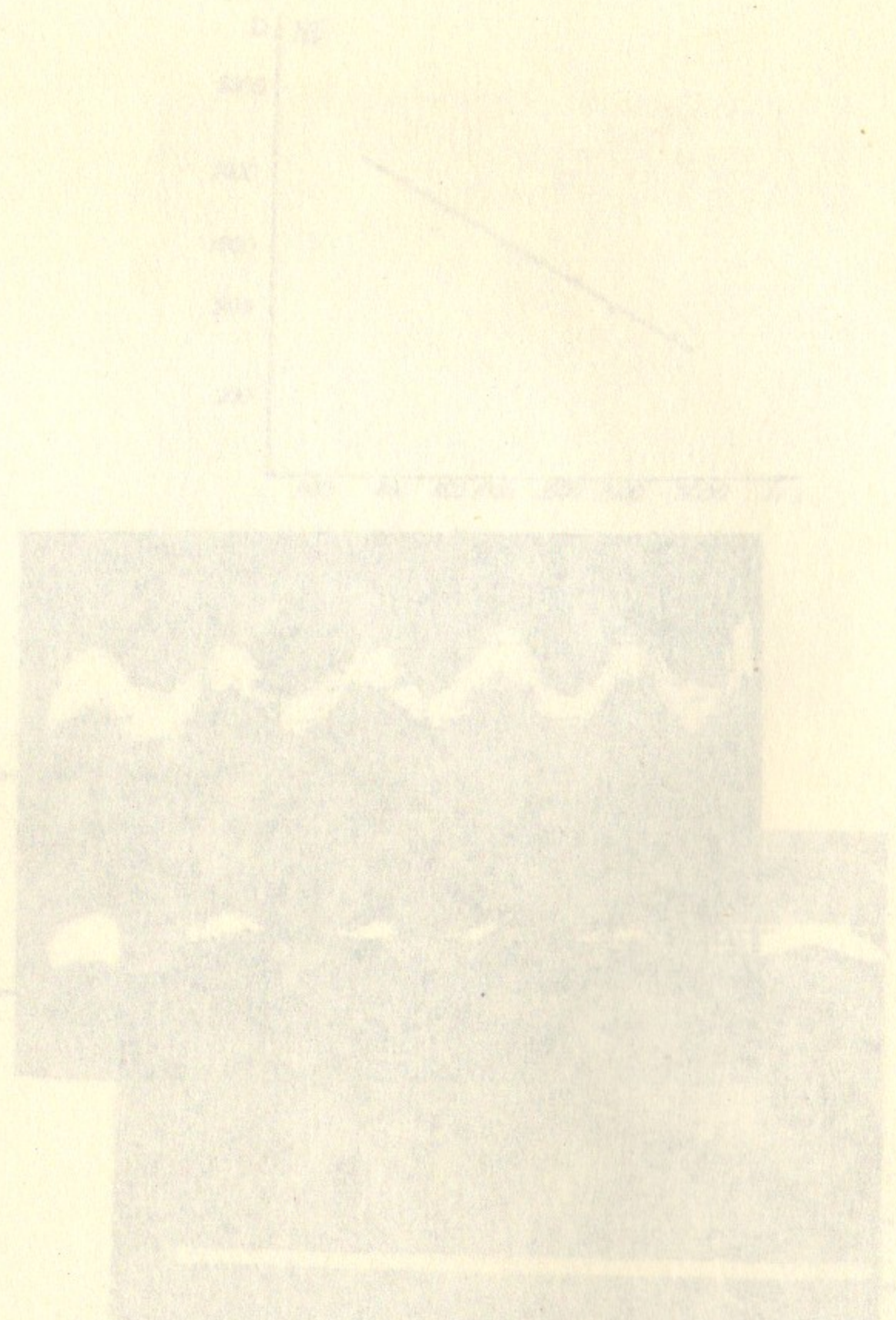


Рис. 11



---

Ответственный за выпуск Богащенко И.М.  
Подписано к печати 16.УІ-1967г.  
Усл. 0,7 печ.л., тираж 200 экз. Бесплатно.  
Заказ № 138

---

Отпечатано на роталпринте в ИЯФ СО АН СССР.