

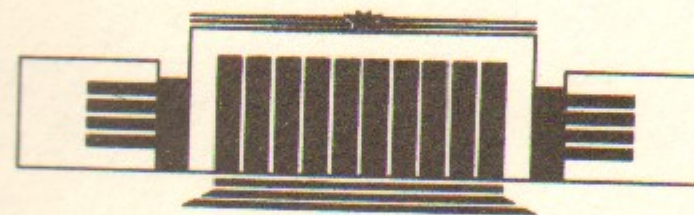


14
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ
ВОЛНЫ С ИОННО-ЗВУКОВОЙ.
СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. V.**

ПРЕПРИНТ 89-155



НОВОСИБИРСК

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ВОЛНЫ С ИОННО-ЗВУКОВОЙ.
СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. У.

Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин

АННОТАЦИЯ

Проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию развития стохастической неустойчивости в течение длительного времени $t/T_{oe} \gg 100$ ($T_{oe} = \frac{2\pi}{\omega_{oe}}$) при взаимодействии ленгмюровской волны ($E_0^2/8\pi n T = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $N_e = L/\lambda_e = 1$) с ионно-звуковой (случай 1-1 $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 50$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 2$; случай 3-1 $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $N_i = 7$). Работа является продолжением работ /2/ (случай 1-1) и /3/ (случай 3-1), где исследована начальная стадия ($t/T_{oe} \approx 30$) стохастической неустойчивости движения электронов в районе областей захвата ионно-звуковой волны N_i и гармоник конверсии прямых $N = N_e + \beta N_i$ и обратных $N = N_e - \beta N_i$ волн ($\beta = 1, 2, 3, \dots$).

Показано, что с течением времени в случае 1-1 эффекты ионной нелинейности приводят к росту ширины стохастического слоя ионно-звуковой волны. Когда этот слой пересекается со слоями гармоник конверсии, начинается сильная стохастическая неустойчивость в районе областей захвата $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$.

В случае 3-1 сильная стохастическая неустойчивость такого типа наблюдается в $t/T_{oe} < 30$ и приводит к нагреву электронов, хотя функция распределения в $t/T_{oe} \sim 30$ заметно отличается от максвелловской /3/. В $t/T_{oe} > 30$ продолжается развитие сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$, что приводит к перемешиванию электронов на фазовой плоскости. Функция распределения приближается к максвелловской с температурой $T_e \sim 4T_0$.

В случае 3-1 найдено, что эффекты ионной нелинейности приводят к развитию стохастической неустойчивости движения ионов в районе области захвата ионов в ионно-звуковой волне.

N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin

Abstract

The numerical experiments (PIC-method) were made to study the evolution of the stochastic instability during $t/T_{oe} \geq 100$ ($T_{oe} = 2\pi/\omega_{oe}$) by the interaction of the Langmuir wave ($E_0^2/8\pi nT = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $N_e = \lambda/\lambda_e = 1$) and the ion-sound wave (case 1-1 $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 50$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 2$; case 3-1 $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $N_i = 7$). This work continues the work /2/ (case 1-1) and /3/ (case 3-1), where the initial stage ($t/T_{oe} \leq 30$) of the stochastic instability of the electron motion in the trapping regions of the ion-sound wave N_i and of the conversion modes $N = N_e + \beta N_i$ (direct waves) and $N = N_e - \beta N_i$; (backward waves) was studied ($\beta = 1, 2, 3, \dots$).

In the case 1-1 the evolution of the ion nonlinearities leads to the stochastic instability in the trapping region of the ion-sound wave. The width of the stochastic layer increases with time. When this stochastic layer intersects the stochastic layers of the conversion modes the large scale stochasticity in the trapping regions $N_i - (N_e + \beta N_i)$ and $N_i - (N_e - \beta N_i)$, becomes essential.

In the case 3-1 the large scale stochasticity of such a type is essential at $t/T_{oe} < 30$. This leads to the heating of the electrons, but at $t/T_{oe} \sim 30$ the electron velocity distribution function is not Maxwellian one /3/. At $t/T_{oe} > 30$ the evolution of the large scale stochasticity continues. This leads to the mixing of the electrons on the phase plane. The distribution function approaches the Maxwellian one with the temperature $T_e \sim 4T_0$.

In the case 3-1 it is shown that the evolution of the ion nonlinearities leads to the stochastic instability of the ion motion in the trapping region of the ions in the ion-sound wave.

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

Настоящая работа является продолжением работ /1-4/. В работе /1/ исследовалась неустойчивость ленгмюровских волн при взаимодействии с ионно-звуковыми, в работах /2-4/ - стохастические эффекты и механизм затухания ленгмюровских волн и поглощения энергии электронами. Было показано, что неустойчивость ленгмюровской волны определяется ее конверсией на ионно-звуковой волне. Конверсия приводит к генерации гармоник ленгмюровской волны прямых $k_N = k_e + \beta k_i$ ($N = N_e + \beta N_i$) и обратных $k_N = k_e - \beta k_i$ ($N = N_e - \beta N_i$) волн ($\beta = 1, 2, 3, \dots$, $k_N = 2\pi/\lambda_N$; $N = \lambda/\lambda_N$) /5,6/. Начальная стадия конверсии проявляется в концентрации поля во впадинах плотности, что приводит к вторичной модуляционной неустойчивости. К затуханию ленгмюровских волн приводит захват электронов гармониками конверсии и стохастические эффекты - развитие стохастической неустойчивости движения электронов (образование стохастических слоев, сильная стохастическая неустойчивость) в районе областей захвата ионно-звуковой волны и гармоник конверсии.

В случае I-I, рассмотренном в работе /2/, энергия ленгмюровских волн поглощается электронами при развитии сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник конверсии $N_e + \beta N_i$ и $N_e - \beta N_i$, что приводит к образованию "ближних" ("коротких") хвостов функции распределения электронов по скоростям. Развитие стохастического слоя ионно-звуковой волны в этом случае не играет существенной роли. Действительно, более 0,9 начальной энергии волны поглощается электронами хвостов за время $t/T_{oe} \leq 30$ ($T_{oe} = \frac{2\pi}{\omega_{oe}}$). За это время стохастический слой развивается только в малой области фазового пространства вблизи сепаратрисы ионно-звуковой волны.

Напротив, в случае 3-I, рассмотренном в работе /3/, этот слой уже через $t/T_{oe} \sim 20-25$ занимает заметную область фазового пространства, включая всю область захвата ионно-звуковой волны, и пересекается со стохастическими слоями гармоник конверсии $N_e + \beta N_i$ и $N_e - \beta N_i$. Это приводит к сильной стохастической неустойчивости движения электронов в районе областей захвата

$N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Энергия ленгмюровских волн в этом случае поглощается нагревом основной массы электронов. Отметим, что при формировании стохастического слоя ионно-звуковой волны в случае 3-I существенную роль играют эффекты ионной нелинейности - формирование фронтов скорости и плотности и скачков потенциала - двойных электрических слоев. Эти эффекты рассматривались ранее в работах /7-9/.

В работах /2,3/ развитие стохастических эффектов рассматривалось только в течение времени $t/T_{oe} \sim 30$, когда основная доля начальной энергии ленгмюровской волны ($\geq 0,9 W_E^0$) поглощается электронами. Однако в $t/T_{oe} \sim 30$ ионно-звуковая волна и гармоники конверсии имеют конечную амплитуду, так что развитие стохастической неустойчивости продолжается. В настоящей работе рассматривается развитие стохастических эффектов в случаях I-I и 3-I за более длительное время $t/T_{oe} \sim 100$.

В течение этого времени в случае I-I в результате развития ионных нелинейностей продолжается развитие стохастической неустойчивости в районе области захвата ионно-звуковой волны. Ширина стохастического слоя возрастает и к $t/T_{oe} \approx 60$ начинает занимать всю область захвата ионно-звуковой волны и заметную область фазового пространства вне ее. К $t/T_{oe} \approx 80-100$ этот слой начинает пересекаться со слоями гармоник конверсии $N_e + \beta N_i$ и $N_e - \beta N_i$, что свидетельствует о начале сильной стохастической неустойчивости. В $t/T_{oe} \sim 100$ функция распределения электронов по скоростям мало отличается от $t/T_{oe} \sim 30$, однако, можно ожидать, что за более длительное время сильная стохастическая неустойчивость приведет к перемешиванию и обмену энергией электронов "ближних" хвостов и основной массы электронов.

Это подтверждается при рассмотрении случая 3-I. Действительно, здесь продолжается перемешивание электронов в результате сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$. В $t/T_{oe} \sim 30$ функция распределения электронов заметно отличается от максвелловской. В работах /1,3/ мы характеризовали функцию распределения температурой T_e , определенной по ширине функции распределения на уровне, соответствующем интервалу скоростей $V/V_T \sim (-1) - (+1)$; $(-1,7) - (+1,7)$; $(-2) - (+2)$. В $t/T_{oe} \sim 30$ эти температуры заметно превышают начальную T_0 и различаются в 1,5-2 раза. К $t/T_{oe} \sim 100$ температуры $T_e(V_T)$ и $T_e(1,7V_T)$ заметно возрастают и

приближаются к $T_e(2V_T) \sim 4 T_e^0$. Это показывает, что функция распределения электронов по скоростям приближается к максвелловской.

В случае 3-I эффекты ионной нелинейности начинают проявляться уже в $t/T_{oe} > 10-20$. Дальнейшее развитие ионной нелинейности приводит к развитию стохастической неустойчивости движения ионов - к образованию стохастического слоя в районе области захвата ионов в ионно-звуковой волне.

Численный эксперимент выполнялся методом частиц в ячейках. Рассматривалась одномерная система длиной $L/r_d = 100$ с периодическими граничными условиями. Для электронов и ионов задавалось максвелловское распределение по скоростям с отношением температур $T_e/T_i = 30$ и отношением масс $M/m = 10^2$. Из-за ограниченности числа счетных частиц ($N^e = N^i = 10^4$) функции распределения электронов и ионов обрезаны на скорости $V \sim \pm 2V_T$ и $V \sim \pm 2V_T^i$ соответственно.

Для задания бегущей ленгмюровской волны в начальный момент времени задаются синусоидальные возмущения плотности и скорости электронов, соответствующие линейной монохроматической волне. В случаях I-I и 3-I параметры волны одинаковы: $E_0^2/8\pi nT = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $V_\phi/V_T = 16$; $N_e = L/\lambda_e = 1$.

Для задания ионно-звуковой волны в начальный момент времени задаются синусоидальные возмущения плотности электронов и ионов $\tilde{n}_e(x) = \tilde{n}_i(x)$ и возмущение скоростей, соответствующее фазовой скорости ионно-звуковой волны $V_\phi^i = c_s/[1 + (k_i r_d)^2]^{1/2}$. Параметры волны в случае I-I: $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 50$; $V_\phi^i/V_T = 9,92 \cdot 10^{-2}$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 2$; в случае 3-I: $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $V_\phi^i/V_T = 9,15 \cdot 10^{-2}$; $N_i = 7$.

Относительные фазы ленгмюровской и ионно-звуковой волны выбраны так, чтобы возмущение скорости электронов $\tilde{v}(x)$ было равно нулю в точке $x = x_m$, где максимальна сепаратриса электронов, захваченных в ионно-звуковую волну $v(x) = V_\phi^i \pm 2\sqrt{\frac{e\phi_0}{m}} \sin k_i(x - x_1)$, где $2\sqrt{\frac{e\phi_0}{m}} = V_{\phi_0}^i$ - амплитуда захвата; x_1 - положение узла сепаратрисы (см. /2/).

Задавались группы пробных частиц - электронов ($e = m = 0$, e/m то же, что у электронов) с разными V_0 и $x_0 = x_m$, так что начальные скорости V_0 в $t = 0$ совпадают с невозмущенными

V_0^0 . Предельные начальные координаты и число частиц в группах приведены в таблице I. В случаях I-I и 3-I задавалась группа I с $V_0/V_T \sim (-0,159) - 0,156$ та же, что в работах /2,3/. Начальные x_0, V_0 частиц этой группы в $t = 0$ лежат внутри области захвата ионно-звуковой волны вблизи ее фазовой скорости. В случае I-I, кроме того, задавались группы 2 и 3. В этих группах начальные x_0, V_0 частиц в $t = 0$ лежат внутри области захвата, остальные частицы - вне области захвата ионно-звуковой волны и в той же области V_0 , что и группы 3,4 в работах /2,3/. Предельные начальные скорости частиц в этих группах $V_0/V_T \sim 2$ и $V_0/V_T \sim -2$ совпадают с группами 3 и 4 в работах /2,3/.

При исследовании стохастических эффектов изучались траектории движения пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. Изучение траекторий в лабораторной системе или системе координат той или иной волны (предполагалось, что $V_{\phi}^N = \text{const}$) позволило четко различать регулярно движущиеся захваченные или пролетные частицы от частиц, движущихся стохастически (захват - пролет через случайные промежутки времени). Анализ траекторий частиц с близкими начальными координатами x_0, V_0 позволил делать вывод о том, имеет ли движение частиц стохастический характер.

Отметим, что по техническим причинам траектория данной частицы выводится отдельными частями с интервалами времени $\Delta t/T_{oe} \sim 28$ ($t/T_{oe} \sim 0-28; 28-56$ и т.д.). В каждом интервале траектория строится в своих координатах x, v . Начальные для интервала моменты времени t_0 приведены на рисунках. На траекториях приведены цифры, показывающие момент t/T_{oe} , когда частица имеет данные x и v . Отметим также, что хотя мы используем периодические граничные условия $x'' \pm \alpha \mathcal{L} = x''$ ($\alpha = 1, 2, 3, \dots$), на рисунках траекторий приведена "развернутая" шкала $x = x'' \pm \alpha \mathcal{L}$, причем в $t = 0$ координата данной частицы $x = x_0$. На рисунках распределения плотности $\tilde{n}(x)$ в разные моменты времени и на фазовых плоскостях ионов приведена шкала $x = x''$. Наконец, отметим, что траектории в системе той или иной волны могут быть несколько искажены, так как мы не учитывали изменение фазовой скорости V_{ϕ}^i, V_{ϕ}^N нелинейной волны во времени. Эта неточность не мешает различать захваченные частицы от выходящих из захвата и от захваченных вторично, отраженных и т.п.

Таблица I.

Начальные координаты пробных частиц.

Случай I-I. Узлы сепаратрисы в $t = 0$ $x_1/r_d = 25; x_2/r_d = 75$; максимум $x_m/r_d = 50$.

$$(V_{\phi}^i + V_{30}^i)/V_T = 0,99; (V_{\phi}^i - V_{30}^i)/V_T = -0,79; V_{\phi}^i/V_T = 9,92 \cdot 10^{-2}; V_{\phi}^i/c_s = 0,992; V_{\phi}^i/V_T^i = 5,43.$$

Случай 3-I. Узлы сепаратрисы в $t = 0$ $x_1/r_d = 7,14; x_2/r_d = 21,43$; максимум $x_m/r_d = 14,28$.

$$(V_{\phi}^i + V_{30}^i)/V_T = 0,98; (V_{\phi}^i - V_{30}^i)/V_T = -0,80; V_{\phi}^i/V_T = 9,15 \cdot 10^{-2}; V_{\phi}^i/c_s = 0,915; V_{\phi}^i/V_T^i = 5,01.$$

| Случай | I-I | | | 3-I |
|-----------------------------------|--------------|-------------|----------------|--------------|
| Группа | I | 2 | 3 | I |
| Δn | 100 | 50 | 50 | 100 |
| x_0/r_d | 50 | 50 | 50 | 14,3 |
| $(x_0 - x_1)/\lambda_i$ | 0,5 | 0,5 | 0,5 | 0,5 |
| V_0^0 | -1+0,98 | 2+12,825 | -(2+12,825) | -1+0,98 |
| V_0^0/V_T | -0,159+0,156 | 0,318+2,041 | -(0,318+2,041) | -0,159+0,156 |
| $V_0^0 - V_{\phi}^i$ | -1,62 +0,36 | 1,4 +12,2 | -(2,6 +13,4) | -1,60 +0,38 |
| $(V_0^0 - V_{\phi}^i)/V_{\phi}^i$ | -0,29 +0,06 | 0,25 +2,18 | -(0,47 +2,40) | -0,29 +0,07 |
| N | I-9; II-19 | I-5 | 6-9 | I-9 |

$V_{\phi}^i = c_s / [1 + (k_i r_d)^2]^{1/2}$ - фазовая скорость ионно-звуковой волны; $c_s = \sqrt{T_e/M}$; $V_T^i = \sqrt{T_i/M}$; $V_{30}^i = 2\sqrt{e\phi_0/m}$.
 Δn - число частиц в группе; V_0^0 - невозмущенная начальная скорость (нормировано на r_d/T_{oe}); N - номер траектории.

Определялись границы стохастических слоев. Стохастический слой рассматривался как область на фазовой плоскости начальных координат x_0, v_0 и x, v в момент t частиц, траектории которых имеют стохастический характер. Поскольку анализировалось ограниченное число траекторий (порядка десять - двадцать), использовался также анализ движения пробных частиц (сто - двести) и электронов на фазовой плоскости. Фазовые плоскости выводились в $t/T_{oe} \leq 30$ с интервалом $\Delta t/T_{oe} \sim 1-2$, в $t/T_{oe} > 30 - \Delta t/T_{oe} \sim 4-7$. Отметим, что полные границы стохастических слоев $v_0(x_0)$ не определялись. Определялись только верхние и нижние границы v_0 (внутренние и внешние относительно соответствующей области захвата) для $x_0 = x_m$.

Рассмотрим случай I-I (Рис. I-I7). Как показано в работе /2/, в этом случае на начальной стадии основную роль играет конверсия ленгмюровской волны на ионно-звуковой. Параметры ионно-звуковой волны и нескольких гармоник конверсии приведены в таблице 2. Основную роль играют гармоники $N = N_e + N_i = 3$ и $N = N_e - 2N_i = -3$ (обратная волна). На начальной стадии энергия ленгмюровской волны $N_e = 1$ перекачивается в гармоники конверсии. В динамическом описании это проявляется в концентрации поля во впадинах плотности. Концентрация поля приводит к вторичной модуляционной неустойчивости. Первичная модуляционная неустойчивость волны $N_e = 1$ не играет существенной роли, хотя и приводит к небольшой модуляции плотности и скорости ионов. Затухание поля происходит в результате захвата электронов гармониками конверсии и стохастической неустойчивости их движения. Основную роль играет сильная стохастическая неустойчивость движения электронов в районе областей захвата гармоник конверсии $N_e + \beta N_i$ и $N_e - \beta N_i$, что приводит к образованию "коротких" ("ближних") хвостов функции распределения по скоростям. К $t/T_{oe} \sim 30$ более 0,9 начальной энергии волны поглощается электронами хвостов. Температура основной массы электронов практически не меняется.

Однако и в $t/T_{oe} > 30$ ионно-звуковая волна и гармоники конверсии имеют конечную амплитуду, так что развитие стохастической неустойчивости продолжается. Целью настоящей работы является исследование развития стохастических эффектов в течение бо-

Таблица 2.

Параметры ионно-звуковой волны и гармоник конверсии. Случай I-I.

| t/T_{oe} | N_i | β | N | λ/r_d | $N \lambda/r_d$ | V_{2m}^N / V_T | t_{max} / T_{oe} | V_{2m}^N / V_T | $V_{\phi+V_2}^N / V_T$ | $V_{\phi-V_2}^N / V_T$ | V_{2t}^N / V_T | $V_{\phi+V_2}^N / V_T$ | $V_{\phi-V_2}^N / V_T$ |
|------------|-------|---------|-----|---------------|-----------------|------------------|--------------------|------------------|------------------------|------------------------|------------------|------------------------|------------------------|
| | | | 2 | 50 | 0,0992 | 0 | 0,89 | 0,99 | -0,79 | 0,82 | 0,61 | 0,33 | 0,43 |
| | | | 3 | 33,3 | 5,61 | 2,9 | 4,4 | 10,0 | 1,2 | 1,5 | 1,0 | 1,0 | 6,6 |
| | | | 5 | 20,0 | 3,64 | | | | 1,2 | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 4,6 |
| | | | 7 | 14,3 | 2,87 | | | | 1,2 | 1,2 | 1,0 | 1,0 | 4,6 |
| | | | -1 | 100 | -16,1 | 2,1 | 7,5 | -8,6 | -23,5 | 1,2 | 0,9 | 0,7 | -4,9 |
| | | | -3 | 33,3 | -5,61 | 3,8 | 3,4 | -2,2 | -9,0 | 1,1 | 0,8 | -4,9 | -6,4 |
| | | | -5 | 20,0 | -3,64 | | | | | 1,1 | 0,8 | -4,9 | -6,4 |

t_{max} - момент, когда максимальна амплитуда гармоник конверсии; $V_{2m}^N = 2\sqrt{\epsilon\phi_m^N}$ в $t = t_{max}$;
 $V_{2m}^i = V_{30}^i$; $V_{2t}^N = 2\sqrt{\epsilon\phi_t^N}$.

лее длительного времени.

Изменение во времени амплитуды ионно-звуковой волны $N_i = 2$ и амплитуды основных гармоник конверсии $N_e = 3$ и $N_e = -3$ можно видеть из таблицы 2 и Рис.1, где показана зависимость от времени границ области захвата $(V_{\phi}^N + V_{\beta}^N)$ и $(V_{\phi}^N - V_{\beta}^N)$ для $N_i = 2$, $N_e = 3$ и $N_e = -3$.

В работе /2/ было показано, что уже в $t/T_{oe} > 15-20$ начинают проявляться эффекты, связанные с ионной нелинейностью, обусловленной возмущением пондеромоторной силой. После затухания поля ленгмювских волн на краях впадин плотности формируются фронты плотности и скорости. На фронте возникает скачок потенциала - двойной электрический слой /7-9/. Фронты движутся навстречу друг другу. При их встрече на месте впадины формируется пик плотности. Далее события повторяются. Развитие ионно-звуковой волны в рассматриваемом случае определяется возмущением плотности и скорости пондеромоторной силой от вторичной и первичной модуляционной неустойчивости периодическим формированием и движением фронтов плотности и скорости. Это можно видеть из Рис.2, где показано распределение плотности $\tilde{n}(x)$ в разные моменты времени. Хотя картина развития $\tilde{n}(x)$ довольно сложная, она имеет некоторые общие черты с развитием возмущения от модуляционной неустойчивости стоячей ленгмювской волны $N_e = 1$, подробно рассмотренным в работе /9/.

В работах /8,9/ показано, что эффекты, связанные с ионной нелинейностью, могут привести к развитию стохастической неустойчивости движения электронов в районе области захвата ионно-звуковой волны. В работе /2/ наблюдалось, что в случае I-I пробные частицы группы I и других групп с $X_0 = X_m$ и V_0 , лежащими внутри области захвата, остаются захваченными до $t/T_{oe} \sim 20-25$. Частицы начинают выходить из захвата в $t/T_{oe} > 20-25$, когда начинают проявляться эффекты ионной нелинейности. С течением времени число частиц, вышедших из захвата, возрастает. Это видно из Рис.3, где показана доля частиц $\Delta n/n_0$ группы I, выходящих из захвата в зависимости от времени.

Характерные траектории частиц группы I показаны на Рис.4-12. Траектории имеют вид, характерный для стохастического движения: частица то захватывается, то становится пролетной, то отражается в двойном электрическом слое через случайные промежутки времени. Так частица $N = 2$ (Рис.4а-г) вначале захвачена

(Рис.4а,б), затем становится пролетной с $v < 0$ (Рис.4б,в), вновь захватывается в $t/T_{oe} \sim 66-93$ (Рис.4в) и выходит из захвата с $v > 0$ (Рис.4г). Частица $N = 8$ (Рис.5а-г) также вначале захвачена (Рис.5а). С течением времени область положительного потенциала расширяется, частица остается захваченной в ней и отражается на ее краях в двойных слоях в $t/T_{oe} \sim 31-54-66$ (Рис.5б,в), затем захватывается в $t/T_{oe} \sim 79-89$ (Рис.5в,г), становится пролетной с $v < 0$, опять отражается в $t/T_{oe} \sim 102$ и вновь становится пролетной с $v > 0$ (Рис.5г). Частица $N = 9$ (Рис.6а-г), выйдя из захвата, становится пролетной с $v > 0$, вновь захватывается в $t/T_{oe} \sim 33-43$, отражается в $t/T_{oe} \sim 45-46$ (Рис.6б), становится пролетной с $v < 0$ и захватывается в $t/T_{oe} > 77$ (Рис.6в,г). Траектории частиц с близкими начальными координатами (например, $N = 8$ и 9) различаются и расходятся на фазовой плоскости, что свидетельствует о стохастической неустойчивости движения электронов и образовании стохастического слоя в районе области захвата ионно-звуковой волны.

Часть частиц не остается вблизи области захвата ионно-звуковой волны, а переходит в район областей захвата гармоник конверсии. Так частица $N = 19$ (Рис.7,8,9а,б), выйдя из захвата, ускоряется в двойном слое в $t/T_{oe} \sim 41,6-42,6$ (Рис.7б) и попадает в сферу влияния гармоник конверсии $N_e + \beta N_i = -N_e = 11$ ($\beta = 5$) и $N_e = 9$ ($\beta = 4$). (Рис.7в,г), а позже и $N_e = 7$ ($\beta = 3$). В $t/T_{oe} > 40$ частица $N = 19$ странствует по областям захвата гармоник $N_e = 11$, 9 и 7 , переходя из одной области захвата в другую (Рис.7в,г; 8а-г; 9а,б). Подобные траектории имеют и другие частицы. Так частица $N = 12$ странствует по областям захвата гармоник $N_e = 9$ и 7 (Рис.9в,г), частица $N = 13$ - по областям захвата гармоник $N_e = 11$ и 9 (Рис.10а-г). Частица $N = 15$ попадет в сферу влияния гармоник конверсии $N_e - \beta N_i = -N_e = -11$ ($\beta = 6$), $N_e = -9$ ($\beta = 5$), $N_e = -7$ ($\beta = 4$) и $N_e = -5$ ($\beta = 3$) и странствует по их областям захвата (Рис.11а-г). Отдельные частицы ускоряются до значительных скоростей, странствуя по областям захвата гармоник конверсии. Примером могут служить частица $N = 15$ (Рис.11а-г), набирающая скорость $v/v_T \sim 4$ и частица $N = 14$ (Рис.12а-г), которая в $t/T_{oe} > 70$ последовательно ускоряется гармониками $N_e = 9, 7, 5$ и 3 и набирает скорость $v/v_T \sim 7$.

Траектории такого типа показывают, что с течением времени развивается сильная стохастическая неустойчивость в районе об-

ластей захвата ионно-звуковой волны и гармоник конверсии $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Это подтверждается и траекториями частиц групп 2 и 3, которые странствуют по областям захвата гармоник конверсии $N_e + \beta N_i$ или $N_e - \beta N_i$, а некоторые из них переходят в стохастический слой ионно-звуковой волны.

Границы стохастических слоев ионно-звуковой волны и основных гармоник конверсии определялись подобно работе /2/. Внутренние границы слоя ионно-звуковой волны определялись по предельным V_0 частиц группы I, выходящих из захвата, внешние границы - по максимальной V_{max} и минимальной V_{min} скоростям частиц группы I, движущихся стохастически, а в некоторые моменты - по предельным V_0 частиц групп 2 и 3, попадающих в захват. Внешние границы стохастического слоя гармоник конверсии $N_e = 3$ и $N_e = -3$ определялись по частицам групп 2 и 3 соответственно. Нижняя граница гармоники $N_e = 3$ - по минимальной V_0 частиц группы 2, попадающих в захват $N_e = 3$, верхняя граница - по V_{max} частиц группы 2 в данный момент времени. Верхняя граница гармоники $N_e = -3$ - по максимальной V_0 частиц группы 3, попадающих в захват $N_e = -3$, нижняя граница - по V_{min} частиц группы 3 в данный момент времени. При этом под стохастическим слоем гармоник $N_e = 3$ или $N_e = -3$ мы понимаем область фазового пространства, где частицы движутся стохастически, включающую области захвата и стохастические слои всех гармоник конверсии $N_e + \beta N_i$ или $N_e - \beta N_i$.

Границы и ширина верхнего и нижнего стохастического слоя ионно-звуковой волны в разные моменты времени приведены в таблице 3, границы и ширина слоя гармоник $N_e = 3$ и $N_e = -3$ - в таблице 4. На Рис.13 показана область захвата ионно-звуковой волны в $t = 0$ и $t/T_{oe} = II2$ (пунктир), половины областей захвата гармоник $N_e = 3$ и $N_e = -3$ в $t = t_{max}$ (см. таблицу 2) и $t/T_{oe} = II2$ (пунктир), а также стрелки - границы стохастических слоев в $t/T_{oe} = II2$. На Рис.14 показана зависимость от времени границ стохастического слоя ионно-звуковой волны, на Рис.15 - ширина верхнего и нижнего стохастического слоя Δ/V_T и Δ/V_{3t} . Стрелки, показывающие ширину слоев в разные моменты времени приведены также на Рис.1.

Из Рис.1,14,15 видно, что стохастический слой ионно-звуковой волны возрастает в $t/T_{oe} \sim 30-60$, причем внутренняя граница в $t/T_{oe} \sim 60$ близка к фазовой скорости, т.е. слой занимает прак-

Таблица 3.

Границы и ширина стохастического слоя ионно-звуковой волны. Случай I-I.

| t/T_{oe} | 28 | | 56 | | 84 | | II2 | |
|----------------------------|--------------------|-------------------|--------------------|--------------|---------------------|--------------|---------------------|--------------|
| | V_{up}/V_T | Δ/V_T | V_{up}/V_T | Δ/V_T | V_{up}/V_T | Δ/V_T | V_{up}/V_T | Δ/V_T |
| Верхняя граница Внешняя | 1,24 | 0,34 | 2,72 | 2,6 | 2,69 | 2,6 | 2,82 | 2,7 |
| | 1,75 ⁺ | 0,85 ⁺ | 2,99 ^x | 2,9 | 5,31 ^x | 5,2 | 3,89 ^{xx} | 3,8 |
| Внутренняя | 0,90 ⁺ | | 0,11 | | 0,12 | | 0,10 | |
| | | | | | | | | |
| Нижняя граница Внешняя | -1,29 | 0,54 | -1,86 ^x | 2,0 | -1,87 | 2,0 | -1,82 | 1,9 |
| | -1,66 ⁺ | 0,91 ⁺ | 0,10 | | -2,08 ^{xx} | 2,2 | -2,92 ^{xx} | 3,0 |
| Внутренняя | -0,75 ⁺ | | | | -3,68 ^x | 3,8 | -3,99 ^x | 4,1 |
| | | | | | 0,10 | | 0,10 | |
| | | | | | | | | 8,1 |
| | | | | | | | | 11,4 |
| | | | | | | | | 19,1 |
| | | | | | | | | 5,7 |
| | | | | | | | | 9,0 |
| | | | | | | | | 12,2 |

V_{up}, Δ - границы и ширина стохастического слоя; $V_{3t}^N = 2\sqrt{e\varphi_N}$; внешние границы - $V_{up} = V_{max}, V_{min}$ частиц группы I.

+ - цифры из работ /2/; x - одна частица; xx - 2 частицы.

Таблица 4.

Границы и ширина стохастических слоев гармоник конверсии $N = N_e + N_i$ и $N = N_e - 2N_i$.
Случай I-I.

| t/T_{oe} | 28 | | | II2 | | | 28 | | | II2 | | | |
|------------------------|-----------------------------|---------------------|-------------------|--------------|--------------------|-------------------|--------------|----------------------|-------------------|--------------|---------------------|-------------------|-------|
| | V_{cp}/V_T | Δ/V_T | Δ/V_{zt}^N | V_{cp}/V_T | Δ/V_T | Δ/V_{zt}^N | V_{cp}/V_T | Δ/V_T | Δ/V_{zt}^N | V_{cp}/V_T | Δ/V_T | Δ/V_{zt}^N | |
| Верхняя граница | Гармоника $N_e + N_i = 3$ | | | | | | | | | | | | |
| | Внешняя (пробные) | 10,27 ^{xx} | 4,6 | 4,0 | 10,8 ^{xx} | 5,2 | 5,0 | -1,55 | 3,9 | 3,6 | -1,6 | 4,0 | 5,3 |
| | Внутренняя (электроны) | 5,6I ^x | | | 5,6I ^x | | | -5,45 ^x | | | -5,6I ^x | | |
| | Внутренняя (электроны) | 5,45 ^x | | | 5,6I ^x | | | -5,6I ^x | | | -5,6I ^x | | |
| Нижняя граница | Гармоника $N_e - 2N_i = -3$ | | | | | | | | | | | | |
| | Внешняя (пробные) | 1,65 | 3,8 | 3,3 | 1,46 | 4,2 | 4,0 | -II, I ^{xx} | 5,5 | 5,0 | -14,0 ^{xx} | 8,4 | II, I |
| | Внешняя (электроны) | | | | | | | | | | | | |
| | Внутренняя (электроны) | | | | | | | | | | | | |

V_{cp}, Δ - граница и ширина стохастического слоя; $V_{zt}^N = 2\sqrt{e\varphi_z/m}$.

x - по фазовой плоскости электронов; $V_{cp} = 5,6I$; $V_{cp} = V_{max}, V_{min}$ электронов.

тически всю область захвата ионно-звуковой волны. В $t/T_{oe} \sim 30-60$ сильно меняется функция распределения по скоростям частиц группы I (Рис. I6a, б) - частицы перемешиваются в пределах стохастического слоя. В $t/T_{oe} > 60$ функция распределения меняется мало, но появляются отдельные частицы, ускоренные до больших скоростей (Рис. I6в). Их траектории свидетельствуют о том, что эти частицы участвуют в сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата $N_i - (N_e + \beta N_i)$ или $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Это делает границы слоя ионно-звуковой волны несколько неопределенными. Действительно, можно определить границы слоя по V_{max}, V_{min} сплошного распределения $f(v)$ (Рис. I6в). Эти границы показаны сплошной кривой на Рис. I4, I5 и сплошными стрелками на Рис. I, I3. Отдельные частицы со скоростями $v > V_{max}, |v_{min}|$ можно рассматривать, как переходящие в стохастические слои гармоник конверсии, пересекающиеся со слоем ионно-звуковой волны (Рис. I3). Отметим, что слои гармоник конверсии в $t/T_{oe} = II2$ практически не отличаются от $t/T_{oe} = 28$ (Рис. I, таблица 4). Однако, можно считать, что частицы с большими скоростями продолжают двигаться в стохастическом слое ионно-звуковой волны, пересекаясь со слоями гармоник конверсии. Тогда их V_{max}, V_{min} определяют границы слоя. Такие границы, определенные по двум частицам, и соответствующая ширина слоя показаны пунктиром на Рис. I4, I5. Точками, соединенными широким пунктиром, на Рис. I4 показаны V_{max} и V_{min} отдельных частиц (одна частица с $v > 0$ и одна с $v < 0$). Такие предельные границы показаны пунктирными стрелками на Рис. I, I3.

Таким образом, стохастическая неустойчивость движения электронов в случае I-I продолжает развиваться. С течением времени в ней начинает участвовать большее число частиц (Рис. 3), стохастический слой ионно-звуковой волны расширяется, начинает развиваться сильная стохастическая неустойчивость в районе областей захвата $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Число частиц участвующих в этой неустойчивости, возрастает (Рис. 3, кривая 5 - частицы с $v > | \pm 2v_T |$). Однако к $t/T_{oe} \sim II2$ в этой неустойчивости участвует еще небольшое число частиц. Функция распределения электронов по скоростям в $t/T_{oe} = II2$ (Рис. I7) незначительно отличается от $t/T_{oe} = 28$ - сохраняются "ближние" (короткие, хвосты с теми же V_{max}, V_{min} . Немного меняется только центральная часть $v < | \pm 2v_T |$, приближаясь к максвелловской функции рас-

ловской. В это время ионно-звуковая волна и гармоники конверсии имеют конечную амплитуду, так что развитие стохастической неустойчивости продолжается. В настоящей работе исследуется ее развитие в течение более длительного времени.

Изменение во времени амплитуды ионно-звуковой волны $N_i = 7$ и основных гармоник конверсии $N_e = 8$ и $N_e = -6$ можно видеть из таблицы 5 и Рис.18, где показана зависимость от времени границ области захвата $(V_{\phi}^N + V_{\beta}^N)$ и $(V_{\phi}^N - V_{\beta}^N)$ для $N_i = 7$, $N_e = 8$ и $N_e = -6$.

На Рис.19 показано распределение плотности в разные моменты времени. Развитие ионно-звуковой волны в этом случае определяется собственной нелинейностью ионно-звуковой волны, возмущением плотности и скорости пондеромоторной силой от вторичной и первичной модуляционной неустойчивости и периодическим формированием фронтов плотности и скорости, сопровождающимся возникновением двойных электрических слоев, так что картина развития $\tilde{n}(x)$ имеет весьма сложный характер.

Эффекты ионной нелинейности и возмущение полем гармоник конверсии уже в $t/T_{oe} < 30$ приводят к стохастической неустойчивости движения электронов в районе области захвата ионно-звуковой волны. В $t/T_{oe} \sim 30$ стохастический слой занимает практически всю область захвата ионно-звуковой волны и пересекается со слоями гармоник конверсии.

Анализ траекторий частиц группы I и поведения частиц этой группы на фазовой плоскости электронов показывает, что уже к $t/T_{oe} \sim 30$ практически все частицы этой группы выходят из захвата ионно-звуковой волной и участвуют в стохастической неустойчивости. Естественно, что их число не меняется с течением времени (Рис.20, кривая I). Развитие стохастической неустойчивости проявляется в росте числа частиц, участвующих в сильной стохастической неустойчивости $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Это видно по росту числа частиц группы I, набирающих скорость $V > | \pm 2V_T |$ и $V > | \pm V_{\phi}^N |$ (Рис.20, кривые 5,6).

Характерные траектории частиц группы I показаны на Рис.21-28. Все траектории имеют вид, характерный для стохастического движения: частица то захватывается ионно-звуковой волной или гармониками конверсии, то становится пролетной, то отражается в двойном электрическом слое через случайные промежутки времени. Некоторые частицы остаются в сфере влияния ионно-звуковой

волны. Так частица $N = 4$ (Рис.21а-г) выходит из захвата в $t/T_{oe} \approx 22$, становится пролетной с $v > 0$ (Рис.21а), в $t/T_{oe} \sim 31$ отражается в двойном слое, становится пролетной с $v < 0$, вновь захватывается в $t/T_{oe} \sim 38 - 77$ (Рис.21б,в), опять становится пролетной с $v > 0$ и захватывается в $t/T_{oe} > 105$ (Рис.21в,г). Частица $N = 7$ (Рис.22а-г) выходит из захвата с $v < 0$ (Рис.22а), вновь захватывается в $t/T_{oe} \sim 28-46$ (Рис.22б), выходит из захвата с $v > 0$ (Рис.22б) и то захватывается, то отражается, то становится пролетной в дальнейшем (Рис.22в,г).

Заметное число частиц переходит из стохастического слоя ионно-звуковой волны в слой гармоник конверсии. Так частица $N = 3$ (Рис.23,24) выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 18$ с $v > 0$ (Рис.23а) и попадает в захват гармоникой $N_e = 15$ ($\beta = 2$) (Рис.23б), странствует по областям захвата гармоник конверсии $N_e = 22$ ($\beta = 3$), $N_e = 15$ и $N_e = 8$ ($\beta = 1$) (Рис.23в,г, 24а,б), затем отражается в двойном электрическом слое в $t/T_{oe} \sim 72$ (Рис.24в), становится пролетной с $v < 0$ и захватывается $N_i = 7$ в $t/T_{oe} \approx 106$ (Рис.24в,г). Частица $N = 8$ (Рис.25,26,27а,б) выходит из захвата в $t/T_{oe} \approx 11$ с $v < 0$ (Рис.25а) и в дальнейшем странствует по областям захвата гармоник конверсии - обратных волн $N_e = -20$ ($\beta = 3$), $N_e = -13$ ($\beta = 2$) и $N_e = -6$ ($\beta = 1$) (Рис.25б-г, 26а-г, 27а,б). Как уже говорилось, такие траектории свидетельствуют о сильной стохастической неустойчивости движения электронов в районе областей захвата $N_i - (N_e + \beta N_i)$ или $N_i - (N_e - \beta N_i)$.

Некоторые частицы странствуют по областям захвата гармоник $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$, свидетельствуя о развитии сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$. Примером может служить частица $N = 1$ (Рис.27в,г; 28а-г). Эта частица выходит из захвата в $t/T_{oe} \approx 20$ с $v > 0$ (Рис.27в), захватывается гармоникой $N_e = 15$ в $t/T_{oe} \sim 28-43$ (Рис.27г), вновь захватывается ионно-звуковой волной в $t/T_{oe} \sim 45-57$ (Рис.28а,б), переходит в захват соседней длиной волны в $t/T_{oe} \sim 60-75$ (Рис.28б), становится пролетной с $v < 0$, захватывается гармоникой $N_e = -20$ (Рис.28в), выходит из захвата и в $t/T_{oe} \sim 104$ отражается в двойном слое (Рис.28г).

Траектории частиц с близкими начальными координатами x_0, v_0 различаются и расходятся на фазовой плоскости. Примером могут

злужить частицы $N = 3$ (Рис.23,24) и $N = 4$ (Рис.21) или $N = 7$ (Рис.22) и $N = 8$ (Рис.25,26,27а,б) с одинаковыми χ_0 и V_0 , различающимися на $\Delta V_0/V_T \sim 0,03$. Все частицы группы I также имеют одинаковые χ_0 и близкие $V_0/V_T \sim (-0,16) - (+0,16)$. С течением времени эти частицы разбрасываются по фазовой плоскости, заполняя всю длину системы в полосе $V/V_T \sim (-5) - (+5)$.

Границы стохастического слоя ионно-звуковой волны определялись подобно случаю I-I. Внутренние границы определялись по предельным V_0 частиц, выходящих из захвата, внешние границы - по максимальной и минимальной скоростям частиц группы I. Границы и ширина верхнего и нижнего стохастического слоя ионно-звуковой волны в разные моменты времени приведены в таблице 6. Поскольку внутренних границ у этого стохастического слоя нет, деление его на верхний и нижний делается в предположении, что внутренние границы одинаковы и равны V_{ϕ}^i .

Из таблицы 6 видно, что внешние границы слоя ионно-звуковой волны значительно превышают фазовые скорости гармоник конверсии, т.е. заведомо пересекаются с их стохастическими слоями. Поэтому границы стохастических слоев гармоник конверсии в $t/t_{oe} > 30$ специально не определялись. Тот факт, что частицы группы I попадают в область скоростей выше фазовых скоростей основных гармоник конверсии $v > V_{\phi}^s$ и $v > |V_{\phi}^{-6}|$, позволяет сделать оценку нижней границы слоя гармоники $N_2 = 8$ и верхней границы слоя гармоники $N_2 = -6$ $V_{\phi p}/V_T < (-0,16)$ и $V_{\phi p}/V_T > 0,16$ соответственно. Внутренних границ у этих слоев нет, так что можно положить их равными V_{ϕ}^s или V_{ϕ}^{-6} . Эти границы в $t/t_{oe} = 28$ и $t/t_{oe} = 112$ приведены в таблице 7. Данные для $t/t_{oe} = 28$ взяты из работы /3/. Внешние границы этих слоев не определялись, так как эти слои пересекаются со слоями гармоник первичной модуляционной неустойчивости (см. /3/).

На Рис.29 показана область захвата ионно-звуковой волны в $t = 0$ и $t/t_{oe} = 112$ (пунктир), половины областей захвата гармоник $N_2 = 8$ и $N_2 = -6$ в $t \sim t_{max}$ и в $t/t_{oe} = 112$ (пунктир) (см. таблицу 5), а также стрелки - границы стохастических слоев в $t/t_{oe} = 112$ (для гармоник конверсии взяты границы в $t/t_{oe} = 28$). На Рис.30 показана зависимость от времени границ стохастического слоя ионно-звуковой волны, на Рис.31 - ширина верхнего и нижнего стохастического слоя Δ/V_T и Δ/V_{3z} . Стрелки, показывающие ширину слоев в разные моменты времени приведены на

Таблица 6.

Границы и ширина стохастического слоя ионно-звуковой волны. Случай 3-I.

| t/t_{oe} | 28 | | 56 | | 84 | | 112 | |
|-----------------|------------------|--------------------|------------------|--------------|------------------|--------------|------------------|--------------|
| | $V_{\phi p}/V_T$ | Δ/V_T | $V_{\phi p}/V_T$ | Δ/V_T | $V_{\phi p}/V_T$ | Δ/V_T | $V_{\phi p}/V_T$ | Δ/V_T |
| Верхняя граница | Внешняя | 3,81 | 3,7 | 4,4 | 4,1 | 4,20 | 4,1 | 4,6 |
| | Внутренняя | 3,64 ⁺ | 3,6 | 4,49 | 4,4 | 4,20 | 4,1 | 4,6 |
| Нижняя граница | Внешняя | -4,12 | 4,2 | -4,77 | 4,9 | -5,45 | 5,5 | -5,65 |
| | Внутренняя | -4,29 ⁺ | 4,4 | -4,77 | 4,9 | -5,45 | 5,5 | -5,65 |
| | | 0,092 ⁺ | | 0,092 | | 0,092 | | 0,092 |

$V_{\phi p}, \Delta$ - границы и ширина стохастического слоя; $V_{3z}^N = 2\sqrt{e\mu t^N}$; внешние границы $V_{\phi p} = V_{max}, V_{min}$ частиц группы I; внутренние границы $V_{\phi p} = V_{\phi}^i$.
⁺ - цифры из работ /3/.

Таблица 7.

Граница и ширина стохастических слоев гармоник конверсии $N = N_e + N_i$ и $N = N_e - N_i$.
Случай 3-1.

| t/T_{0e} | 28 | | | II2 | | | 28 | | | II2 | | |
|----------------------------|---------------------------|--------------|-------------------|----------------------------|--------------|-------------------|---------------------------|--------------|-------------------|----------------------------|--------------|-------------------|
| | v_{sp}/v_T | Δ/v_T | Δ/v_{Te}^N | v_{sp}/v_T | Δ/v_T | Δ/v_{Te}^N | v_{sp}/v_T | Δ/v_T | Δ/v_{Te}^N | v_{sp}/v_T | Δ/v_T | Δ/v_{Te}^N |
| Верхняя граница Внешняя | Гармоника $N_e + N_i = 8$ | | | Гармоника $N_e - N_i = -6$ | | | Гармоника $N_e + N_i = 8$ | | | Гармоника $N_e - N_i = -6$ | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Внутренняя (электроны) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Нижняя граница Внешняя | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |
| Внутренняя (электроны) | | | | | | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | |

v_{sp}, Δ - граница и ширина стохастического слоя; $v_{Te}^N = 2\sqrt{\epsilon\varphi_t^N/m}$.

x - по фазовой плотности электронов. $v_{sp} = v_{\phi}$.

Рис.18.

Из Рис.18,30,31 видно, что стохастический слой ионно-звуковой волны незначительно возрастает с течением времени. Внешние границы слоя в $t/T_{0e} \approx 30$ превышают фазовые скорости гармоники конверсии (Рис.18,29), что свидетельствует, как мы уже говорили, о его пересечении со слоями гармоник конверсии и о сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$, а также $(N_e - \beta N_i) - N_i - (N_e + \beta N_i)$.

Функции распределения пробных частиц группы I в разные моменты времени (Рис.32а,б) показывают, что частицы перемешиваются в пределах стохастического слоя уже в $t/T_{0e} \sim 30$, так что функция распределения в $t/T_{0e} = II2$ (Рис.32б) почти не отличается от $t/T_{0e} = 28$ (Рис.32а). Небольшое отличие заключается в росте числа частиц с большими скоростями, что видно из сравнения Рис.32а и 32б, а также из Рис.20.

Таким образом, сильная стохастическая неустойчивость в районе $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$ развивается уже к $t/T_{0e} \sim 30$ и продолжает развиваться позже, приводя к развитию неустойчивости в районе $(N_e - \beta N_i) - N_i - (N_e + \beta N_i)$ и к некоторому расширению области стохастического движения на фазовой плоскости. Сильная стохастическая неустойчивость приводит к перемешиванию частиц на фазовой плоскости. Хотя это не сказывается существенно на функции распределения пробных частиц группы I, функции распределения электронов в разные моменты времени заметно различаются (Рис.32в). В работах /1,3/ было найдено, что в $t/T_{0e} = 28$ функция распределения заметно отличается от максвелловской $f_m(v)$. $f(v)$ в $t/T_{0e} = II2$ близка к $f_m(v)$ (Рис.33).

Для характеристики отличия $f(v)$ от $f_m(v)$ определялась температура электронов по ширине $f(v)$ на уровнях $f(v)/f(0)$, соответствующих интервалу скорости $v/v_T \sim (-1) - (+1)$, $(-1,7) - (+1,7)$, $(-2) - (+2)$ ($f(v)/f(0) \sim 0,6; 0,24; 0,13$). В $t/T_{0e} = 28$ $T(v_T)$, $T(1,7v_T)$ и $T(2v_T)$ заметно различаются. С течением времени $T(2v_T)$ слегка возрастает, а $T(v_T)$ и $T(1,7v_T)$ заметно растут и по величине приближаются к $T(2v_T)$. Это видно из таблицы 8 и Рис.34, где показана зависимость T/T_0 от времени (T_0 - начальная температура). Сравнение функции распределения в $t/T_{0e} = II2$ с максвелловской $f_m(v)$ с $T/T_0 = 4$

Таблица 8.

Температура электронов в разные моменты времени.
Случай 3-1.

| t/T_{oe} | 0 | 28 | 56 | 84 | 112 |
|-----------------|-----|------|------|------|------|
| $T(V_T)/T_0$ | 1,0 | 2,5 | 3,4 | 3,8 | 3,9 |
| $T(1,7V_T)/T_0$ | 1,0 | 3,6 | 4,0 | 4,1 | 4,1 |
| $T(2V_T)/T_0$ | 1,0 | 4,24 | 4,26 | 4,29 | 4,30 |

показывает, что $f(v)$ близка к $f_m(v)$ в интервале $v/V_T < (-6) - (+5)$ и заметно отличается от нее в районе $v/V_T > 5$ (Рис.33 а-в).

Таким образом, перемешивание электронов при сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$, а также $(N_e - \beta N_i) - N_i - (N_e + \beta N_i)$ приводит к нагреву электронов, причем функция распределения электронов по скоростям вначале заметно отличается от максвелловской, но с течением времени приближается к ней.

Можно ожидать, что за достаточно большое время будет развиваться стохастическая неустойчивость движения ионов. Начальная стадия этой неустойчивости изучалась в случае 3-1. Для ее изучения прослеживалось поведение на фазовой плоскости группы ионов и траекторий ионов с близкими начальными координатами за время $t/T_{oe} \sim 220$. Задавалось девять ионов с одинаковыми невозмущенными начальными скоростями $v_0 \sim 2V_T^i$ ($v_0/v_T \sim 3,65 \cdot 10^{-2}$) и разными $x_0/r_d \sim 47,6-56,2$. Возмущенные начальные скорости этих ионов различны и лежат в пределах $v^0 \sim (1-3)V_T^i$. В $t=0$ эти ионы находятся в районе области захвата ионов в ионно-звуковой волне. Параметры этой области захвата в $t=0$ и $t/T_{oe} = 224$ приведены в таблице 9. На Рис.35 показаны фазовые плоскости ионов в разные моменты времени, на них отмечены x, v частиц $N = 1-9$ в данный момент времени, в частности, в $t=0$. На Рис.36,37 показаны траектории ионов $N = 3-6$. Траектории построены по точкам, тонкая структура траекторий (типа колеба-

Таблица 9.

Параметры области захвата ионов в ионно-звуковой волне.

Узлы сепаратрисы в $t=0$ $x_1/r_d = 42,86$;

$x_2/r_d = 57,14$, максимум $x_m/r_d = 50,0$.

Случай 3-1

| t/T_{oe} | v_ϕ^i/v_T | v_ϕ^i/c_s | v_β^i/c_s | $\frac{v_\phi^i + v_\beta^i}{c_s}$ | $\frac{v_\phi^i - v_\beta^i}{c_s}$ | $\frac{v_\phi^i}{V_T^i}$ | $\frac{v_\beta^i}{V_T^i}$ | $\frac{v_\phi^i + v_\beta^i}{V_T^i}$ | $\frac{v_\phi^i - v_\beta^i}{V_T^i}$ |
|------------|----------------|----------------|-----------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------------|---------------------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| 0 | 0,0915 | 0,915 | 0,89 | 1,81 | 0,02 | 5,01 | 4,88 | 9,89 | 0,13 |
| 224 | 0,15 | 1,51 | 0,43 | 1,94 | 1,08 | 8,28 | 2,35 | 10,63 | 5,93 |

$$c_s = \sqrt{T_e/M}; \quad V_T^i = \sqrt{T^i/M}; \quad v_\beta^i = 2\sqrt{e\phi_0/M}; \quad \frac{M}{m} = 10^2; \quad T_e/T_i = 30.$$

ний малой амплитуды с периодом $\sim T_{oe}$ и т.п.) на рисунке не показана. При построении траекторий в системе ионно-звуковой волны учитывалось изменение ее фазовой скорости: v_ϕ^i возрастает от значения $v_{\phi_0}^i = 0,92$, $c_s = 5,0$ V_T^i до значения $v_{\phi_t}^i \sim 1,5c_s \sim 8,3 V_T^i$ за время $t/T_{oe} \sim 50$, а затем остается практически постоянной. Отметим, что такое изменение v_ϕ^i ($v_{\phi_0}^i/V_T^i \sim 0,092 - v_\phi^i(t)/V_T^i \sim 0,15$) не скажется существенно на траекториях электронов в системе ионно-звуковой волны (эти траектории строились в предположении $v_\phi^i = const$) из-за большой величины $v_{\beta_0}^i$ для электронов ($v_{\beta_0}^i/V_T^i \sim 0,89$).

Как говорилось выше, в случае 3-1 уже в $t/T_{oe} \approx 8$ проявляется собственная нелинейность ионно-звуковой волны - волна укрупняется, а в $t/T_{oe} \approx 18$ начинается захват ионов с $v_0 \leq 2V_T^i$. Захватываются и ионы $N = 1-7$ с $x_0/r_d \sim 47,6-54,4$ (Рис.35, $t/T_{oe} = 28$). Ионы $N = 8,9$ остаются пролетными с $v < v_\phi^i$. Дальнейшее развитие ионно-звуковой волны определяется возмущением плотности и скорости ионов пондеромоторной силой от вторичной и первичной модуляционной неустойчивости, периодическим формированием фронтов плотности и скорости и двойных электрических слоев, а также движением захваченных и стохастических ионов и электронов. Это определяет весьма сложную картину развития $\tilde{n}(x)$ (Рис.19) и фазовой плоскости ионов (Рис.35).

Анализ положения интересующих нас ионов на фазовой плос-

кости в разные моменты времени (Рис.35) и анализ траекторий ионов (Рис.36,37) показывает, что траектории ионов с близкими начальными координатами различны. Так ионы $N = 1$ и 2 захвачены до $t/T_{oe} \sim 40$ (Рис.35, $t/T_{oe} \leq 42$). В $t/T_{oe} > 40$ они выходят из захвата и становятся пролетными с $v > v_{\phi}^i$. Частица $N = 1$ остается пролетной до конца (Рис.35), а частица $N = 2$ вновь захватывается в $t/T_{oe} > 170$ (Рис.35, $t/T_{oe} = 196, 224$). Ионы $N = 3, 4$ и 7 совершают более 1,5 оборотов (Рис.35, $t/T_{oe} \sim 42-91$; Рис.36а,б) и в $t/T_{oe} > 80-100$ выходят из захвата. Дальнейшая судьба их различна: ионы $N = 3$ и 7 попадают в захват ($N = 3$ в $t/T_{oe} \sim 110-160$, $N = 7$ в $t/T_{oe} \sim 140-190$), выходят из захвата и остаются пролетными с $v > v_{\phi}^i$ (Рис.36а, Рис.35). Ион $N = 4$ вновь захватывается в $t/T_{oe} \sim 90-140$, выходит из захвата, становится пролетным с $v < v_{\phi}^i$ и вновь захватывается в $t/T_{oe} > 180$ (Рис.36б, Рис.35). Частицы $N = 5$ и 6 дольше других остаются захваченными — они совершают более 2,5 оборотов (Рис.37а,б; Рис.35, $t/T_{oe} \leq 132$) и выходят из захвата $N = 5$ в $t/T_{oe} > 140$, $N = 6$ в $t/T_{oe} > 130$. Дальнейшая их судьба различна: частица $N = 5$ остается пролетной с $v > v_{\phi}^i$ (Рис.37а), частица $N = 6$ вновь захватывается в $t/T_{oe} \approx 160$, но сразу же выходит из захвата в $t/T_{oe} \approx 200$ и становится пролетной с $v < v_{\phi}^i$ (Рис.37б; Рис.35). Ионы $N = 8$ и 9 все время остаются пролетными.

Таким образом, траектории ионов имеют вид, характерный для стохастического движения: ион то захватывается, то становится пролетным. Траектории ионов с близкими начальными координатами различаются (Рис.36,37) и расходятся на фазовой плоскости. Компактная группа ионов (Рис.35, $t = 0$) разбрасывается по фазовой плоскости (Рис.35, $t/T_{oe} = 224$).

Анализ фазовых плоскостей ионов (Рис.35) показывает, что захваченные ионы с $v_0 \leq 2v_T^i$ (напомним, что начальное распределение ионов обрезано на $v_0 \sim 2v_T^i$) вначале двигаются по внешним траекториям вблизи сепаратрисы, четко очерчивая область захвата (Рис.35, $t/T_{oe} = 28-56$). Позже область, куда попадают ионы, расширяется, включая часть фазовой плоскости внутри области захвата и вне ее. Это свидетельствует об образовании стохастического слоя в районе области захвата ионно-звуковой волны. По фазовым плоскостям ионов видно, что с течением времени слой начинает занимать практически всю область захвата ионно-звуковой волны (Рис.35, $t/T_{oe} \approx 196$). Верхнюю границу стохастическо-

го слоя можно определить по максимальной скорости ионов в $t/T_{oe} \sim 224$, $v_{max} \sim 3,4$, $c_s \sim 18,7 v_T^i$. Если принять внутреннюю границу слоя равной $v_{\phi}^i \sim 1,5$, $c_s = 8,3 v_T^i$, то ширина стохастического слоя ионов (верхнего) $\Delta \sim 1,9$, $c_s \sim 10,6 v_T^i$; $\Delta/v_{\phi}^i \sim 4,5$.

Таким образом, приведенные факты свидетельствуют о развитии стохастической неустойчивости движения ионов в районе области захвата ионов ионно-звуковой волны.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Неустойчивость ленгмюровских волн в неоднородной плазме. IУ". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 82-53, 1982.
- 2,3. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Взаимодействие ленгмюровской волны с ионно-звуковой. Стохастические эффекты. I,II". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 88-139 (2), № 88-163 (3), 1988.
4. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Взаимодействие ленгмюровской волны с ионно-звуковой. Стохастические эффекты. III,IV". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 89-36, 1989; № 89-106, 1989.
5. P.K.Kaw, A.T.Lin, J.M.Dawson. Phys. Fluids 16, 1967, 1973.
6. N.S.Buchelnikova, E.P.Matochkin. Physica Scripta 24, 566, 1981.
7. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин.
 - а. "Стоячие ленгмюровские волны большой амплитуды. Развитие ионного возмущения". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 84-80, 1984.
 - б. "Ионные волны большой амплитуды. I,II". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 83-88, № 83-89, 1983.
8. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Ионно-звуковые волны большой амплитуды. Стохастические эффекты. I". Препринт ИЯФ СО АН СССР №
9. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Развитие ионного возмущения. Двойные слои и стохастические эффекты". Препринт ИЯФ СО АН СССР №

Подписи к рисункам:

- Рис.1. Зависимость от времени границ области захвата $V_{\phi}^N + V_{\beta}^N$ и $V_{\phi}^N - V_{\beta}^N$ ионно-звуковой волны $N_i = 2$ и основных гармоник конверсии $N_e + N_i = 3$ и $N_e - 2N_i = -3$. Случай I-I. Стрелки - границы стохастических слоев, $V_{\beta}^N = 2\sqrt{e\varphi^N/m}$.
- Рис.2. Распределение возмущения плотности $\tilde{n}(x)$ в разные моменты времени. Случай I-I.
- Рис.3. Зависимость от времени доли частиц $\Delta n/n_0$ в определенном интервале скоростей. Случай I-I. Группа I.
 1. $\Delta n/n_0$ вне области захвата по x и v ;
 2. $v > |V_{\phi}^i \pm V_{\beta}^i|$; 3. $v > |V_{\phi}^i \pm V_{\beta}^i|$; 4. $v > |\pm V_T|$;
 5. $v > |\pm 2V_T|$.
- Рис.4-12. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. Случай I-I. Группа I. Цифры на траектории - моменты времени, когда частица имеет данные x и v . Траектории в системе волны N_i : $x = x - V_{\phi}^N t$; $v = v - V_{\phi}^N$.
- Рис.13. Область захвата ионно-звуковой волны, половины областей захвата гармоник конверсии $N_e = 3$ и $N_e = -3$ в $t = t_{max}$ и $t/T_{oe} = \Pi/2$ (пунктир) и границы стохастических слоев в $t/T_{oe} = \Pi/2$ (стрелки). Случай I-I.
- Рис.14. Зависимость от времени границ стохастического слоя ионно-звуковой волны. Случай I-I.

x - внешние границы по предельному V_0 из работы /2/. Сплошная линия, пунктир, широкий пунктир - разные определения внешней границы.
- Рис.15. Зависимость от времени ширины стохастического слоя ионно-звуковой волны. Случай I-I.

а. Δ/V_T ; б. Δ/V_{β}^i .

x - верхний слой; o - нижний слой. Сплошная или пунктирная линия - ширина слоя по границам Рис.14 сплошной или пунктирной.

- Рис.16. Функции распределения пробных частиц по скоростям в разные моменты времени. Случай I-I. Группа I.
а. $t/T_{oe} = 28$; б. $t/T_{oe} = 56$; в. $t/T_{oe} = 112$.
Пунктир - начальная функция распределения.
- Рис.17. Функция распределения электронов по скоростям $f(v)/f_0(0)$ в логарифмическом и линейном масштабе, $f(v)/f_0(v)$ в линейном масштабе. Случай I-I.
 $t/T_{oe} = 112$.
Пунктир - начальная функция распределения $f_0(v)$.
- Рис.18. Зависимость от времени границ области захвата $(v_{\phi}^N + v_z^N)$ и $(v_{\phi}^N - v_z^N)$ ионно-звуковой волны $N_i = 7$ и основных гармоник конверсии $N_e + N_i = 8$ и $N_e - N_i = -6$. Случай 3-I.
Стрелки - границы стохастических слоев.
- Рис.19. Распределение возмущения плотности $\tilde{n}(x)$ в разные моменты времени. Случай 3-I.
- Рис.20. Зависимость от времени доли частиц $\Delta n/n_0$ в определенном интервале скоростей. Случай 3-I. Группа I.
1. $\Delta n/n_0$ вне области захвата по x и v ;
2. $v > |v_{\phi}^i \pm v_z^i|$; 3. $v > |v_{\phi}^i \pm v_{z0}^i|$; 4. $v > |\pm v_T|$;
5. $v > |\pm 2v_T|$; 6. $v > |v_{\phi}^{\pm N}|$.
- Рис.21-28. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. Случай 3-I. Группа I.
Цифры на траектории - моменты времени, когда частица имеет данные x и v .
- Рис.29. Области захвата ионно-звуковой волны, половины областей захвата гармоник конверсии $N_e = 8$ и $N_e = -6$ в $t = t_{max}$ и $t/T_{oe} = 112$ (пунктир) и границы стохастических слоев в $t/T_{oe} = 112$ (стрелки). Случай 3-I.
- Рис.30. Зависимость от времени границ стохастического слоя ионно-звуковой волны. Случай 3-I.
 x - внешние границы по предельному v_0 из работы /3/.

- Рис.31. Зависимость от времени ширины стохастического слоя ионно-звуковой волны. Случай 3-I.
а. Δ/v_T ; б. Δ/v_{z0}^i .
 x - верхний слой; o - нижний слой.
- Рис.32а,б. Функции распределения пробных частиц по скоростям в разные моменты времени. Случай 3-I. Группа I.
а. $t/T_{oe} = 28$; б. $t/T_{oe} = 112$.
Пунктир - начальная функция распределения.
- Рис.32в. Функции распределения электронов $f(v)/f_0(v)$ в разные моменты времени. Случай 3-I.
 $t/T_{oe} = 0$ - пунктир; $t/T_{oe} = 28$ - крупный пунктир;
 $t/T_{oe} = 56$ - мелкий пунктир; $t/T_{oe} = 84$ - точечный пунктир; $t/T_{oe} = 112$ - сплошная.
- Рис.33. Функция распределения электронов по скоростям $f(v)/f_0(v)$ в логарифмическом и линейном масштабе, $f(v)/f_0(v)$ в линейном масштабе. Случай 3-I.
 $t/T_{oe} = 112$.
 $f(v)$ - сплошная; $f_0(v)$ - пунктир; $f_m(v)$ - мелкий пунктир.
 $f_m(v)$ - максвелловская функция распределения с температурой $T = 4T_0$; $f_0(v)$ - начальная функция распределения с $T = T_0$.
- Рис.34. Зависимость от времени температуры электронов T/T_0 . Случай 3-I.
 $T(v_T)$, $T(1,7v_T)$, $T(2v_T)$ - температура определения по ширине $f(v)$ на уровне, соответствующем интервалу скоростей $v/v_T \sim (-1)-(+1)$; $(-1,7)-(+1,7)$; $(-2)-(+2)$; T_0 - начальная температура.
- Рис.35. Фазовые плоскости ионов в разные моменты времени. Случай 3-I.
Цифры показывают x, v ионов $N = 1-9$ в данный момент времени; $c_s = \sqrt{T_e/M} = 0,1 v_T$; $v_T^i = \sqrt{T_i/M} = 1,826 \cdot 10^{-2} v_T$.
Галочкой отмечено положение начальной области захвата ионов (таблица 9) в данное t .

Рис.36,37. Траектории ионов на фазовой плоскости. Случай 3-Г.
 Цифры на траектории — моменты времени, когда ион
 имеет данные x и v .

а б в г
 $N = 3$ $N = 4$ $N = 5$ $N = 6$

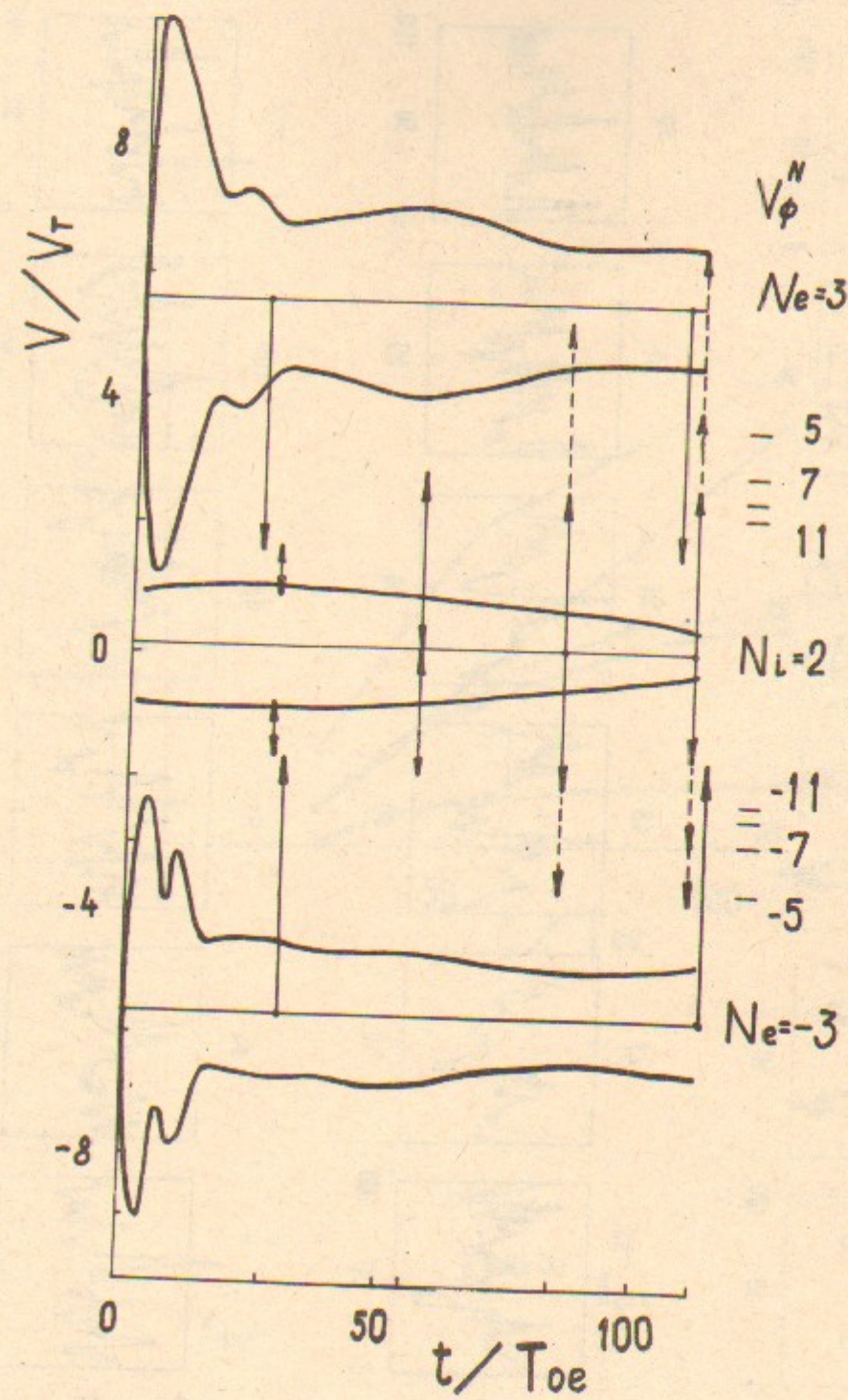


Рис. I.

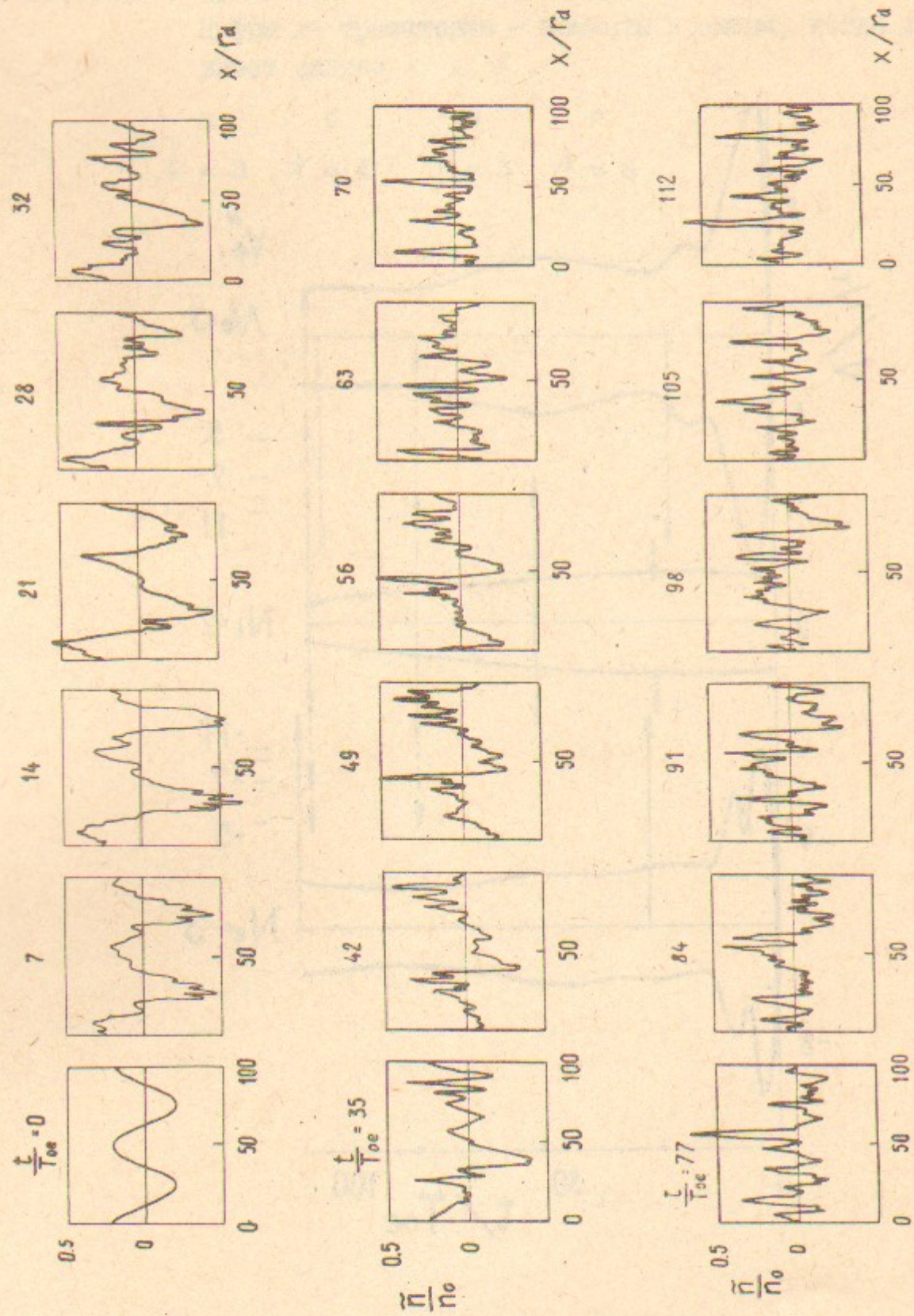


Рис. 2.

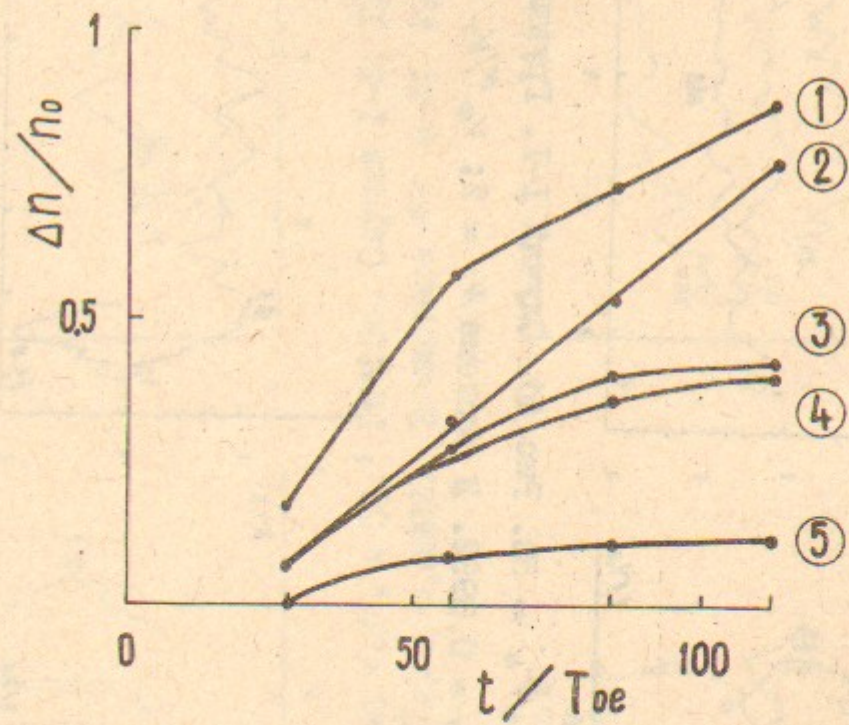


Рис. 3.

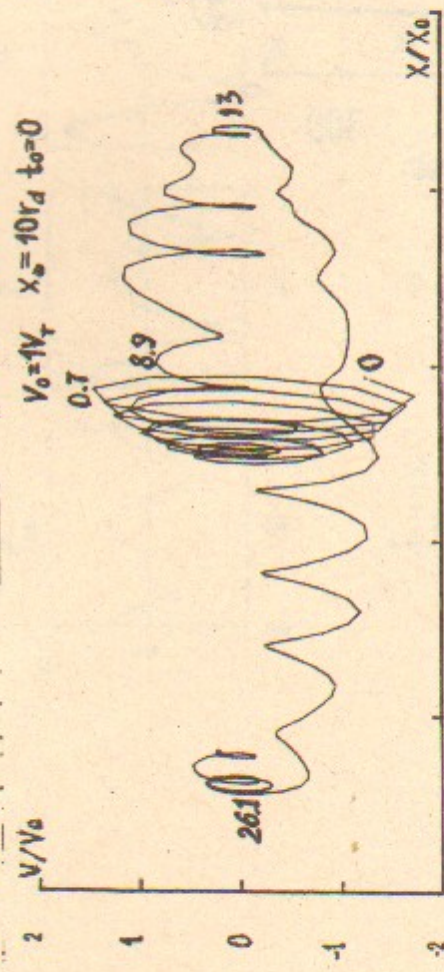


Рис.4а. Случай I-I. Группа I; $N = 2$, $X_0/r_d = 50$. Рис.4б. Случай I-I. Группа I; $N = 2$.
 $V_0/V_T = -0,095$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 28$.

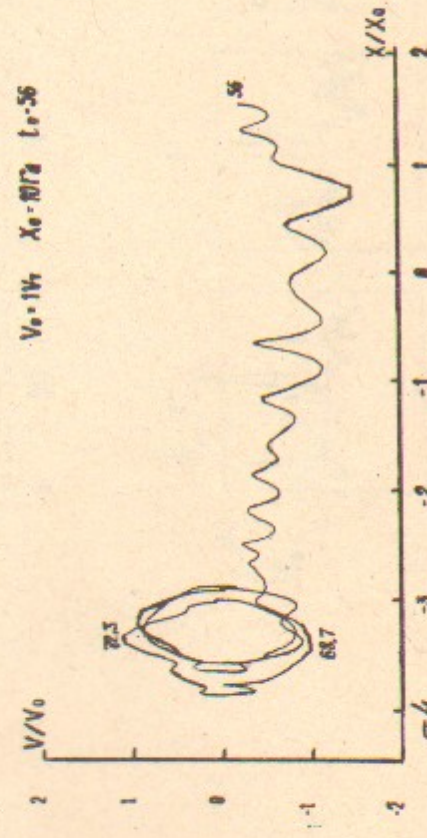


Рис.4в. Случай I-I. Группа I; $N = 2$.
 В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 56$.

Рис.4г. Случай I-I. Группа I; $N = 2$.
 В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 84$.

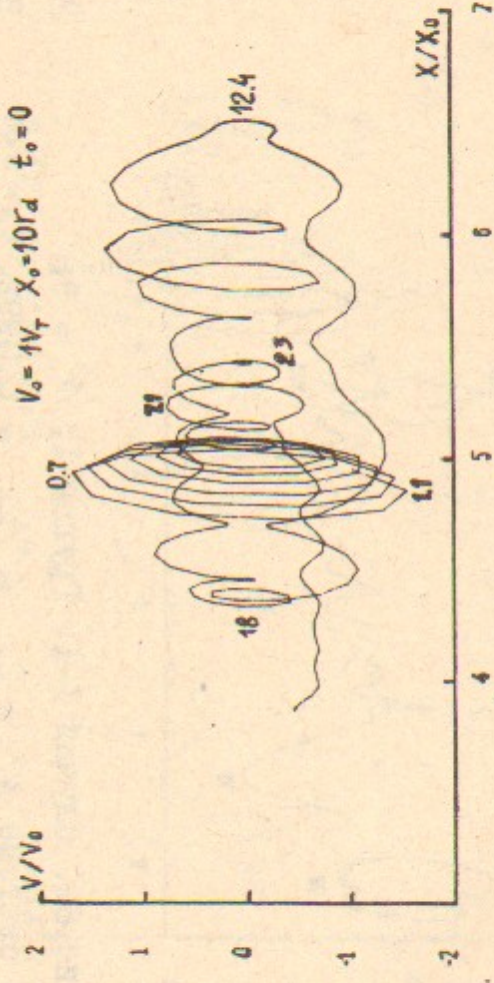
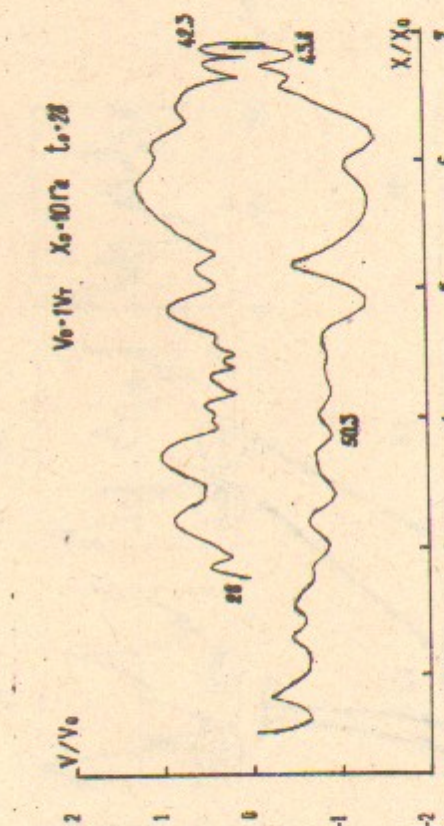
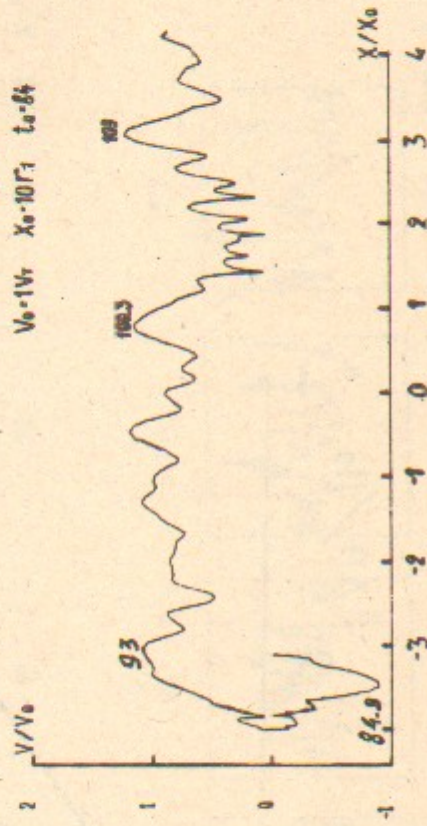


Рис.5а. Случай I-I. Группа I; $N = 8$; $X_0/r_d = 50$.
 $V_0/V_T = 0,095$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$.

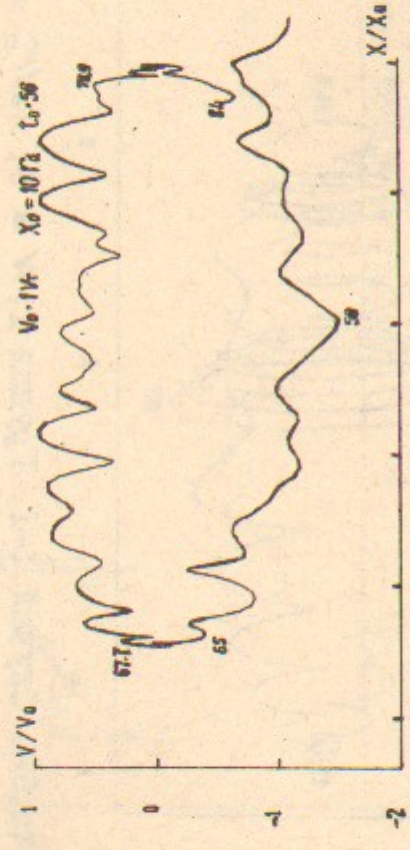


Рис.5в. Случай I-I. Группа I; $N = 8$.
 В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 56$.

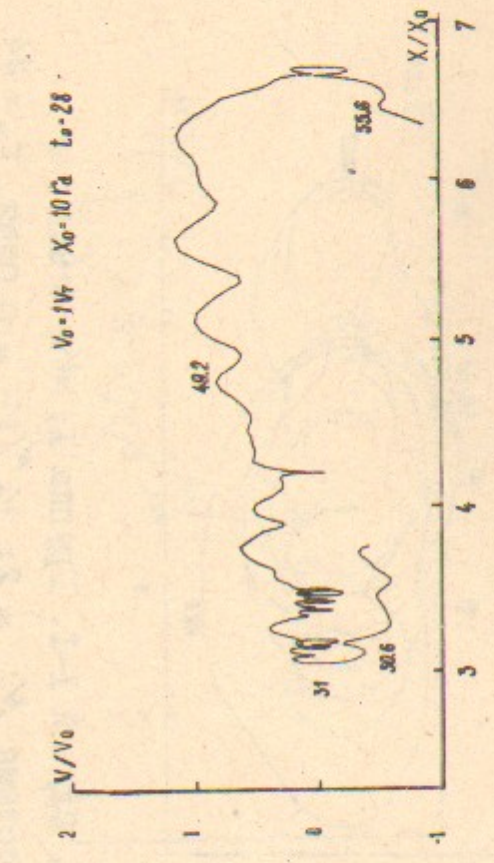


Рис.5б. Случай I-I. Группа I; $N = 8$.
 В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 28$.

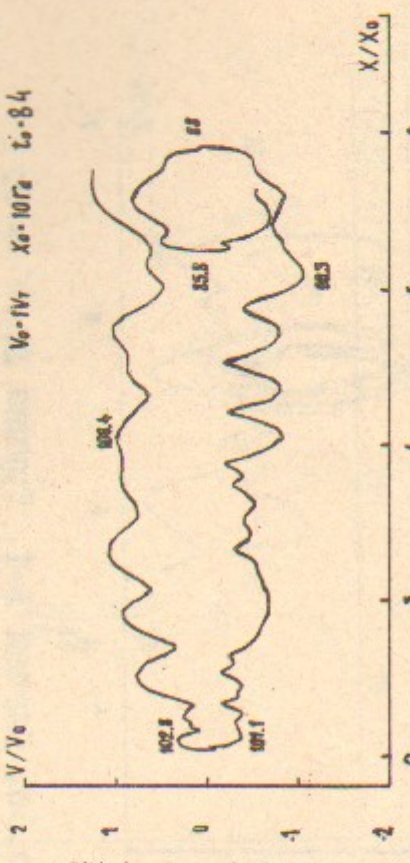


Рис.5г. Случай I-I. Группа I; $N = 8$.
 В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 84$.

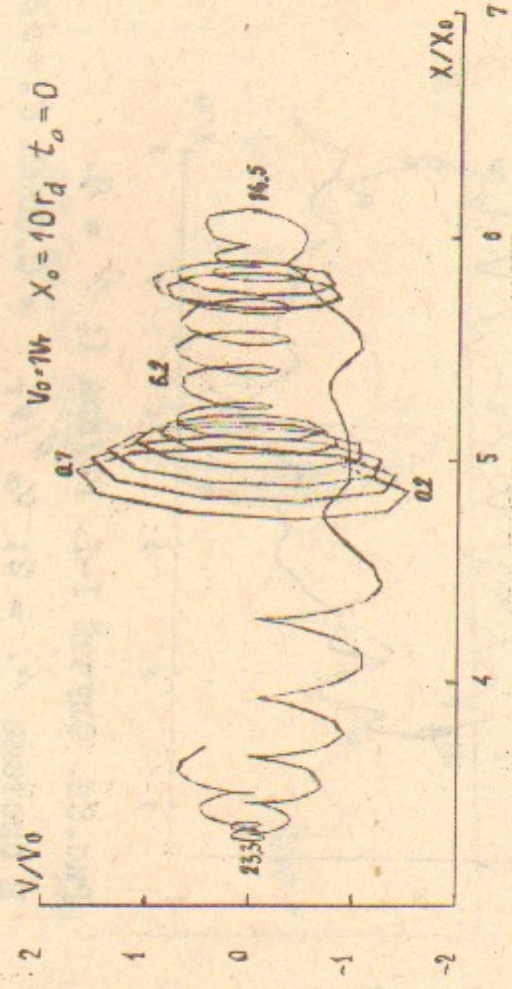


Рис.6а. Случай I-I. Группа I; $N = 9$; $X_0/\Gamma_d = 50$, Рис.6б. Случай I-I. Группа I; $N = 9$;
 $V_0/V_T = 0,124$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 28$.

88

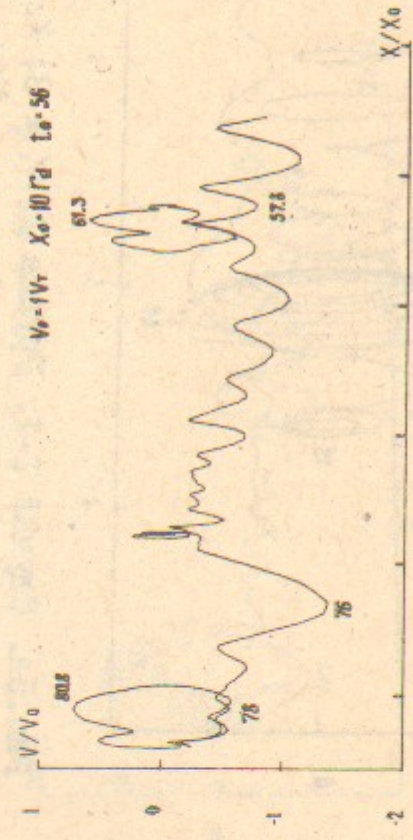


Рис.6в. Случай I-I. Группа I; $N = 9$;
 В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 56$.

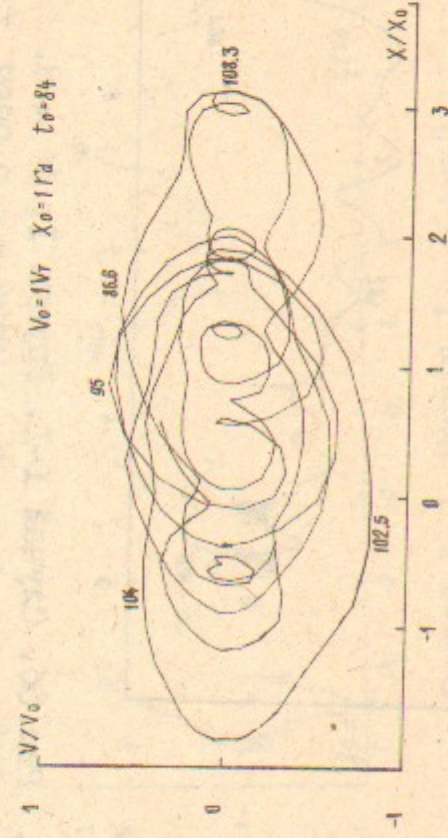


Рис. Случай I-I. Группа I; $N = 9$.
 В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 84$.

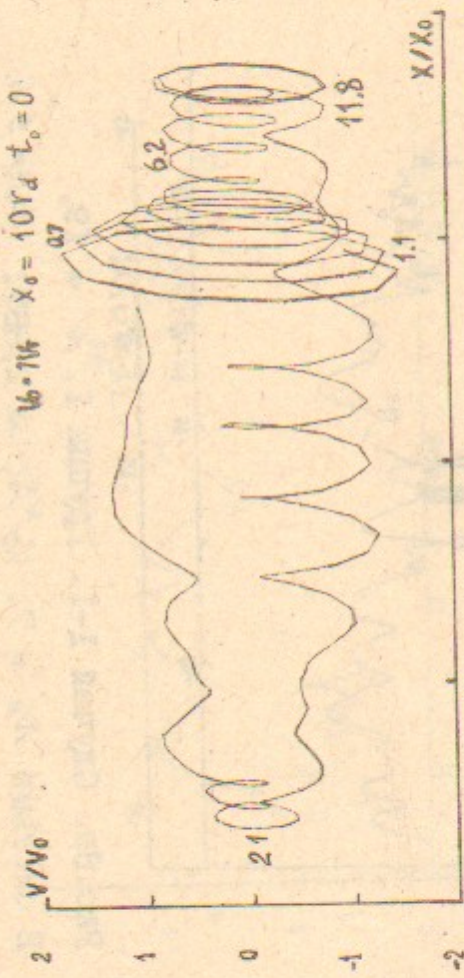


Рис.7а. Случай I-I. Группа I. $N = 19$; $X_0/\Gamma_d = 50$.
 $V_0/V_T = 0,137$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$.

89

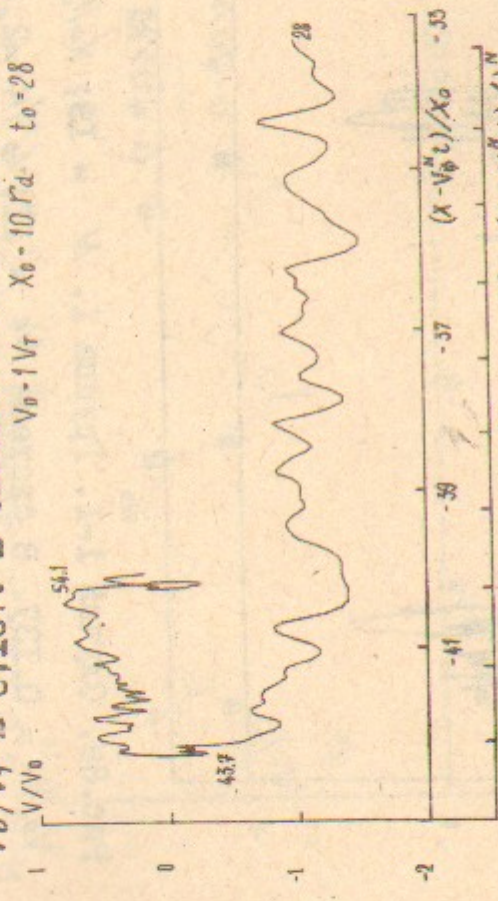


Рис.7б. Случай I-I. Группа I. $N = 19$.
 В системе $N_e = II$; $V_\phi^N/V_T = 2,2615$. $t_0 = 28$.

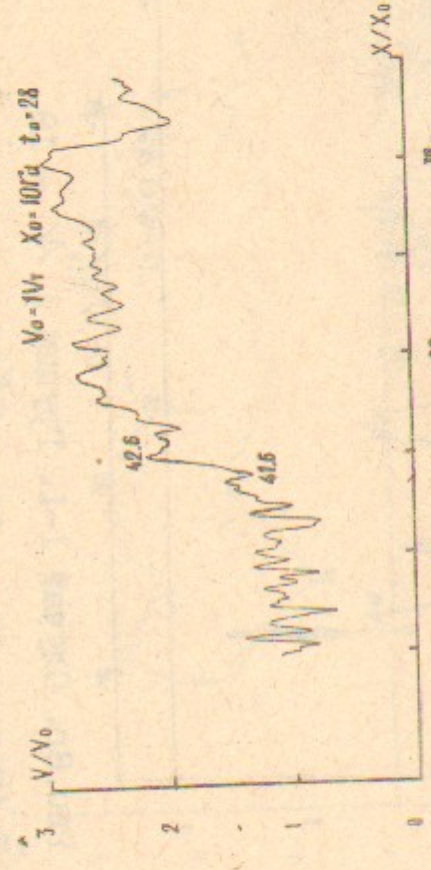


Рис.7в. Случай I-I. Группа I. $N = 19$;
 В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$. $t_0 = 28$.

90

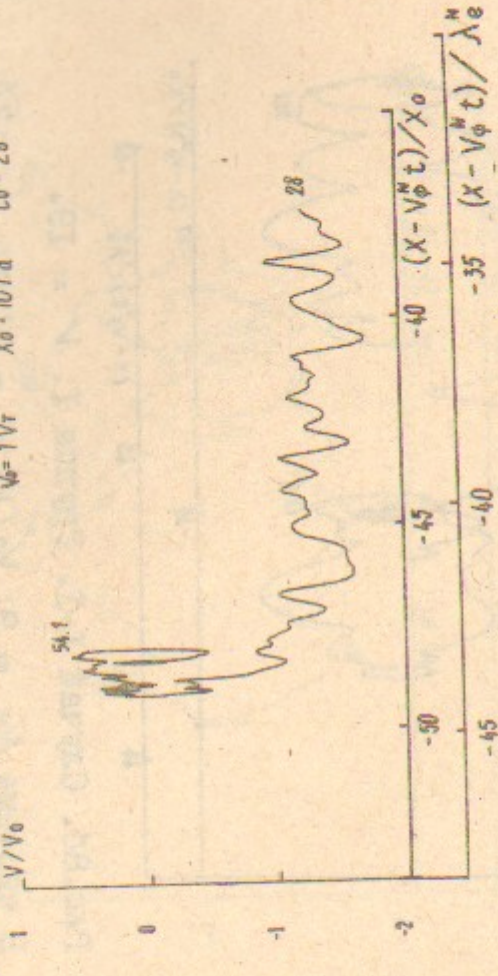


Рис.7г. Случай I-I. Группа I. $N = 19$.
 В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N/V_T = 2,482$. $t_0 = 28$.

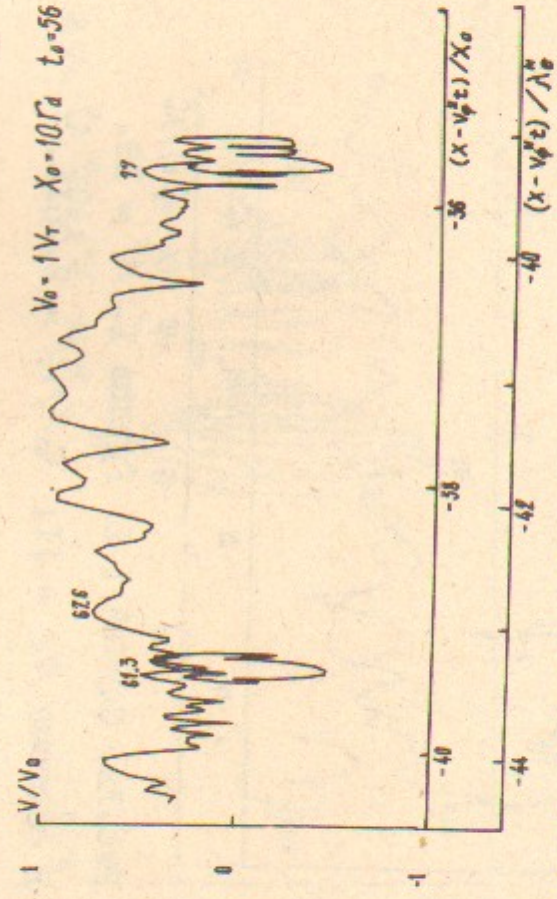


Рис.8а. Случай I-I. Группа I. $N = 19$; $X_0/l_d = 50$. Рис.8б. Случай I-I. Группа I. $N = 19$.

$V_0/V_T = 0,137$. В системе $N_e = II$; $V_\phi^N/V_T = 2,2615$. В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N/V_T = 2,482$. $t_0 = 56$.

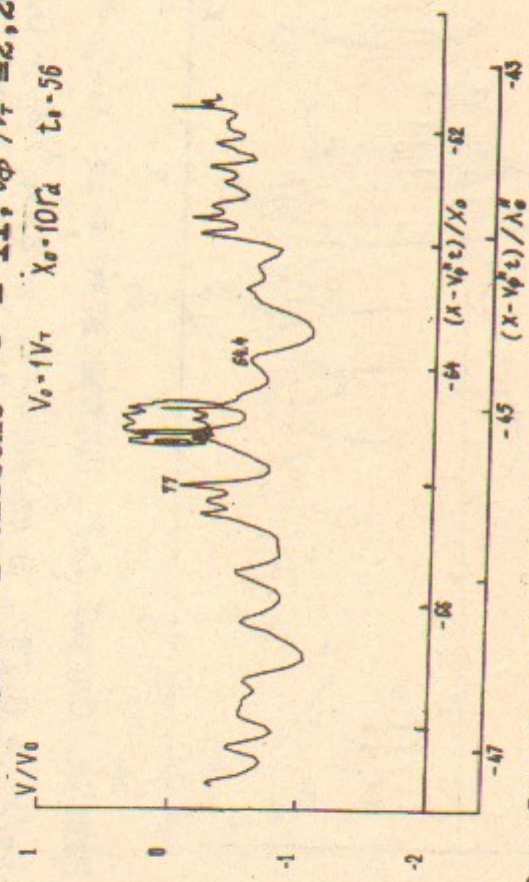


Рис.8в. Случай I-I. Группа I. $N = 19$.

В системе $N_e = 7$; $V_\phi^N/V_T = 2,867$. $t_0 = 56$.

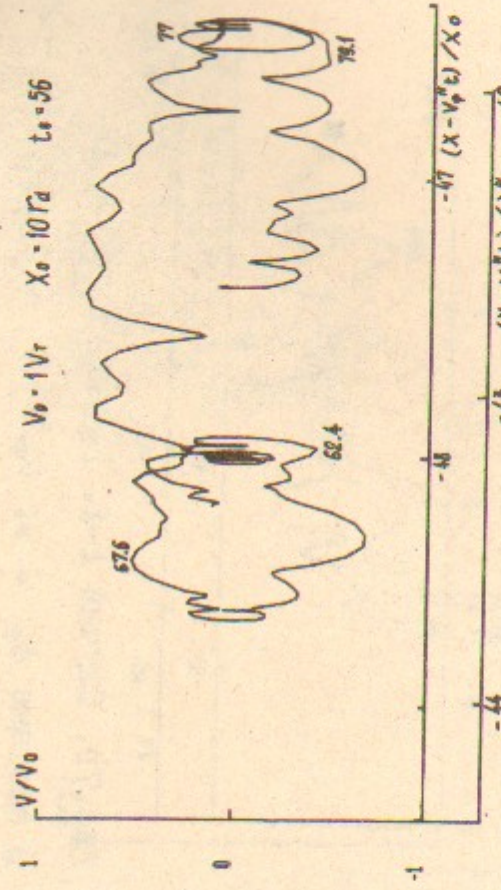


Рис.8г. Случай I-I. Группа I. $N = 19$.

В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N/V_T = 2,482$. $t_0 = 56$.

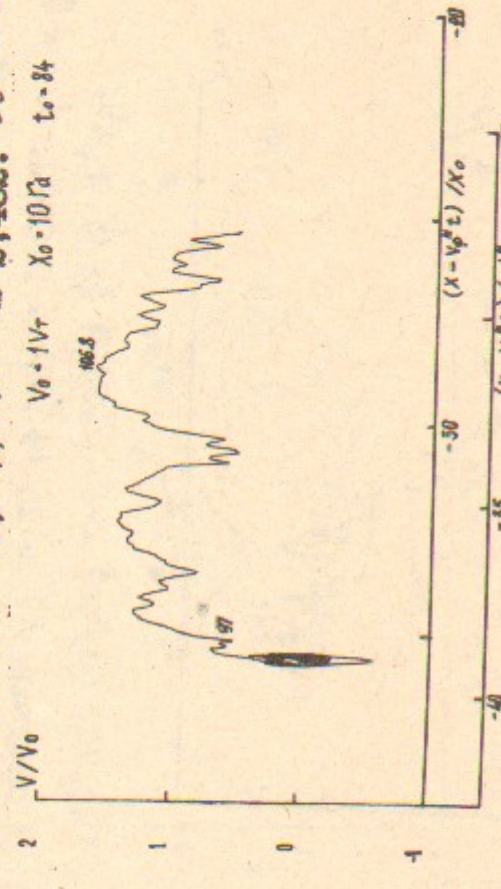


Рис.8д. Случай I-I. Группа I. $N = 19$.

В системе $N_e = II$; $V_\phi^N/V_T = 2,2615$. $t_0 = 84$.

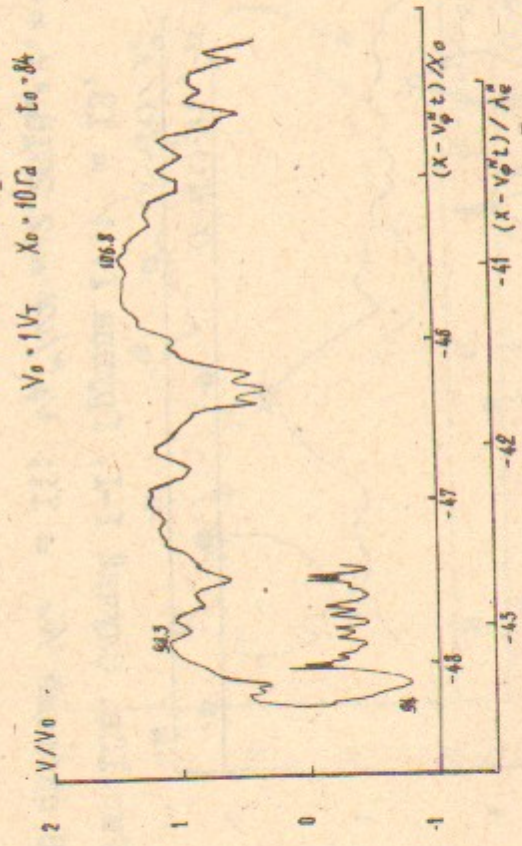


Рис.9а. Случай I-I. Группа I. $N = 19$; $X_0/l_d = 50$.

$V_0/V_T = 0,137$. В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N/V_T = 2,482$.

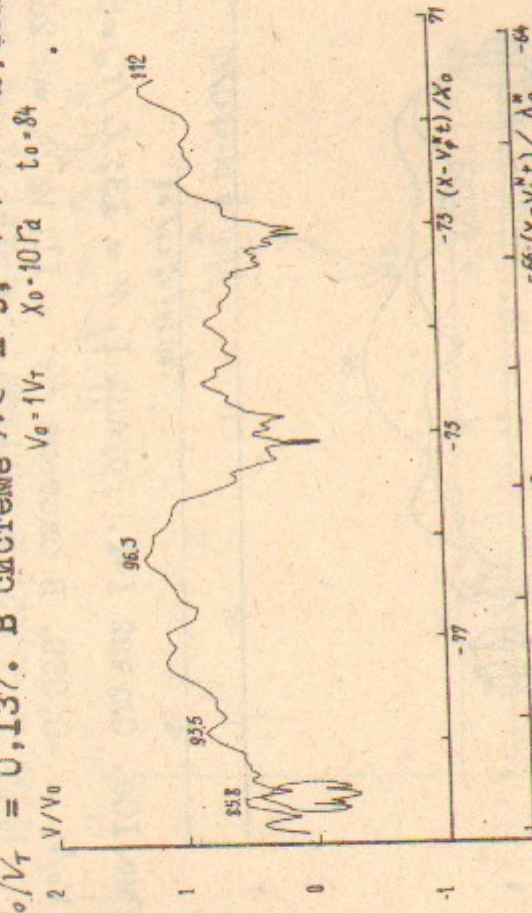


Рис.9в. Случай I-I. Группа I. $N = 12$; $X_0/l_d = 50$.

В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N/V_T = 2,482$.

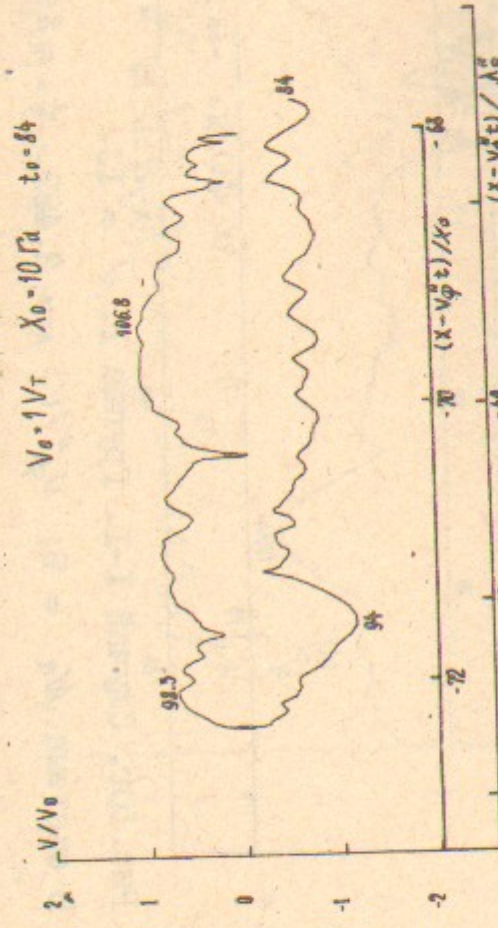


Рис.9г. Случай I-I. Группа I. $N = 19$.

В системе $N_e = 7$; $V_\phi^N/V_T = 2,867$. $t_0 = 84$.

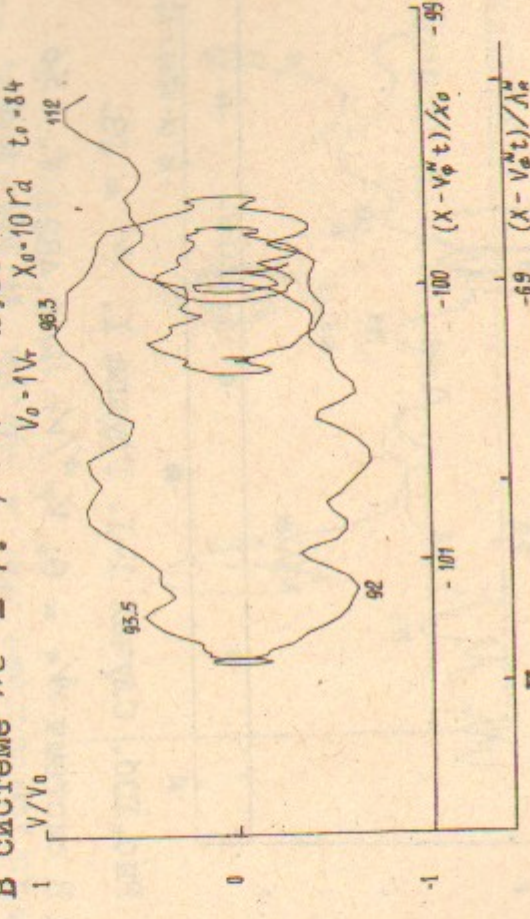


Рис.9д. Случай I-I. Группа I. $N = 12$.

В системе $N_e = 7$; $V_\phi^N/V_T = 2,867$. $t_0 = 84$.

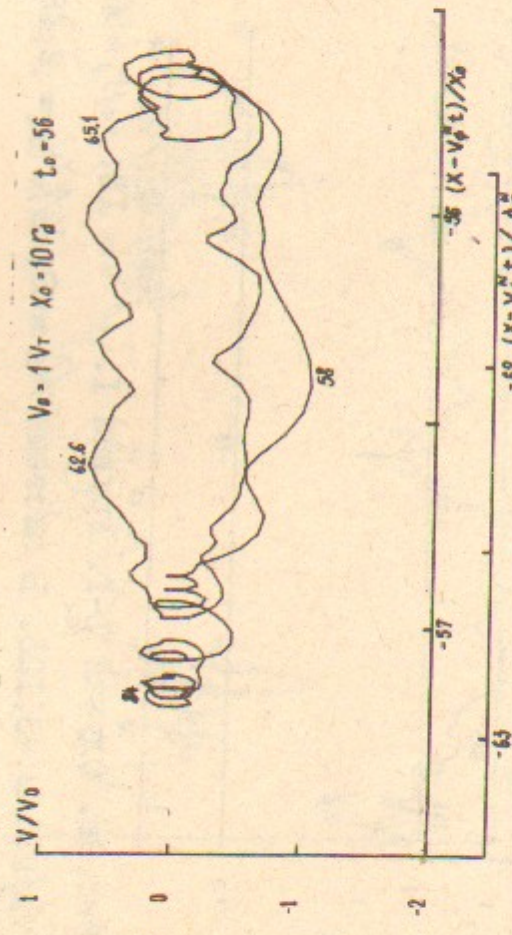


Рис.10а. Случай I-I. Группа I. $N = 13$; $X_0 / r_d = 50$. Рис.10б. Случай I-I. Группа I. $N = 13$.

$V_0 / V_T = -0,099$. В системе $N_e = 11$; $V_\phi^N / V_T = 2,2615$. В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N / V_T = 2,482$. $t_0 = 56$.

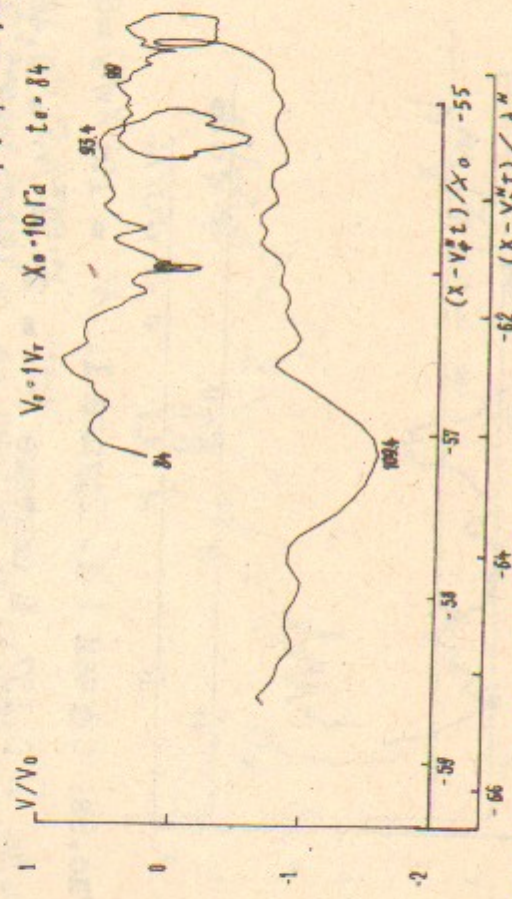


Рис.10в. Случай I-I. Группа I. $N = 13$, В системе $N_e = 11$; $V_\phi^N / V_T = 2,2615$. $t_0 = 84$.

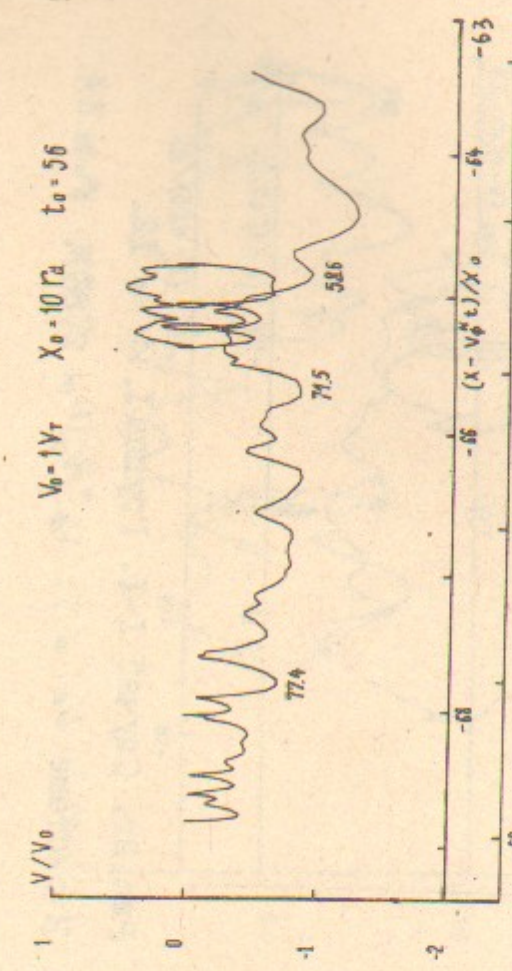


Рис.10г. Случай I-I. Группа I. $N = 13$.

В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N / V_T = 2,482$. $t_0 = 56$.

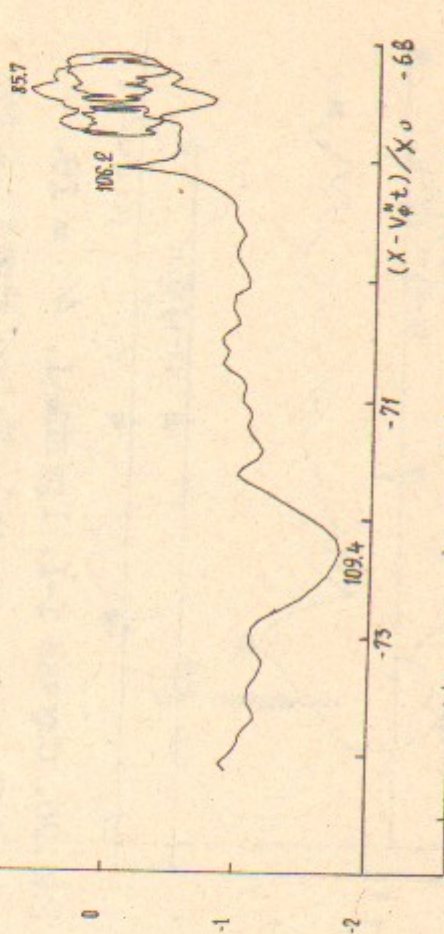


Рис.10г. Случай I-I. Группа I. $N = 13$.

В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N / V_T = 2,482$. $t_0 = 84$.

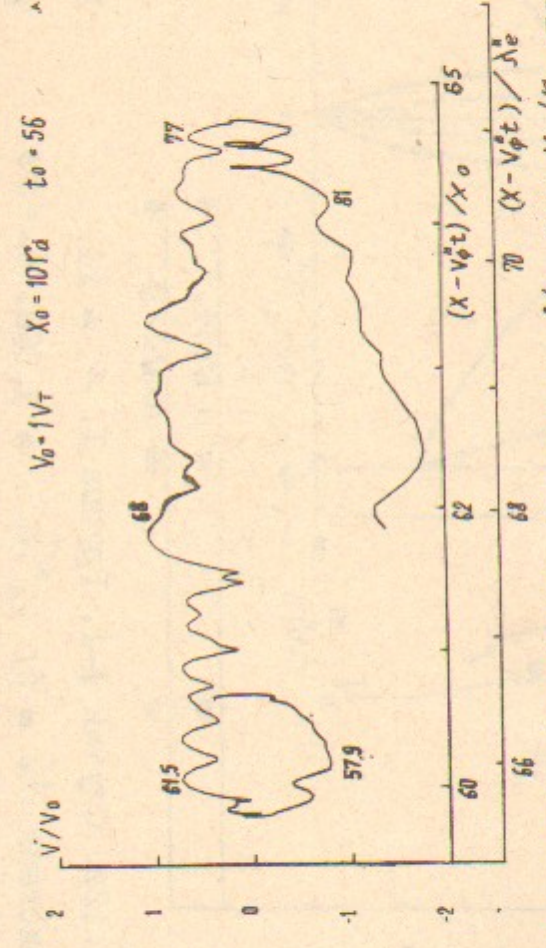


Рис.11а. Случай I-I. Группа I. $N = 15$; $X_0 / r_d = 50$. Рис.11б. Случай I-I. Группа I. $N = 15$.

$V_0 / V_T = -0,12$. В системе $N_e = -11$, $V_\phi^N / V_T = -2,2615$. В системе $N_e = -9$, $V_\phi^N / V_T = -2,482$. $t_0 = 56$.

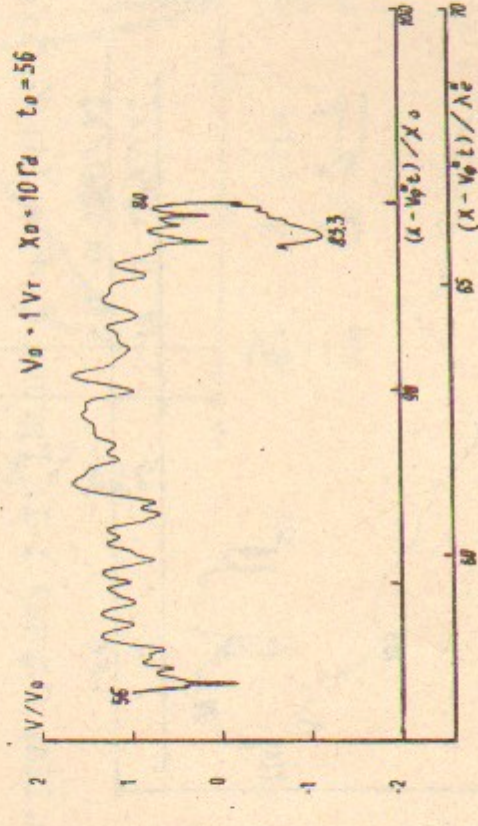


Рис.11в. Случай I-I. Группа I. $N = 15$.

В системе $N_e = -7$, $V_\phi^N / V_T = -2,867$. $t_0 = 56$.

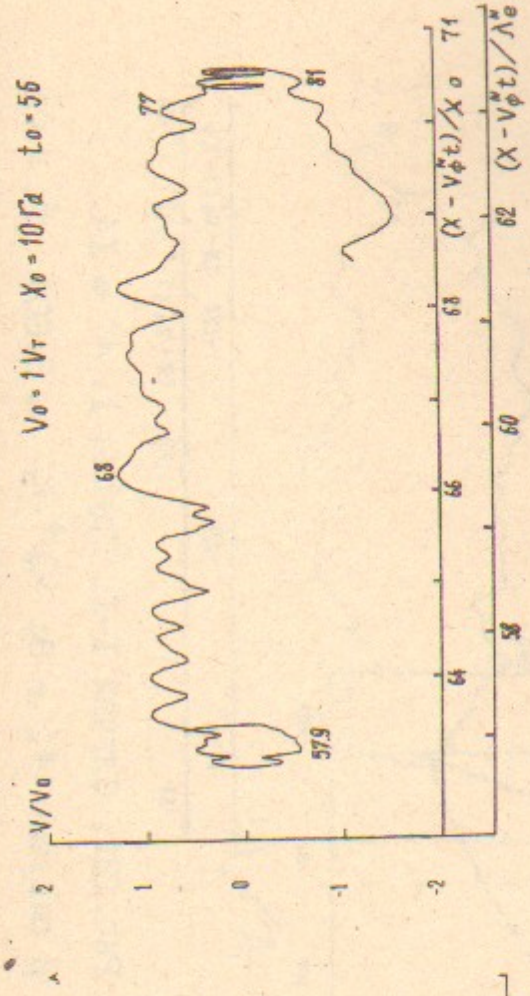
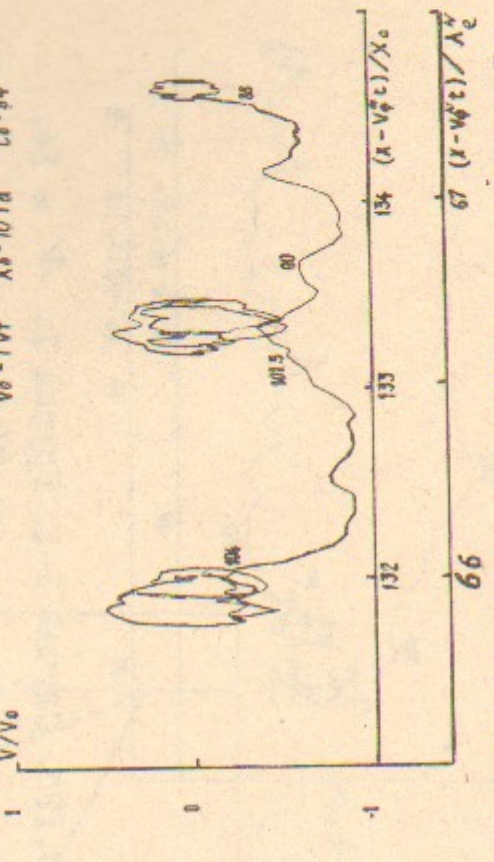


Рис.11г. Случай I-I. Группа I. $N = 15$.

В системе $N_e = -5$, $V_\phi^N / V_T = -3,638$. $t_0 = 84$.



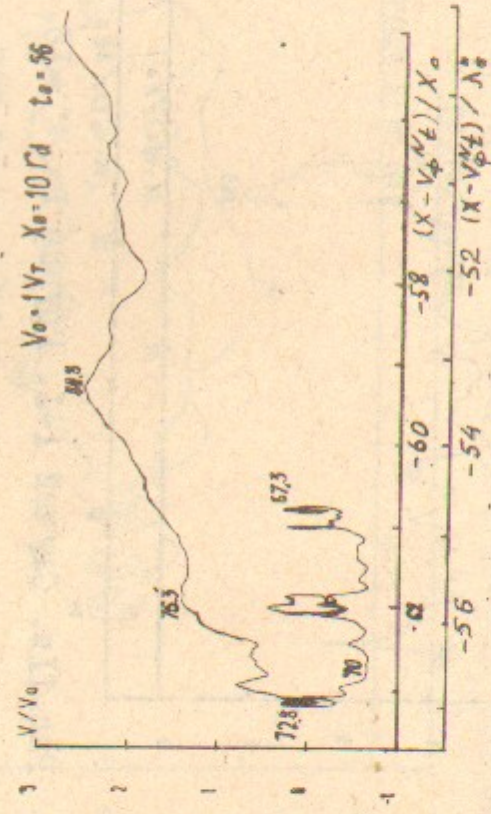


Рис. 12а. Случай I-I. Группа I. $N = 14$; $X_0/\Gamma_d = 50$.

В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N/V_T = 2,482$. В системе $N_e = 9$; $V_\phi^N/V_T = 2,482$.

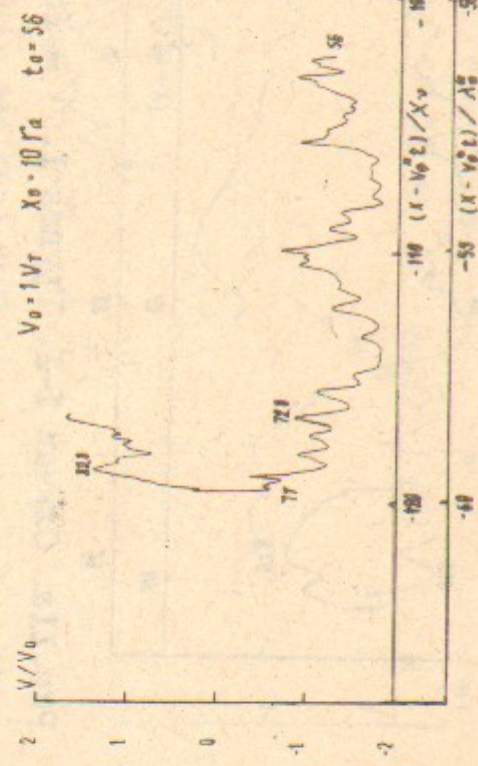


Рис. 12в. Случай I-I. Группа I. $N = 14$.

В системе $N_e = 5$; $V_\phi^N/V_T = 3,368$. $t_0 = 56$.

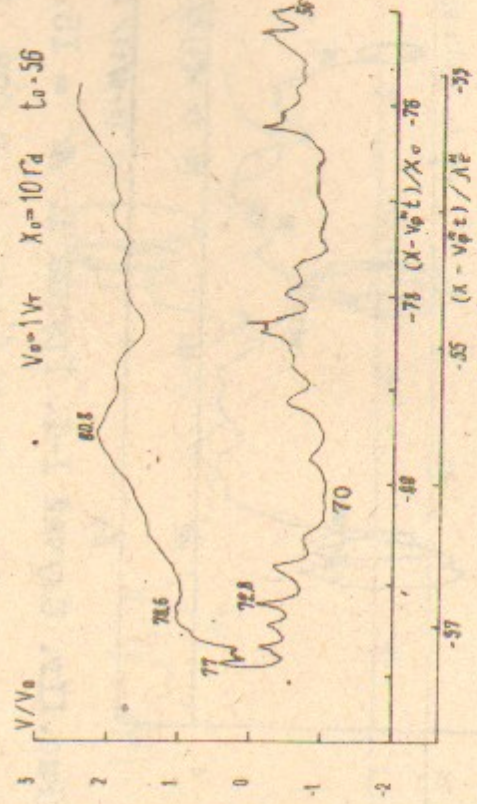


Рис. 12б. Случай I-I. Группа I. $N = 14$.

В системе $N_e = 7$; $V_\phi^N/V_T = 2,867$. $t_0 = 56$.

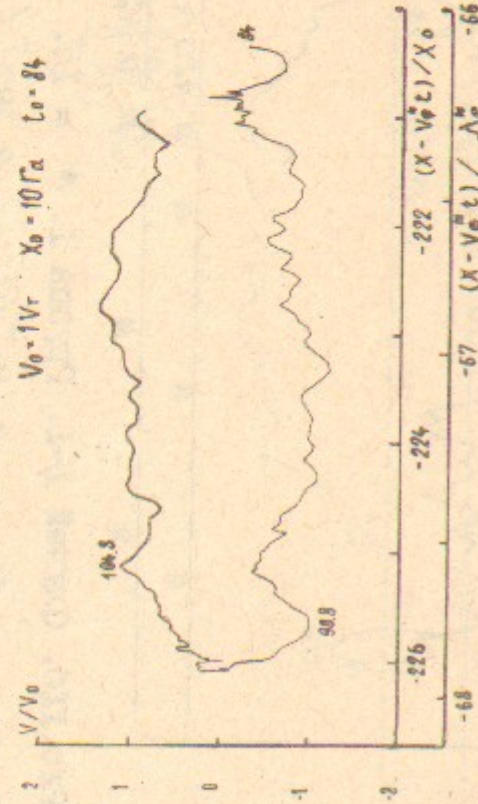


Рис. 12г. Случай I-I. Группа I. $N = 14$.

В системе $N_e = 3$; $V_\phi^N/V_T = 5,606$. $t_0 = 56$.

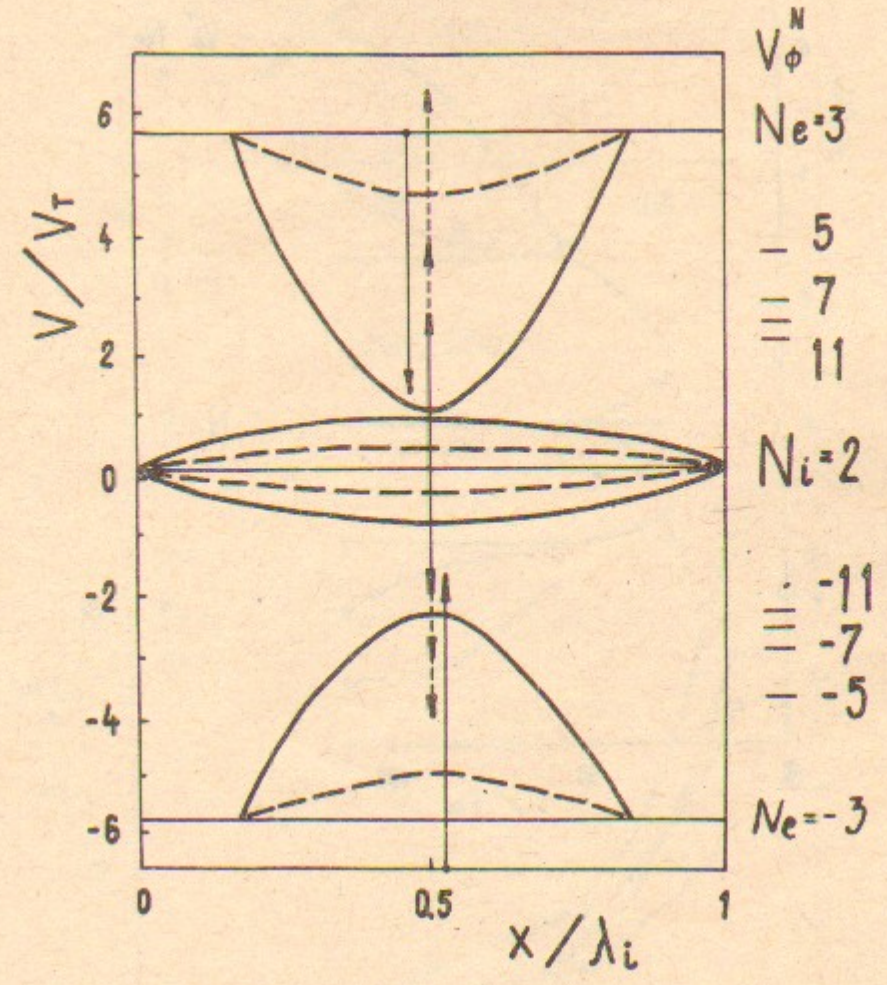


Рис. 13.

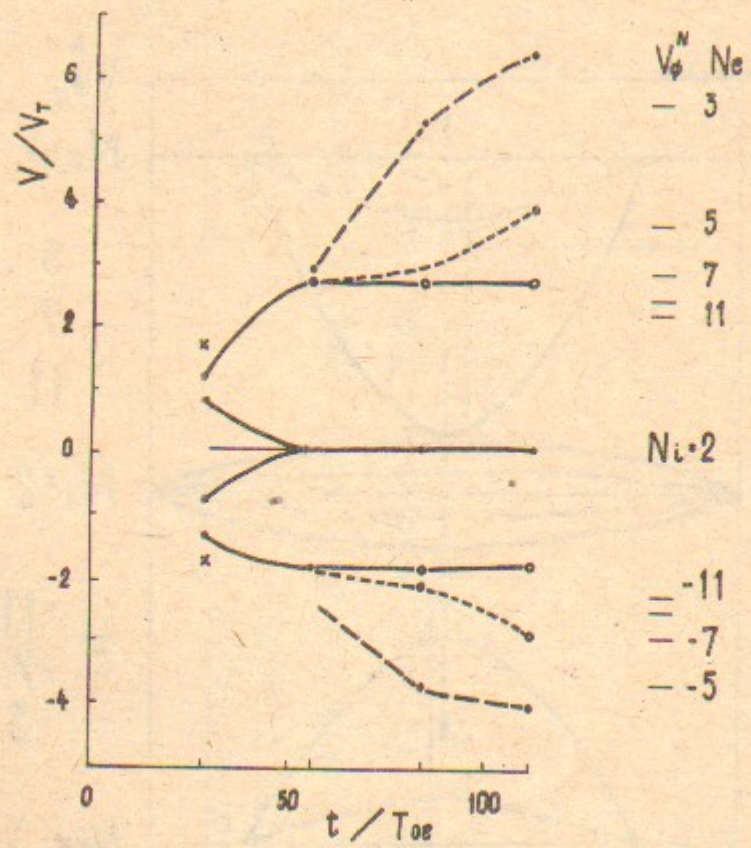


Рис. 14.

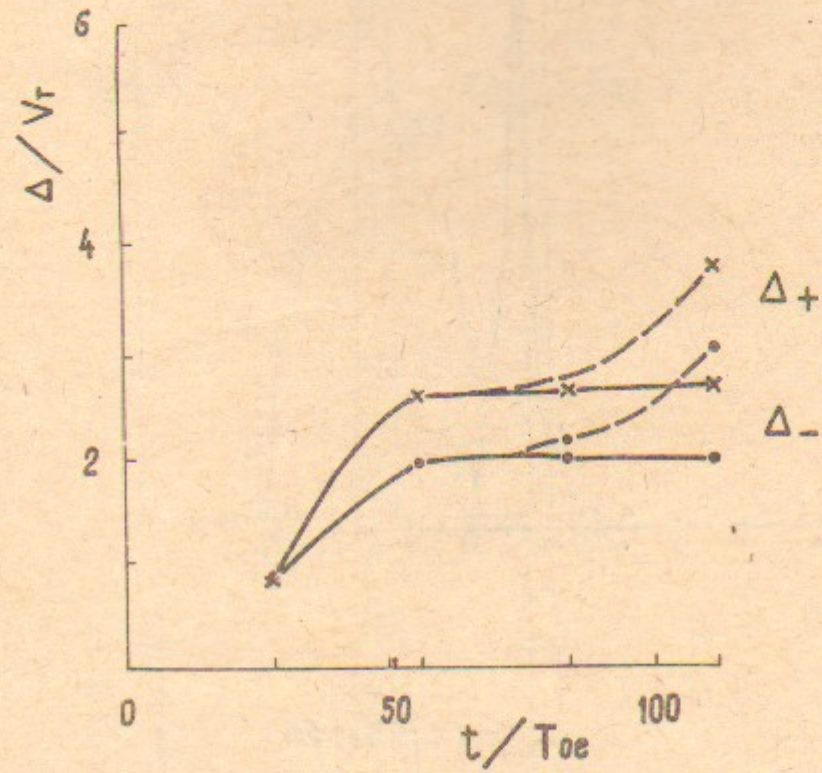


Рис. 15а.

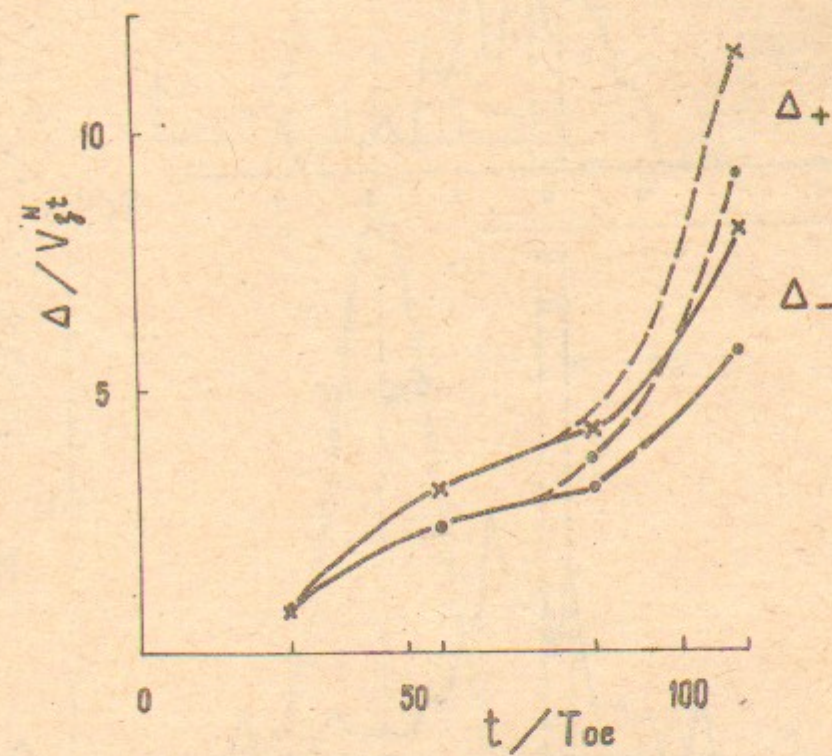


Рис. 15б.

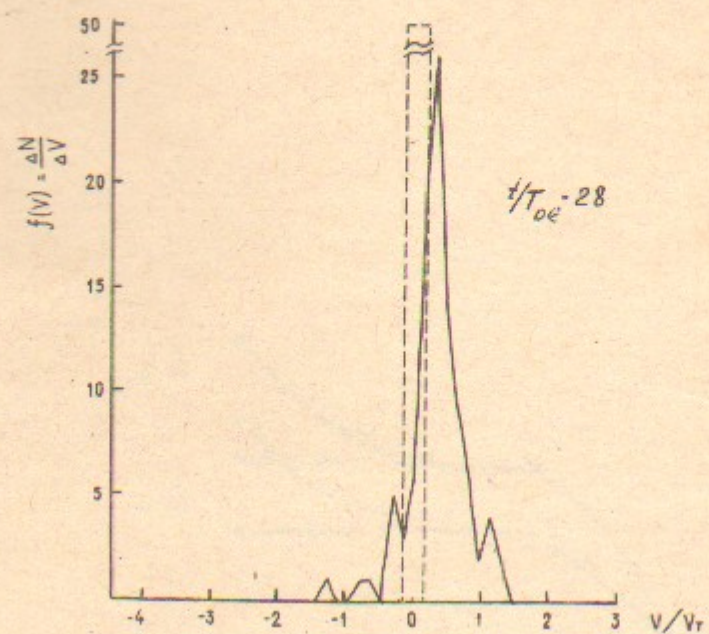


Рис. I6a.

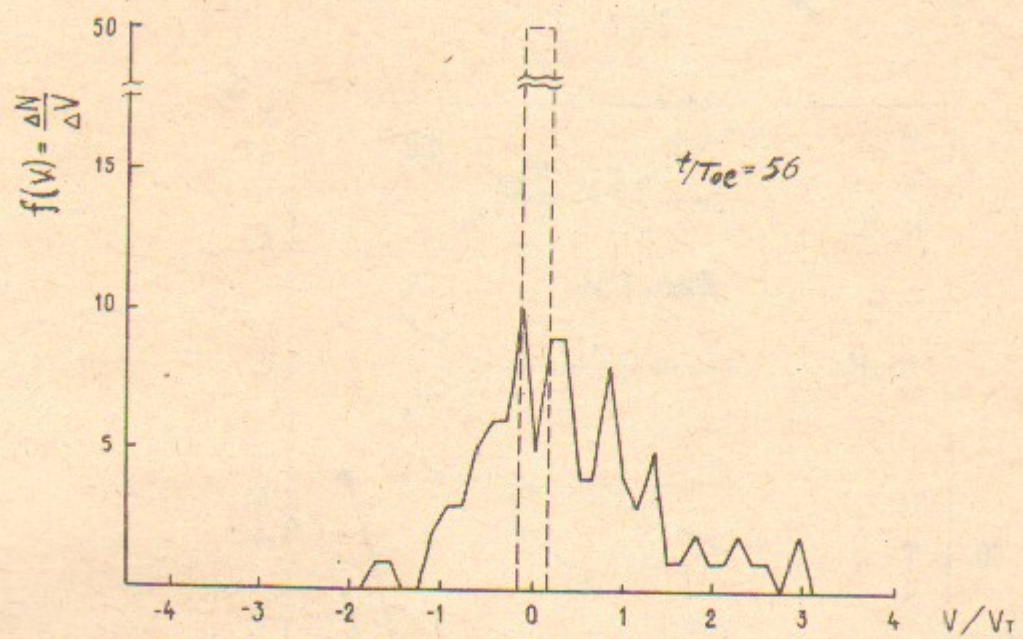


Рис. I6б.

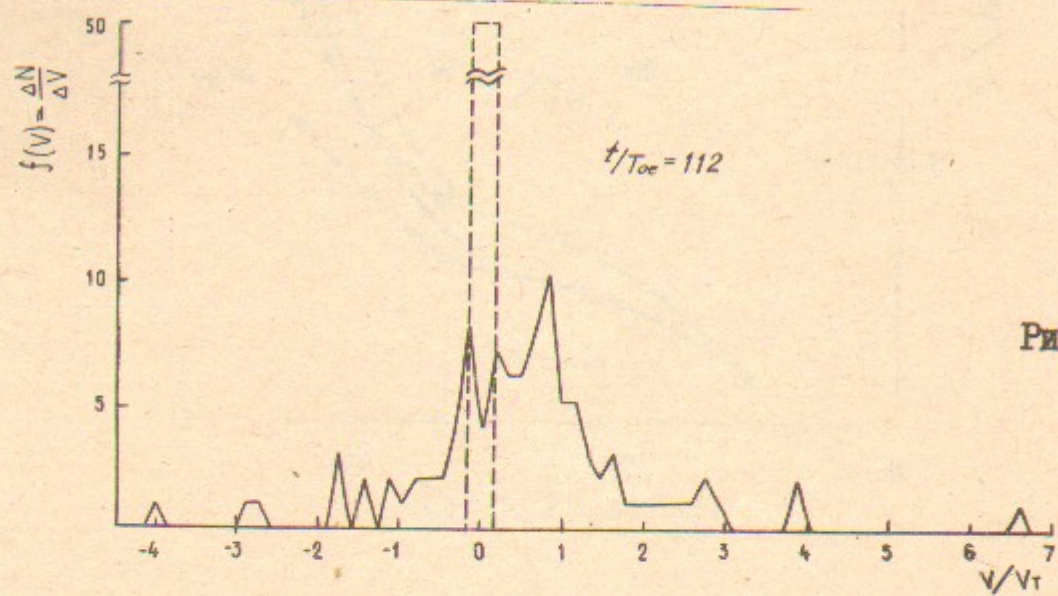


Рис. I6в.

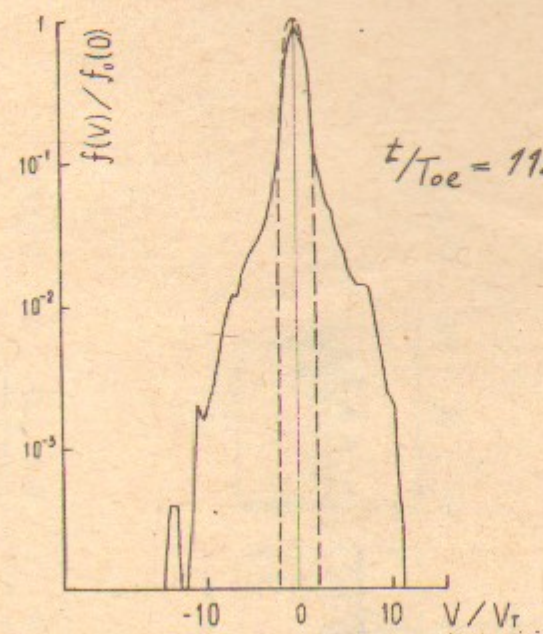


Рис. I7a.

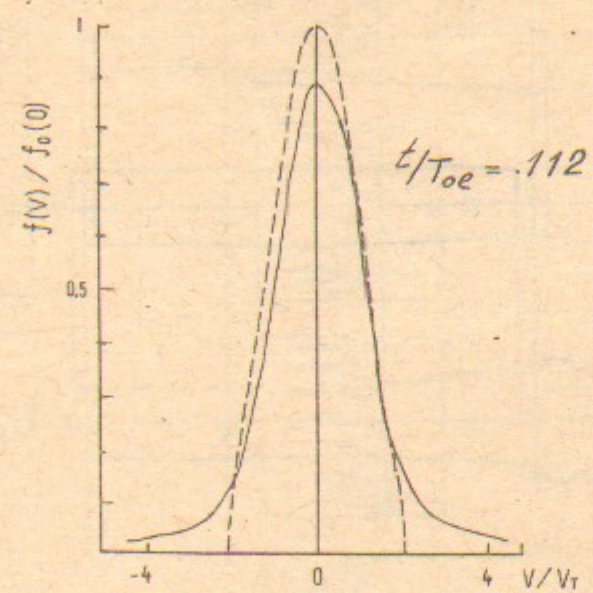


Рис. I7б.

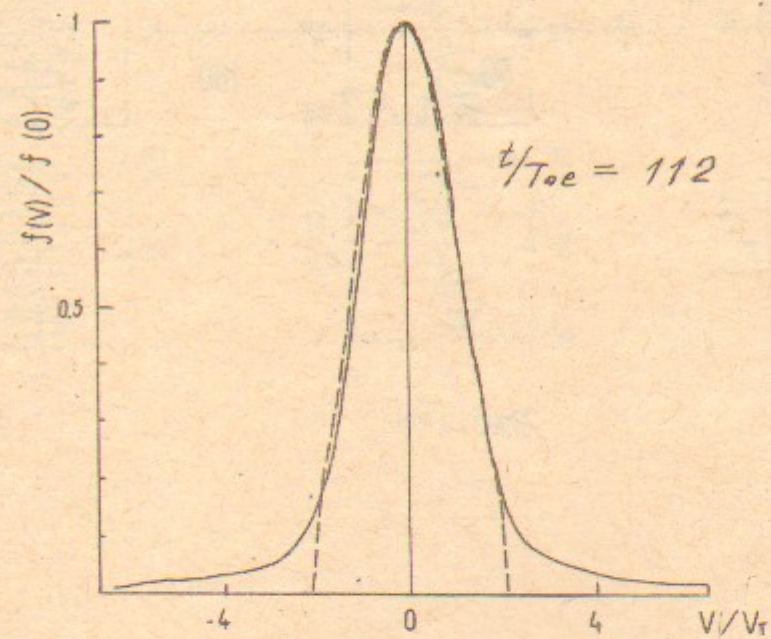


Рис. I7в.

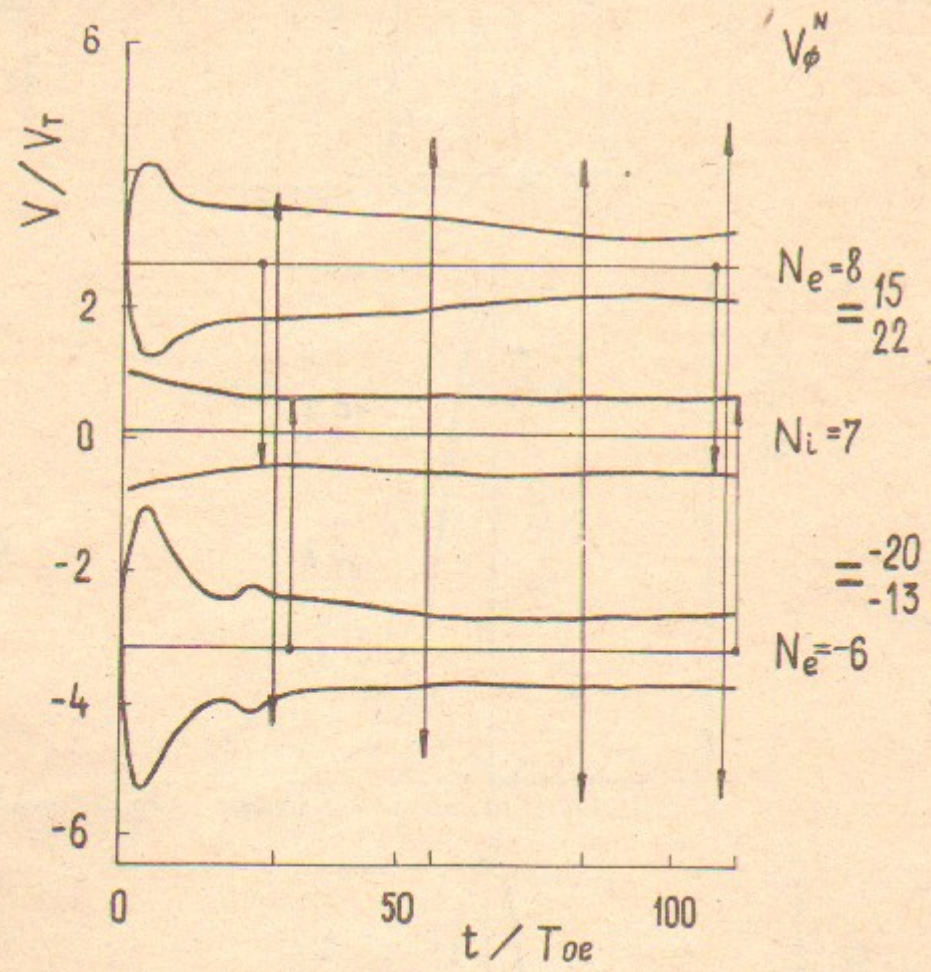


Рис.18.

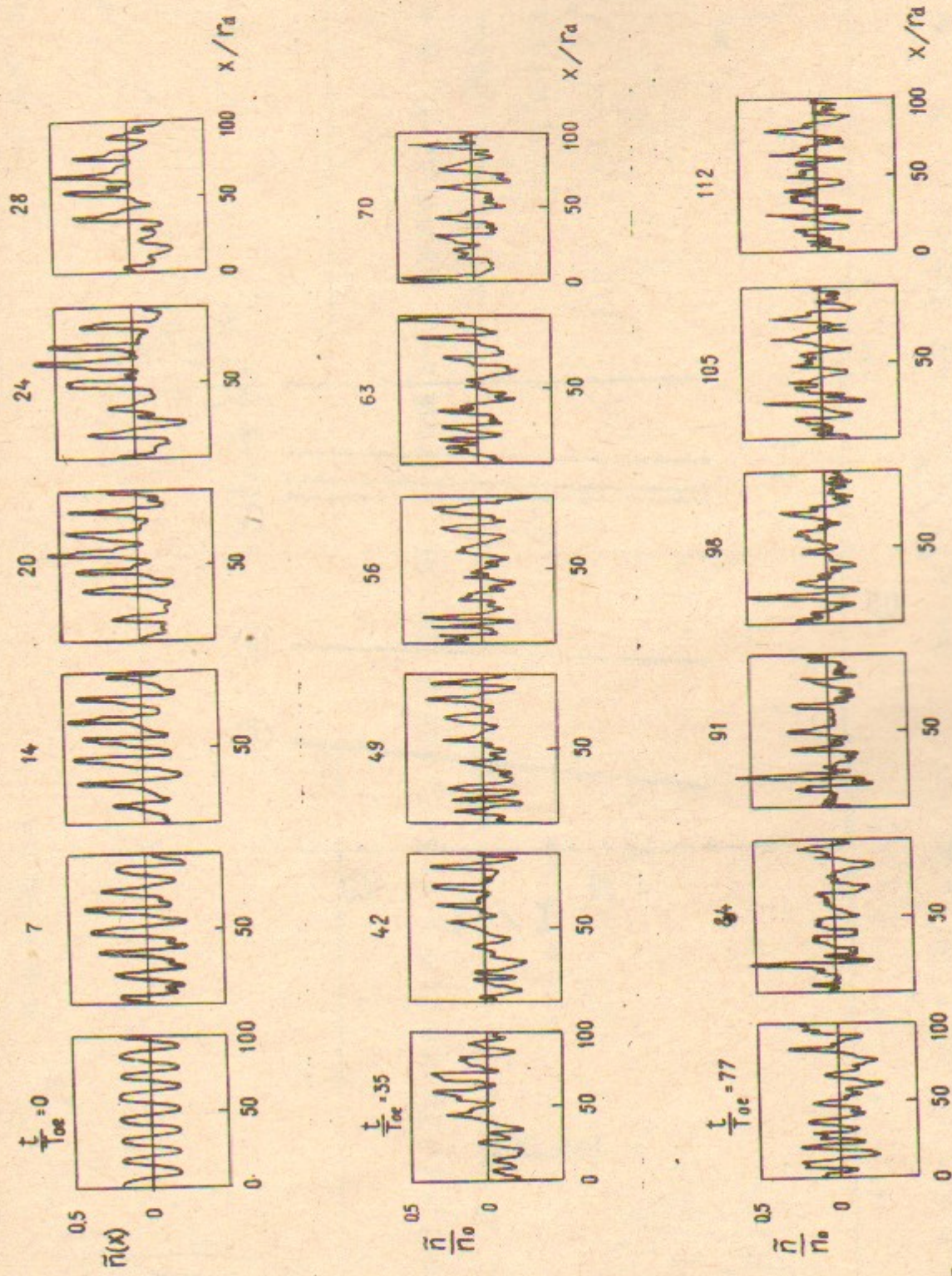


Рис.19.

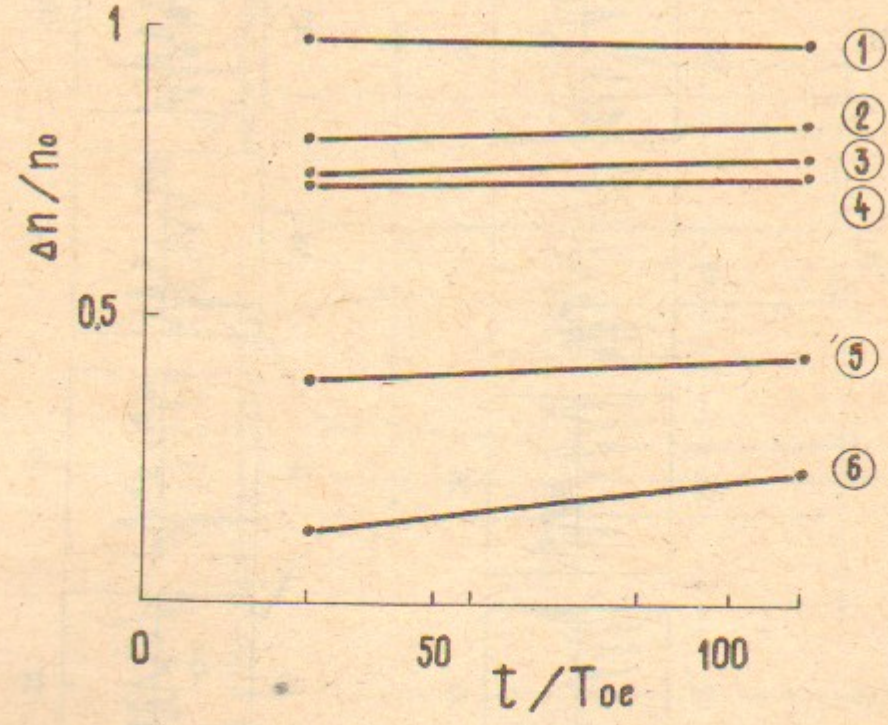


Рис. 20.

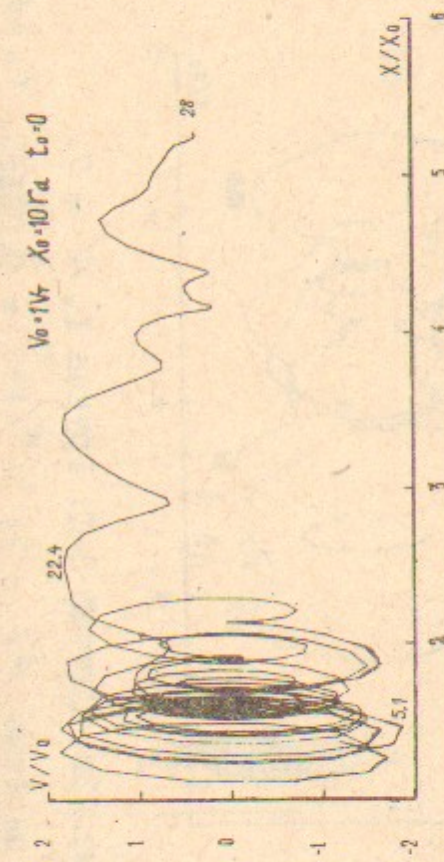


Рис. 21а. Случай 3-1. Группа I. $N_i = 4$; $X_0/r_d = 14.3$. Рис. 21б. Случай 3-1. Группа I. $N_i = 4$. $V_0/V_T = 0.064$. В системе $N_i = 7$; $V_0/V_T = 0.09153$. В системе $N_i = 7$; $V_0/V_T = 0.09153$. $t_0 = 28$.

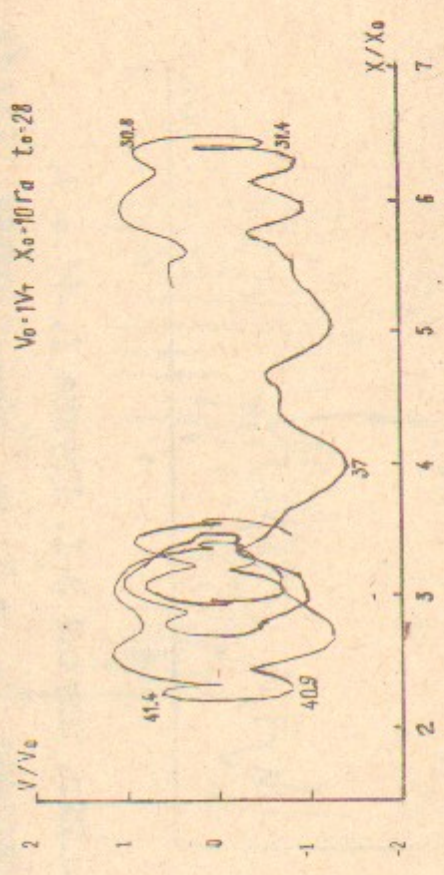


Рис. 21б. Случай 3-1. Группа I. $N_i = 4$. В системе $N_i = 7$; $V_0/V_T = 0.09153$. $t_0 = 28$.

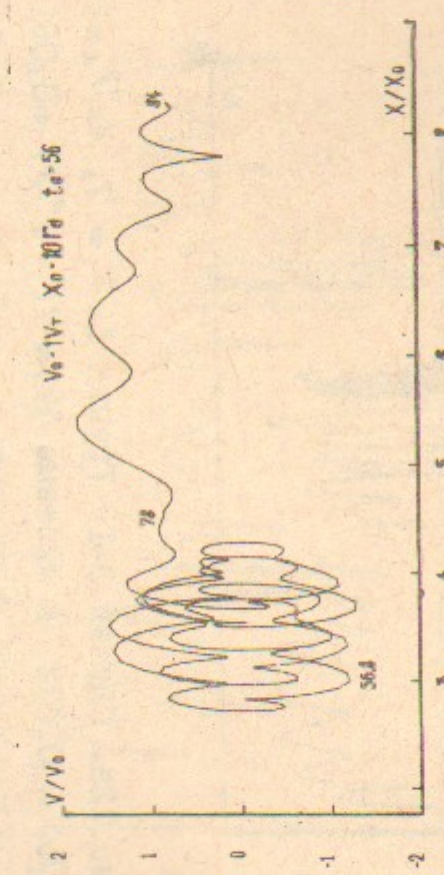


Рис. 21в. Случай 3-1. Группа I. $N_i = 4$. В системе $N_i = 7$; $V_0/V_T = 0.09153$. $t_0 = 56$.

Рис. 21г. Случай 3-1. Группа I. $N_i = 4$. В системе $N_i = 7$; $V_0/V_T = 0.09153$. $t_0 = 84$.

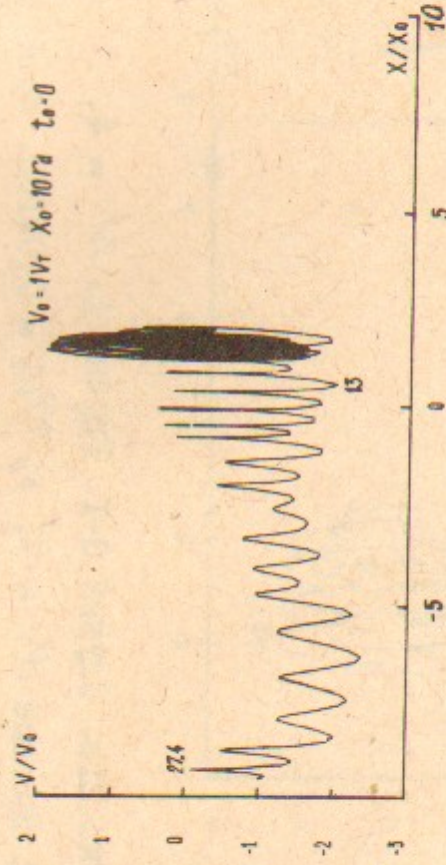


Рис.22а. Случай 3-І. Группа І. $N = 7$, $X_0/\Gamma_d = 14.3$. Рис.22б. Случай 3-І. Группа І. $N = 7$.
 $V_0/V_T = 0,032$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 28$.

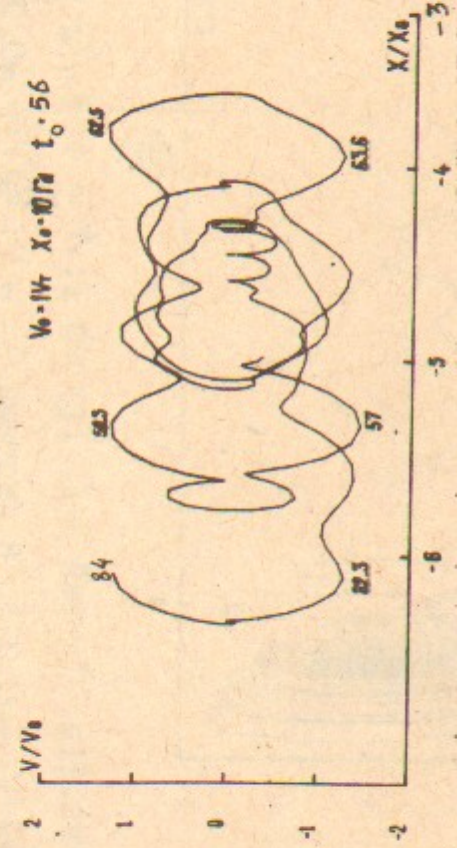


Рис.22в. Случай 3-І. Группа І. $N = 7$.

В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 56$.

Рис.22г. Случай 3-І. Группа І. $N = 7$.

В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 84$.

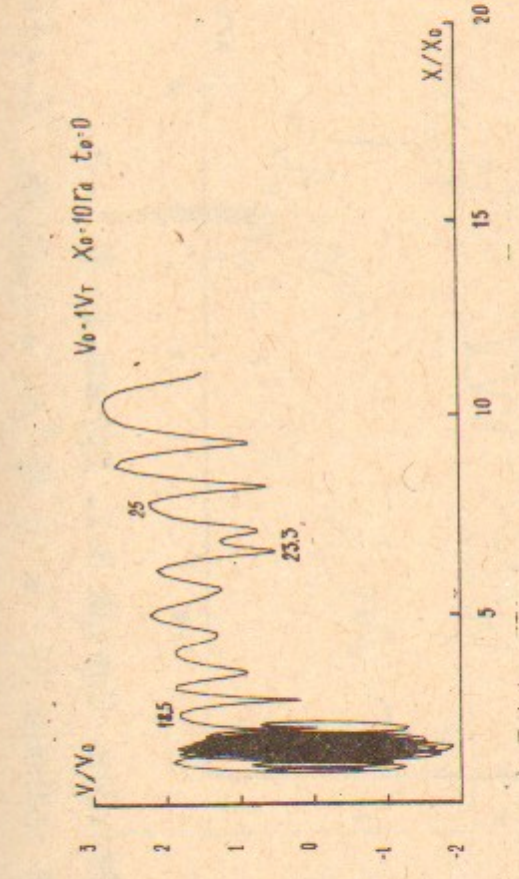
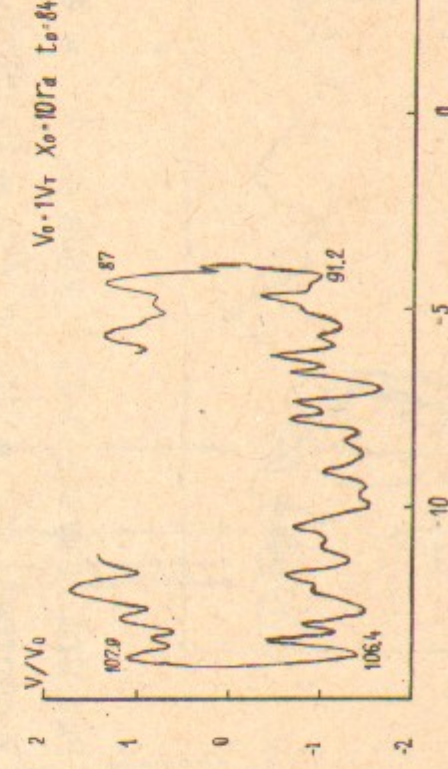
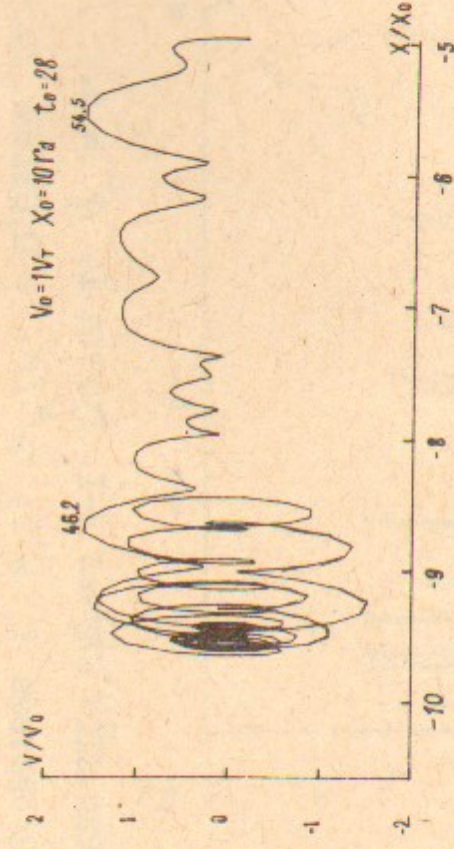


Рис.23а. Случай 3-І. Группа І. $N = 3$; $X_0/\Gamma_d = 14.3$. Рис.23б. Случай 3-І. Группа І. $N = 3$.

$V_0/V_T = -0,0955$. В системе $N_e = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. В системе $N_e = 15$; $V_\phi^N/V_T = 2,034$. $t_0 = 0$.

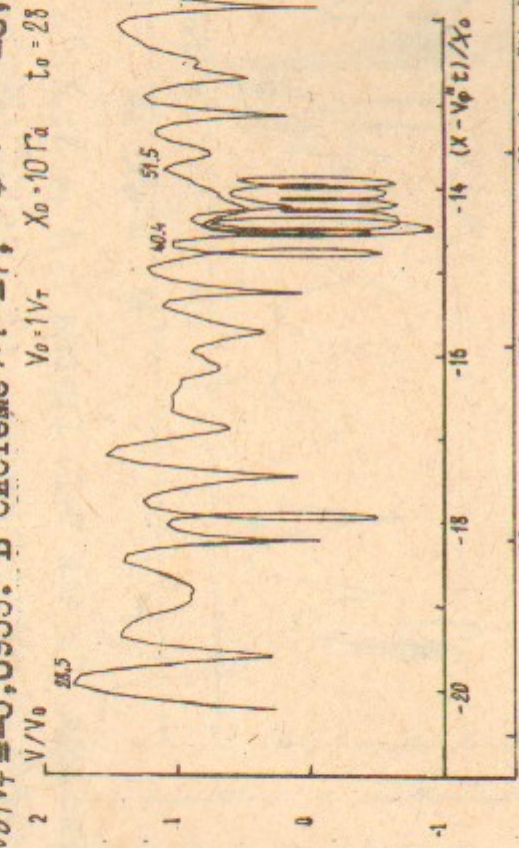


Рис.23в. Случай 3-І. Группа І. $N = 3$.

В системе $N_e = 22$; $V_\phi^N/V_T = 1,878$. $t_0 = 28$.

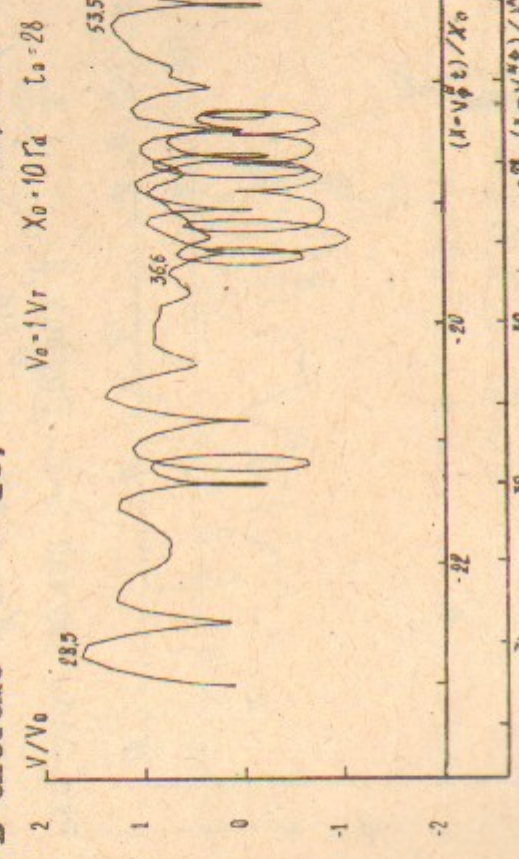
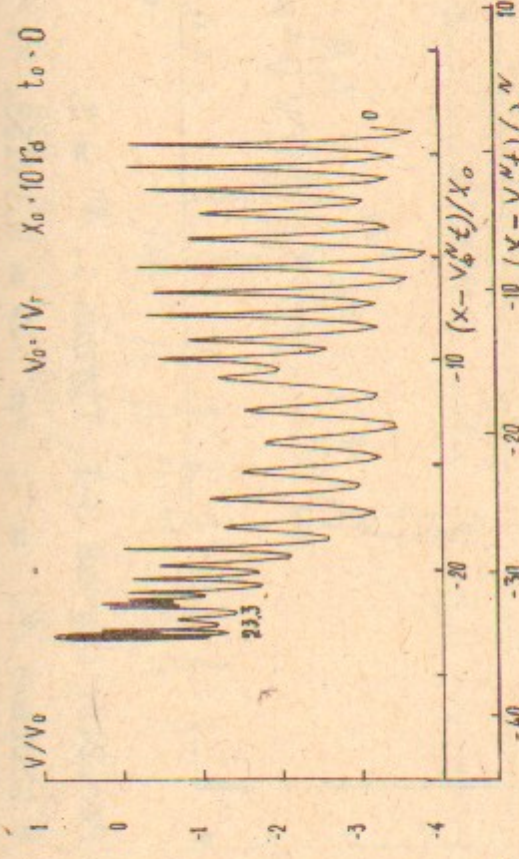


Рис.23г. Случай 3-І. Группа І. $N = 3$.

В системе $N_e = 15$; $V_\phi^N/V_T = 2,034$. $t_0 = 28$.

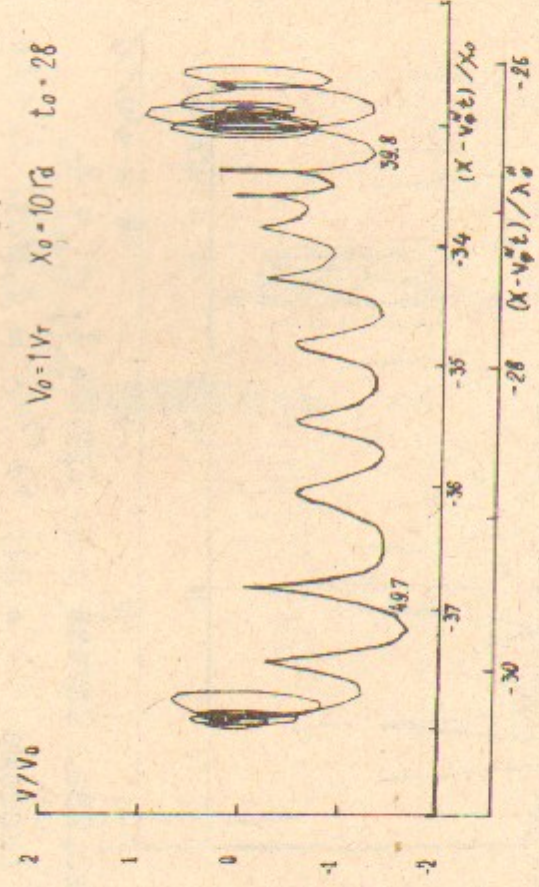


Рис.24а. Случай 3-1. Груша I. $N = 3$; $X_0/\lambda_e = 14,3$. Рис.24б. Случай 3-1. Груша I. $N = 3$.

$V_0/V_1 = 0,0955$. В системе $N_e = 8$; $V_\phi^N/V_T = 2,6453$. В системе $N_e = 15$; $V_\phi^N/V_T = 2,034$. $t_0 = 56$.

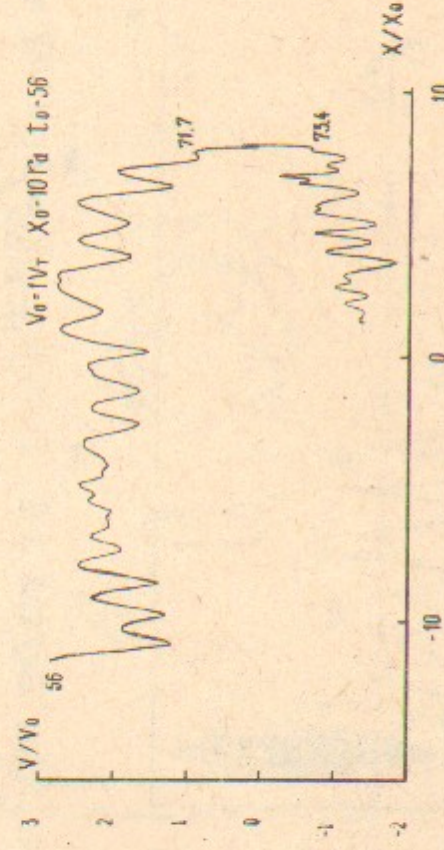


Рис.24в. Случай 3-1. Груша I. $N = 3$.

В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 56$.

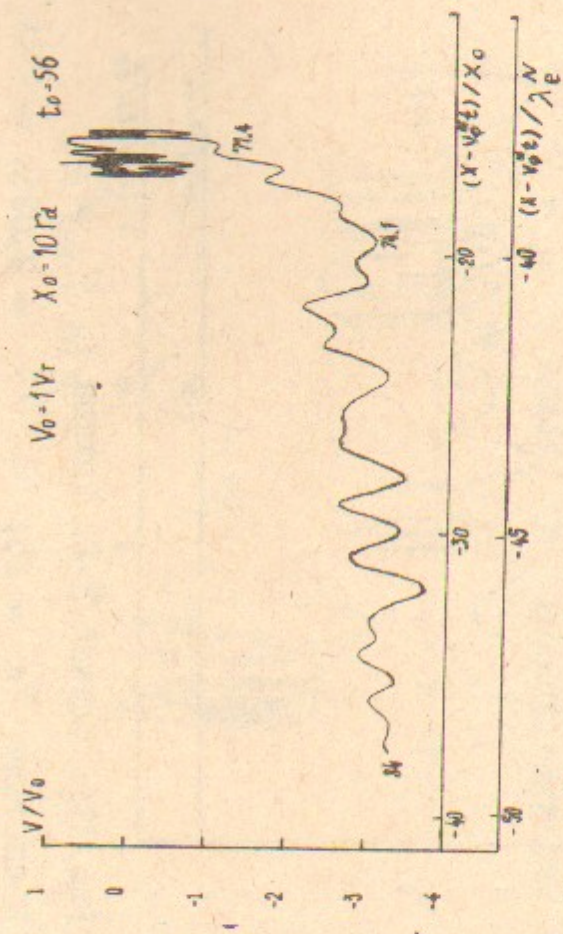


Рис.24г. Случай 3-1. Груша I. $N = 3$.

В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 84$.

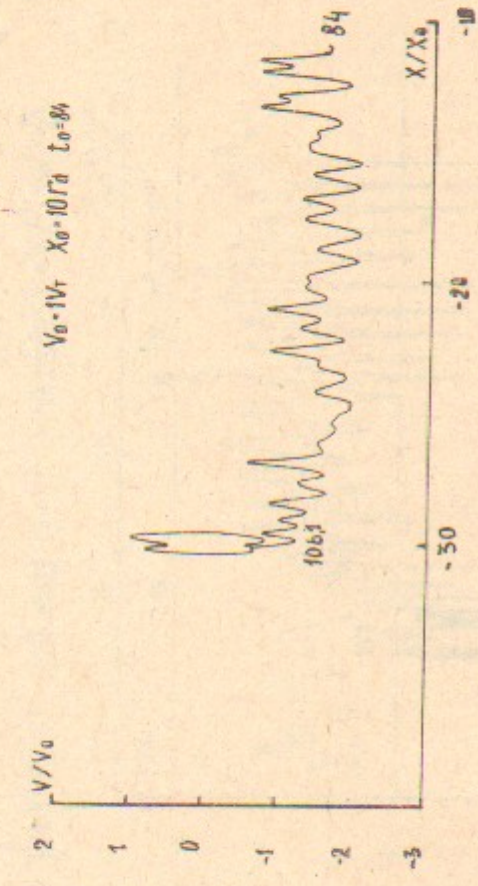


Рис.24г. Случай 3-1. Груша I. $N = 3$.

В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 84$.

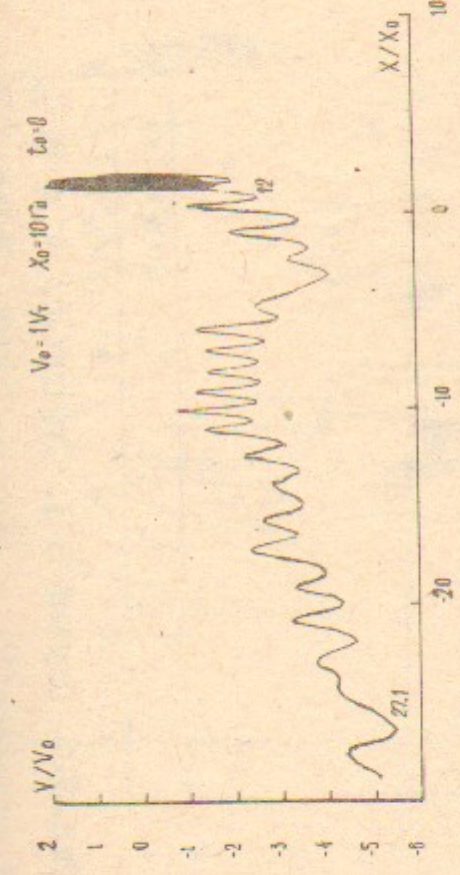


Рис.25а. Случай 3-1. Груша I. $N = 8$; $X_0/\lambda_e = 14,3$.

В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$.

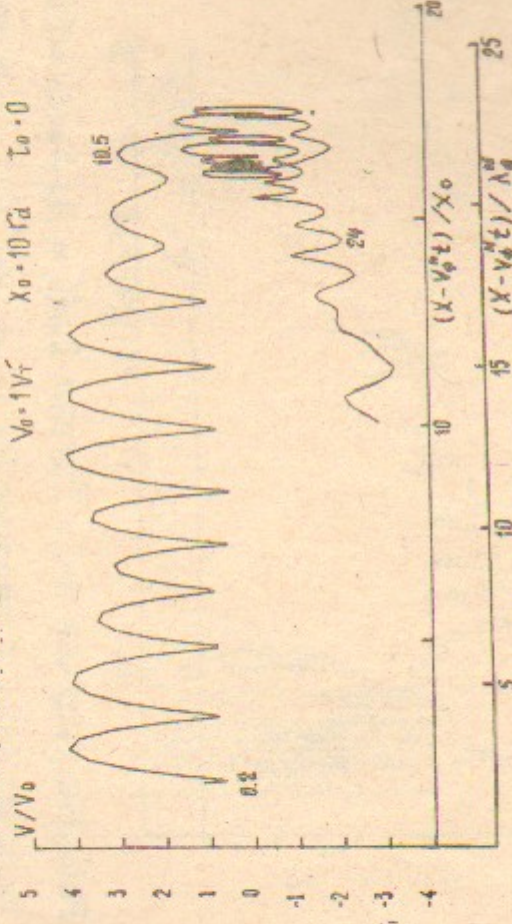


Рис.25в. Случай 3-1. Груша I. $N = 8$.

В системе $N_e = -13$; $V_\phi^N/V_T = -2,1246$. $t_0 = 0$.

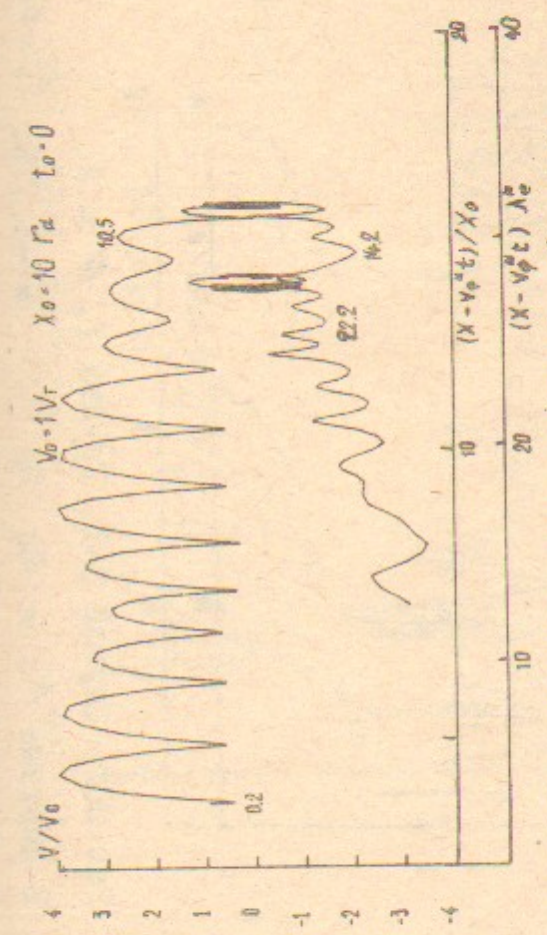


Рис.25б. Случай 3-1. Груша I. $N = 8$.

В системе $N_e = -20$; $V_\phi^N/V_T = -1,908$. $t_0 = 0$.

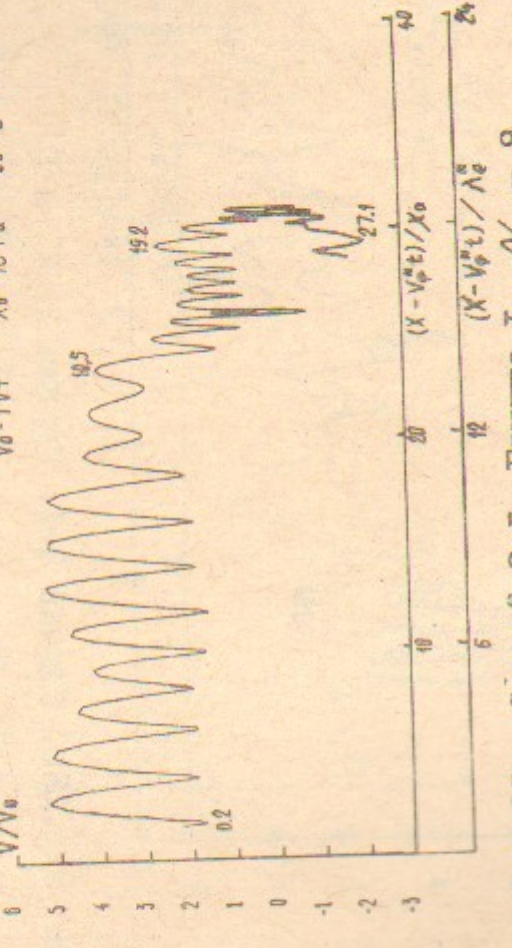


Рис.25г. Случай 3-1. Груша I. $N = 8$.

В системе $N_e = -6$; $V_\phi^N/V_T = -3,179$. $t_0 = 0$.

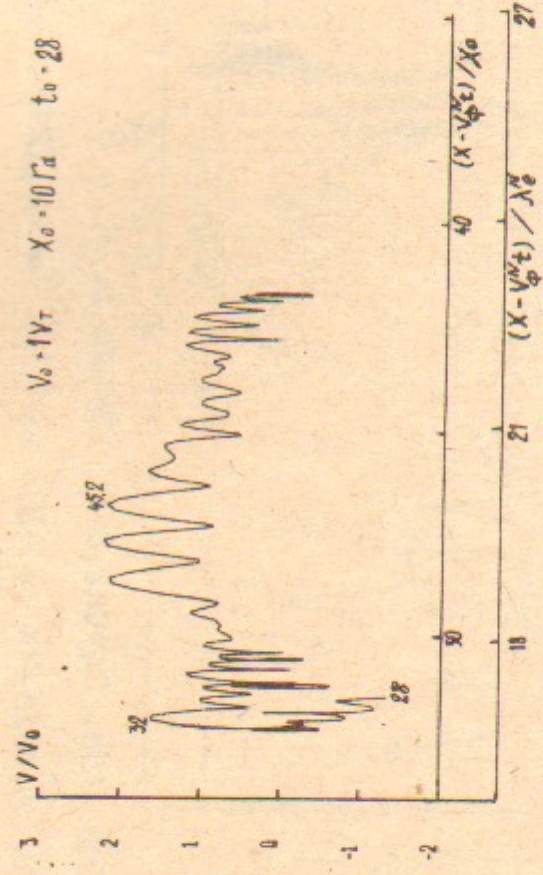


Рис. 26а. Случай 3-1. Группа I. $N = 8$; $X_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 26б. Случай 3-1. Группа I. $N = 8$.

$V_0/V_T = 0,064$. В системе $N_e = -6$; $V_\phi^N/V_T = -3,179$. В системе $N_e = -13$; $V_\phi^N/V_T = -2,1246$, $t_0 = 28$.

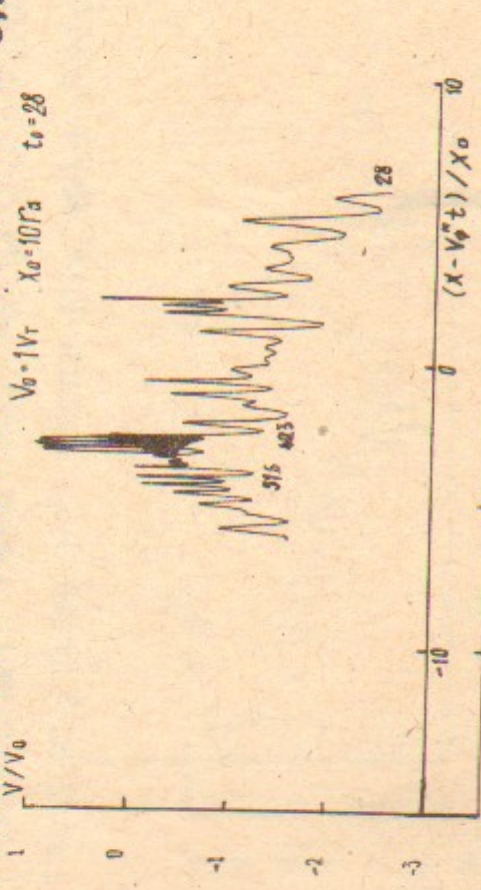


Рис. 26в. Случай 3-1. Группа I. $N = 8$.

В системе $N_e = -20$; $V_\phi^N/V_T = -1,908$, $t_0 = 28$.

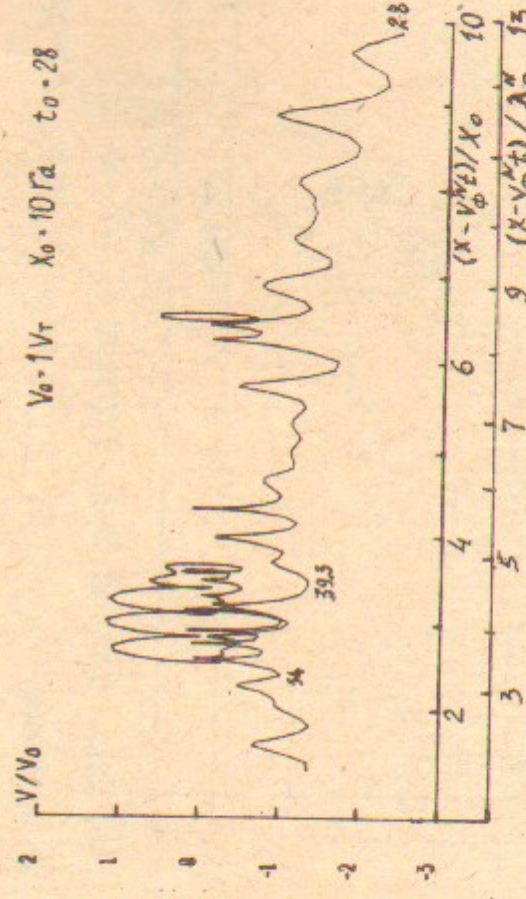


Рис. 26г. Случай 3-1. Группа I. $N = 8$.

В системе $N_e = -13$; $V_\phi^N/V_T = -2,1246$, $t_0 = 28$.

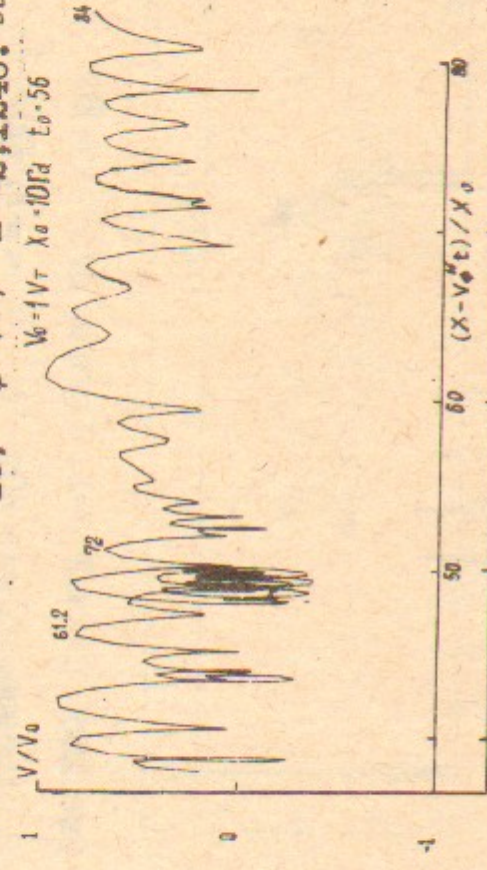


Рис. 26г. Случай 3-1. Группа I. $N = 8$.

В системе $N_e = -6$; $V_\phi^N/V_T = -3,179$, $t_0 = 56$.

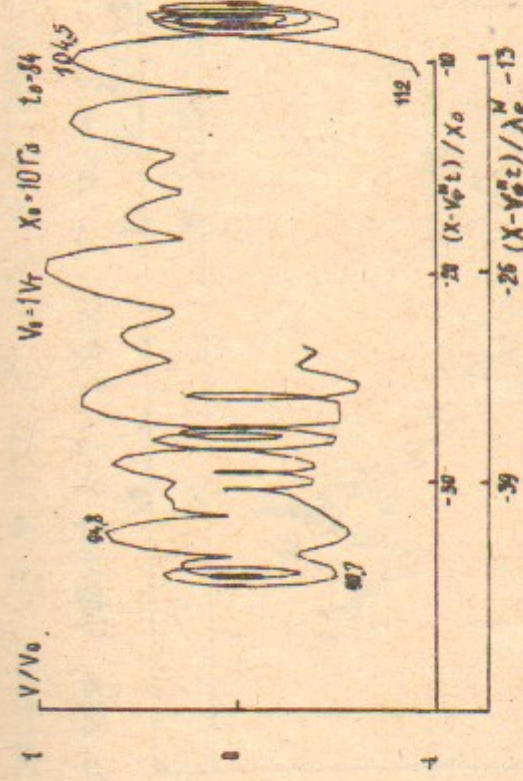


Рис. 27а. Случай 3-1. Группа I. $N = 8$; $X_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 27б. Случай 3-1. Группа I. $N = 8$.

$V_0/V_T = 0,064$. В системе $N_e = -13$; $V_\phi^N/V_T = -2,1246$.

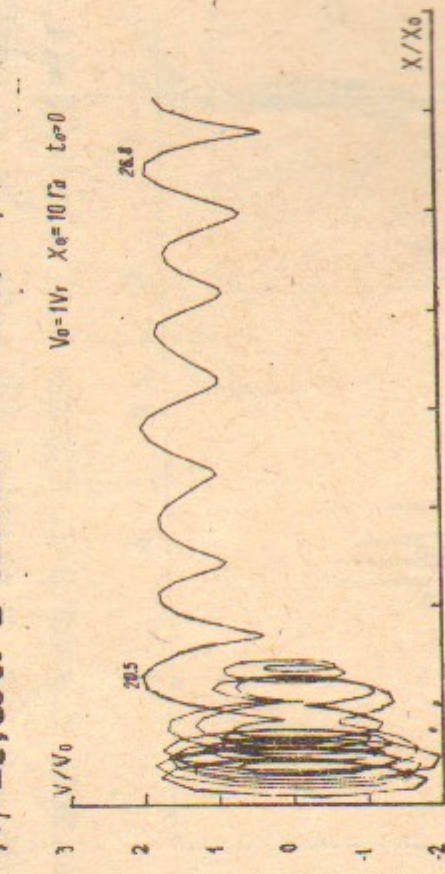


Рис. 27в. Случай 3-1. Группа I. $N = 1$; $X_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 27г. Случай 3-1. Группа I. $N = 1$.

$V_0/V_T = -0,159$. В системе $N_e = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$.

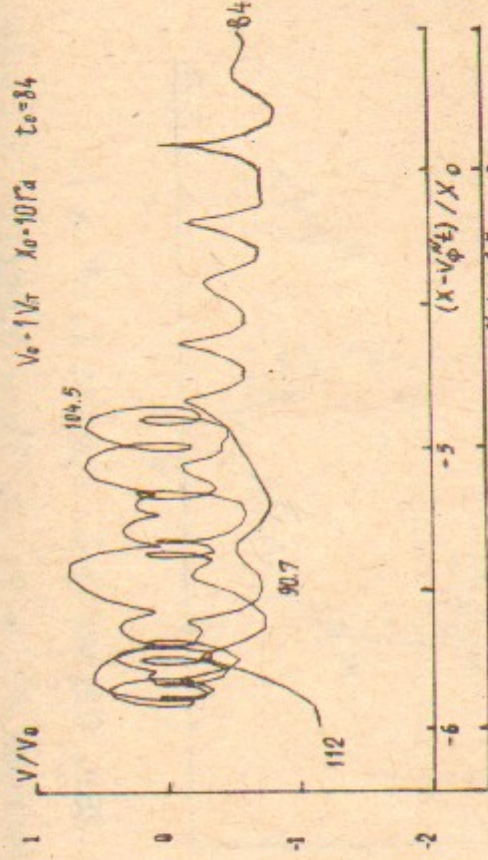


Рис. 27б. Случай 3-1. Группа I. $N = 8$.

В системе $N_e = -20$; $V_\phi^N/V_T = -1,908$, $t_0 = 84$.

$V_0/V_T = 10^{-10}$, $t_0 = 28$.

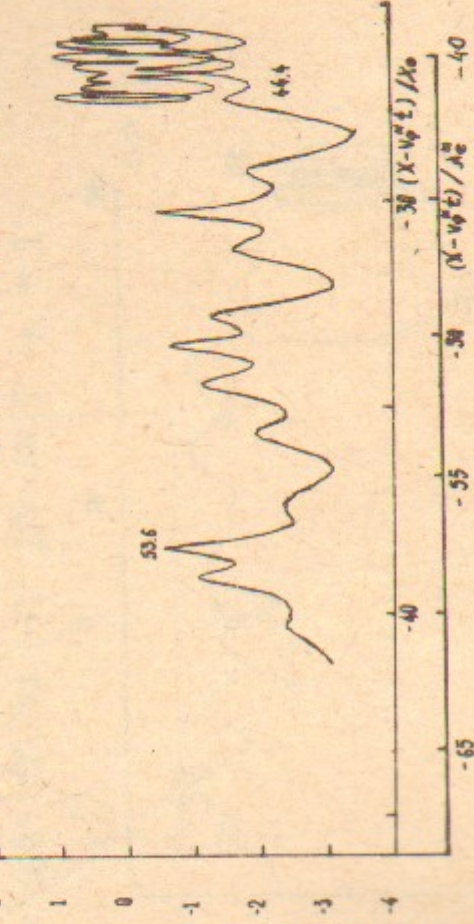


Рис. 27г. Случай 3-1. Группа I. $N = 1$.

В системе $N_e = 15$; $V_\phi^N/V_T = 2,034$, $t_0 = 28$.

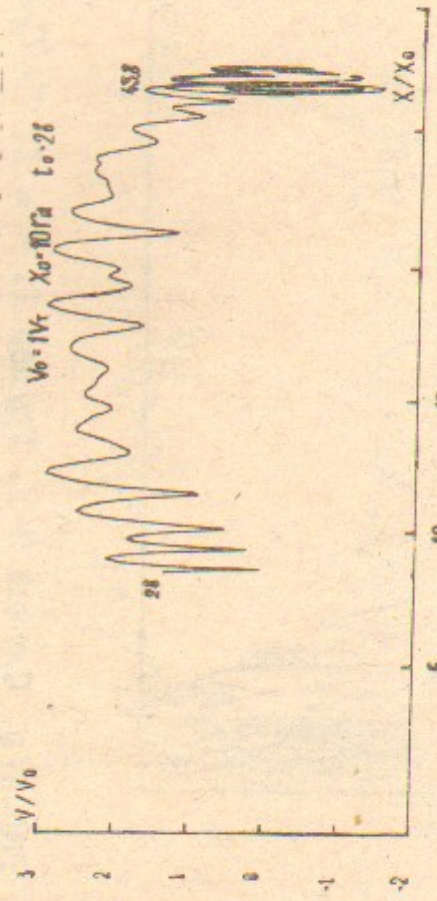


Рис.28а. Случай 3-1. Группа I. $N = 1$; $X_0/\lambda_d = 14,3$. Рис.28б. Случай 3-1. Группа I. $N = 1$.

$V_0/V_T = -0,159$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 56$.

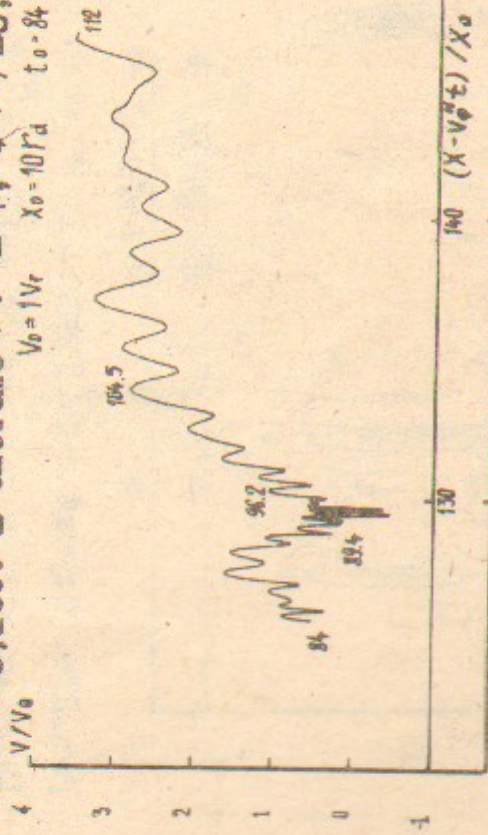


Рис.28в. Случай 3-1. Группа I. $N = 1$.

В системе $N_e = -20$; $V_\phi^N/V_T = -1,908$. $t_0 = 84$.

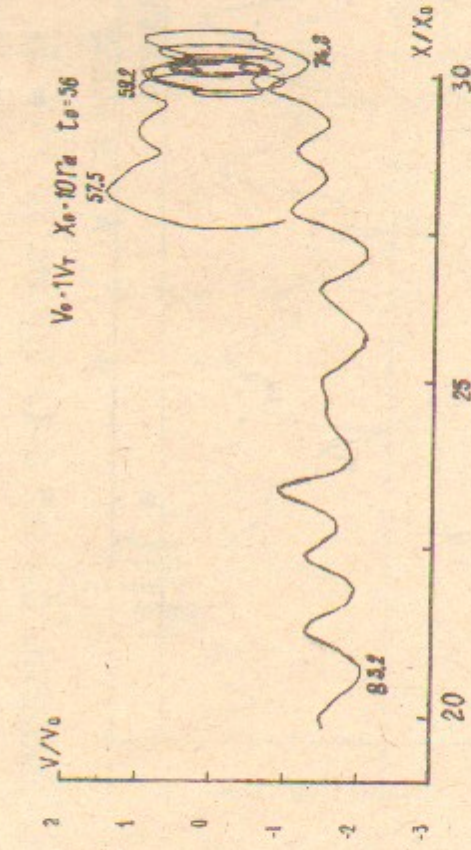


Рис.28б. Случай 3-1. Группа I. $N = 1$.

$V_0/V_T = -0,159$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 56$.

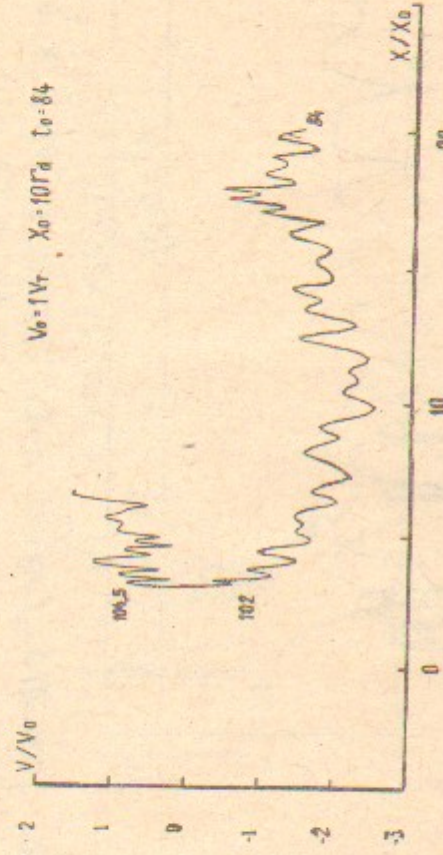


Рис.28г. Случай 3-1. Группа I. $N = 1$.

В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$. $t_0 = 84$.

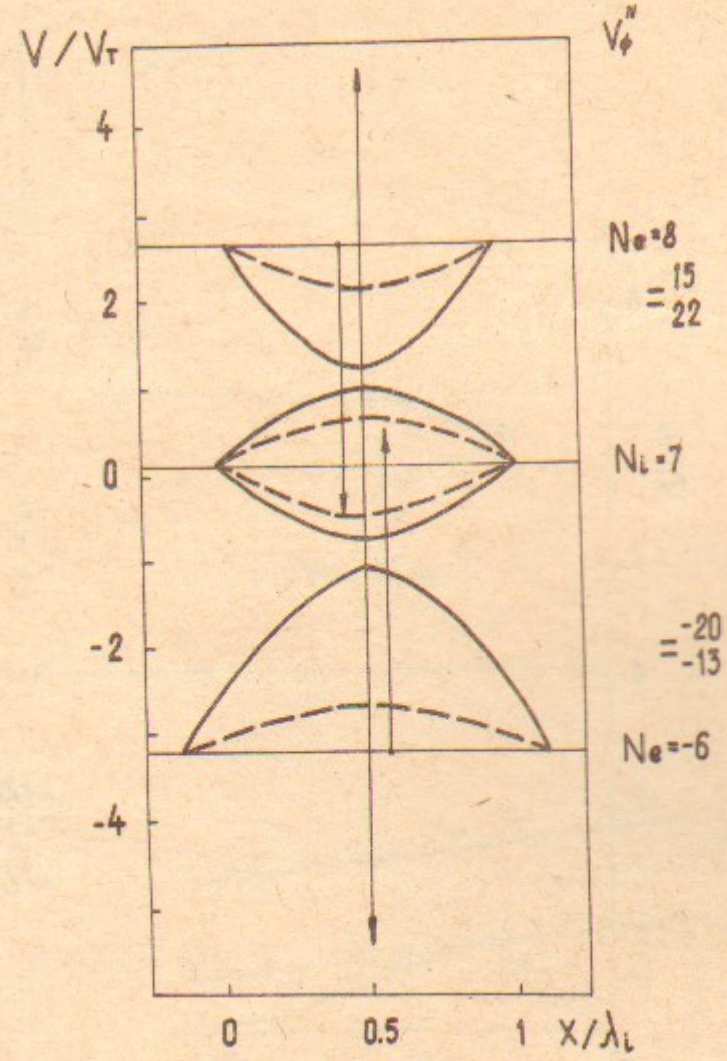


Рис.29.

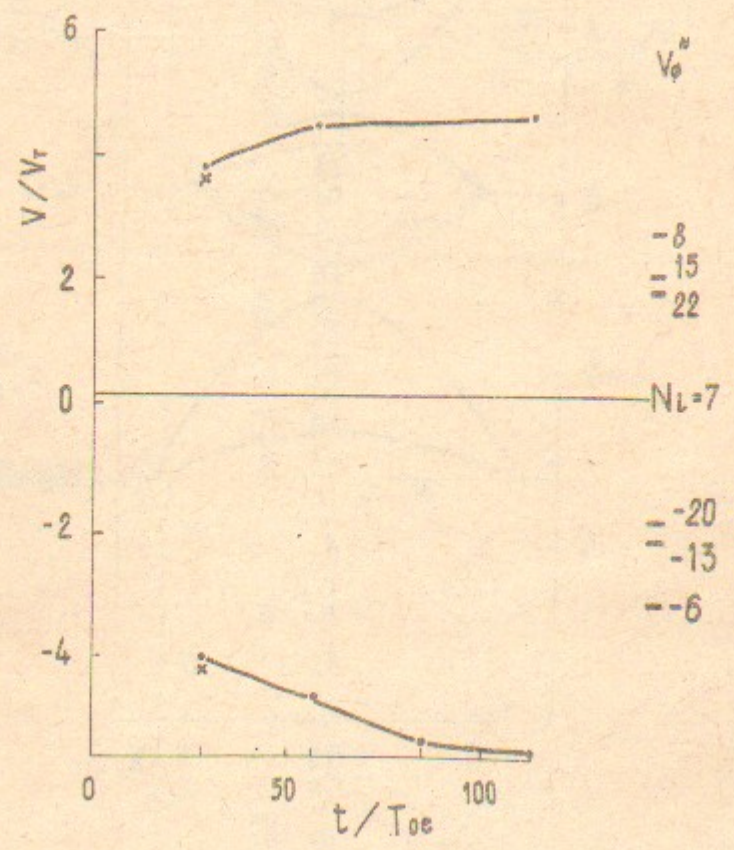


Рис. 30.

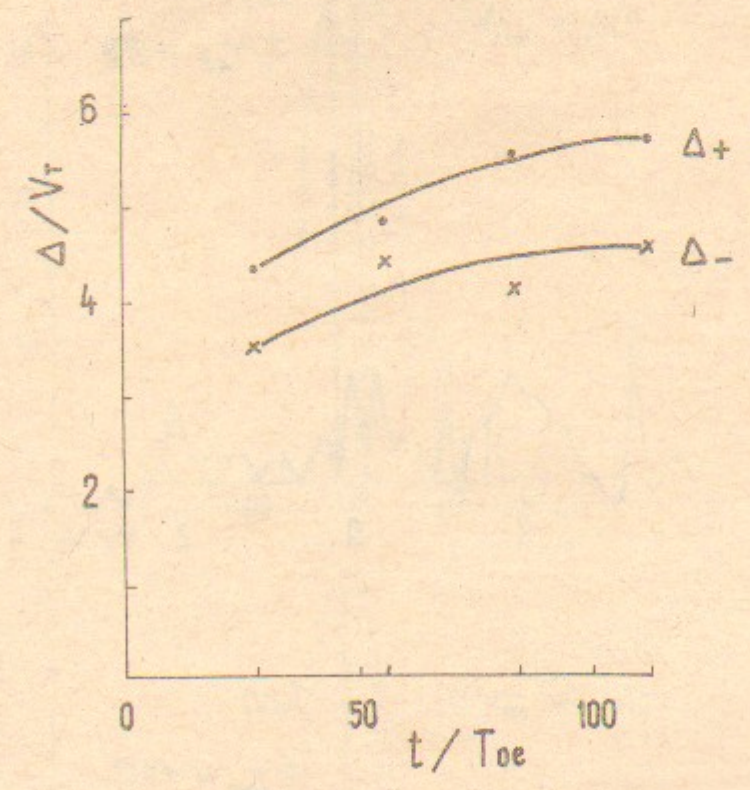


Рис. 31а.

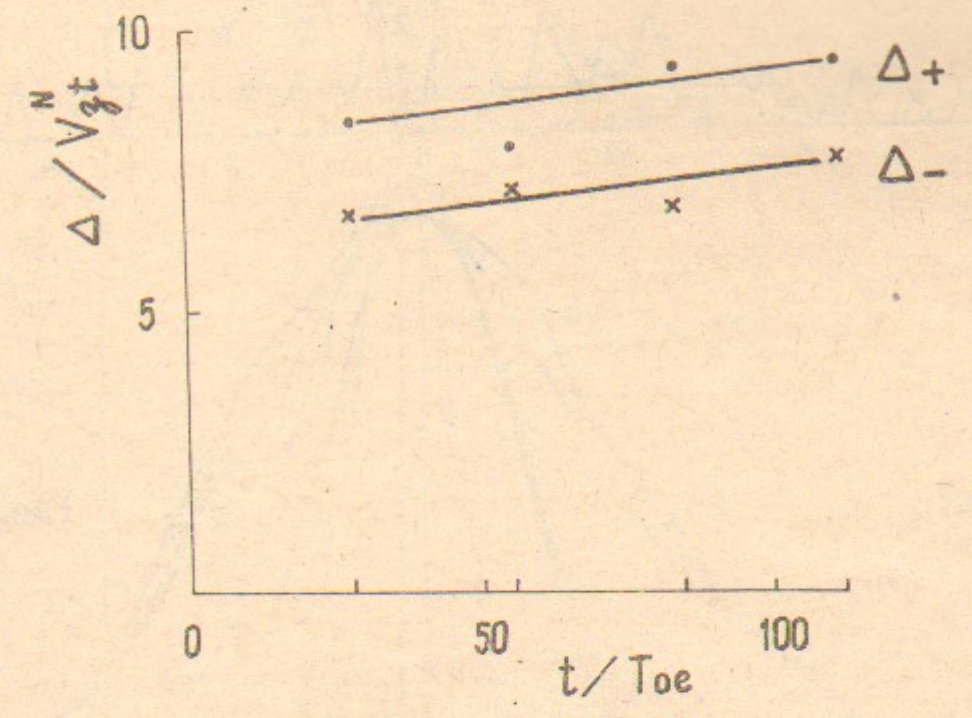


Рис. 31б.

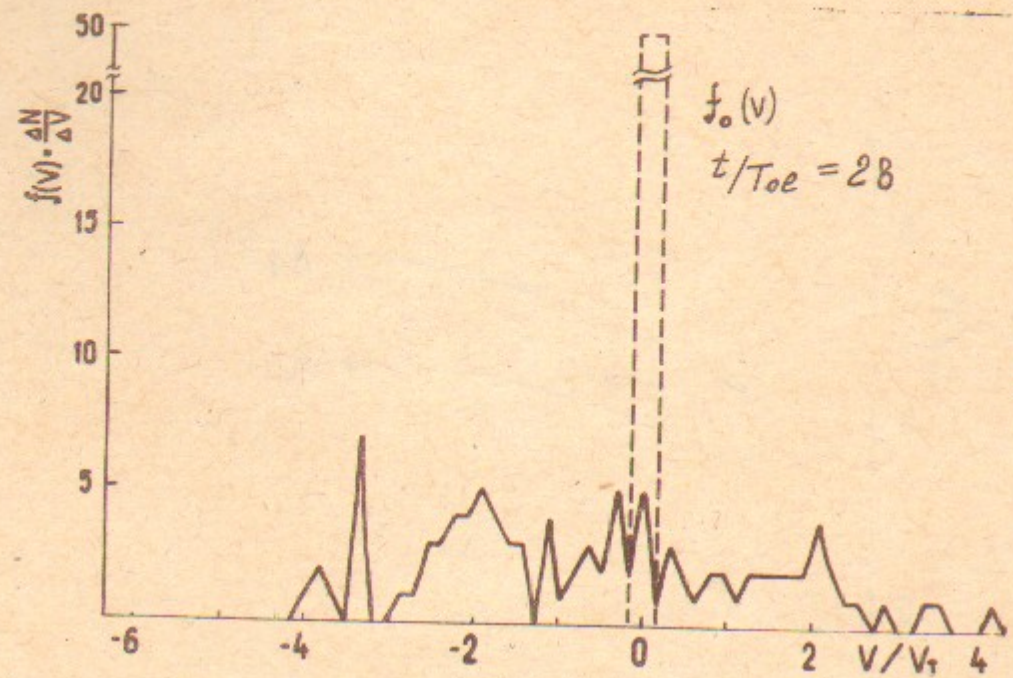


Рис. 32а.

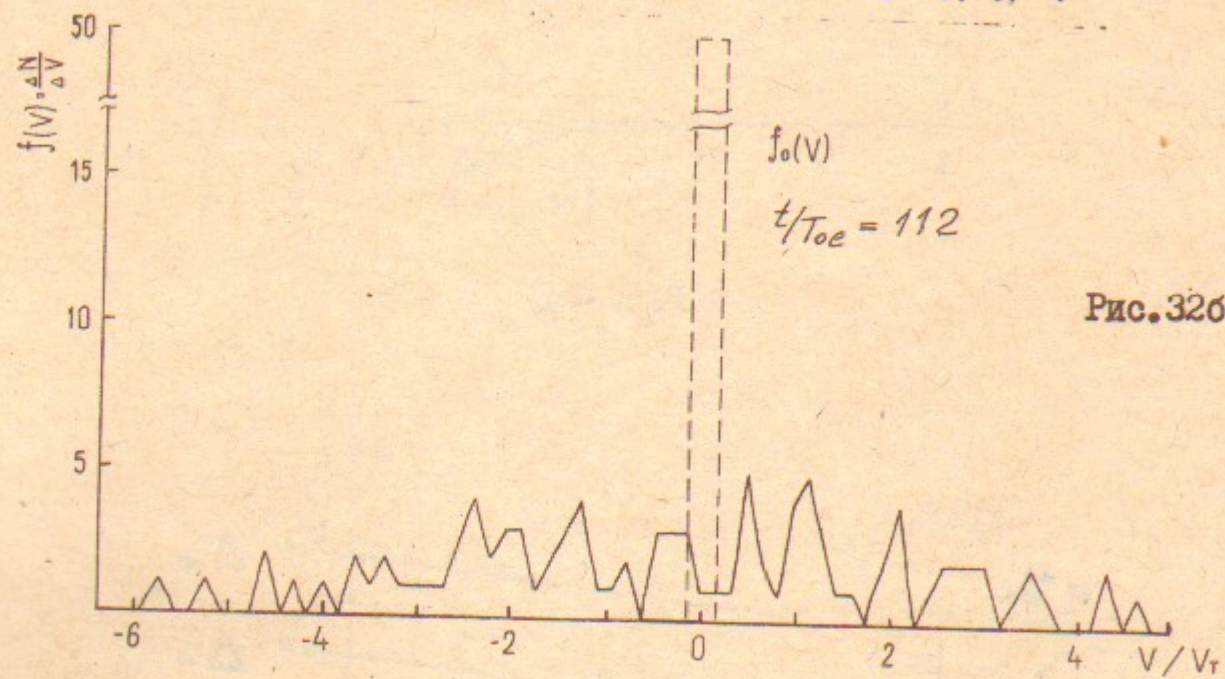


Рис. 32б.

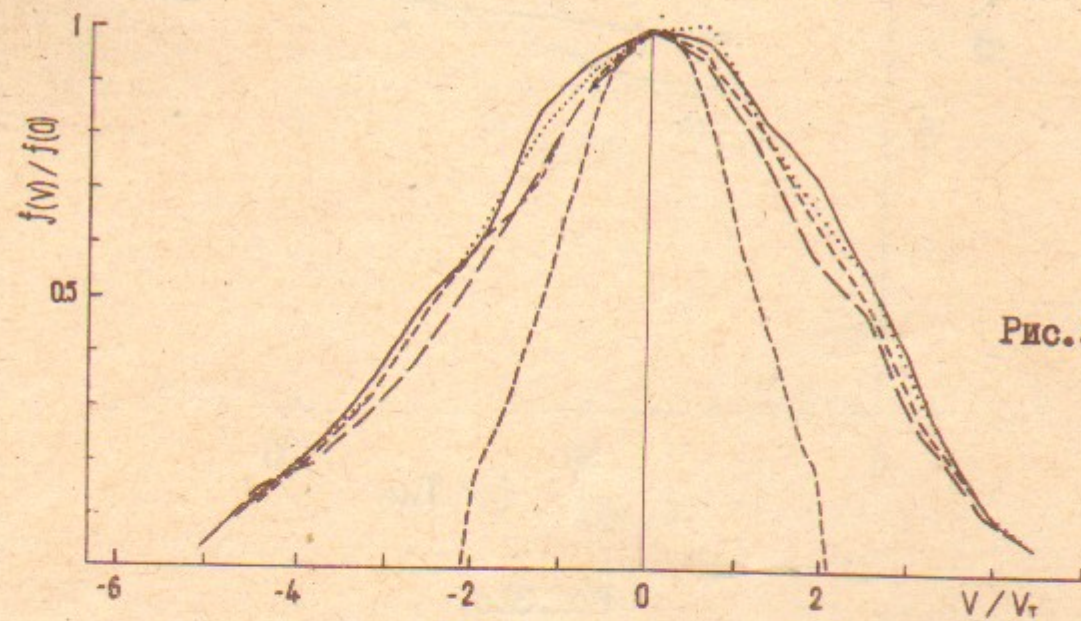


Рис. 32в.

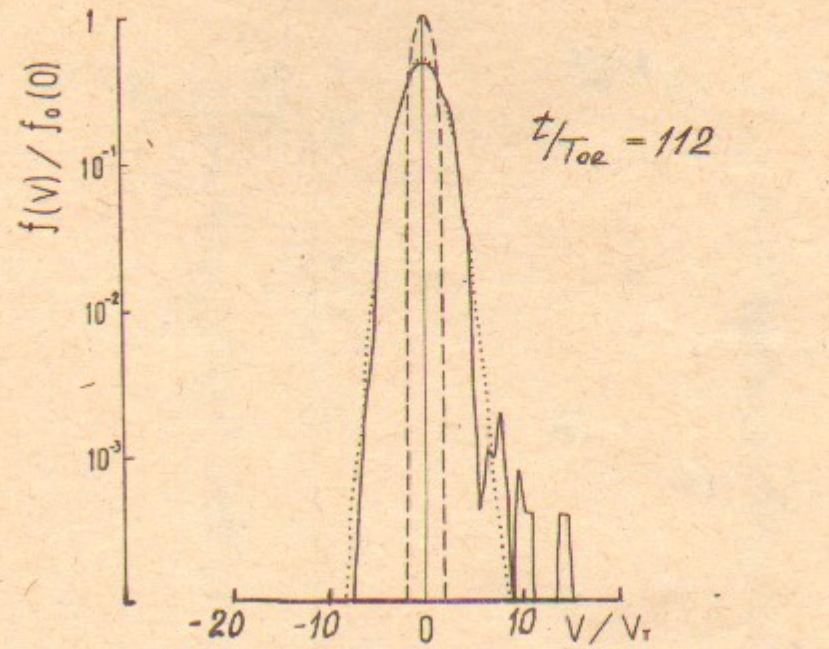


Рис. 33а.

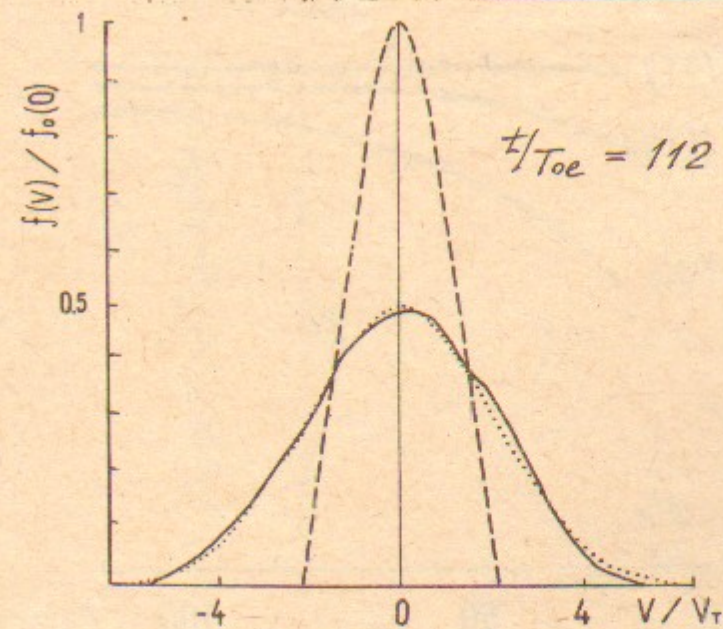


Рис. 33б.

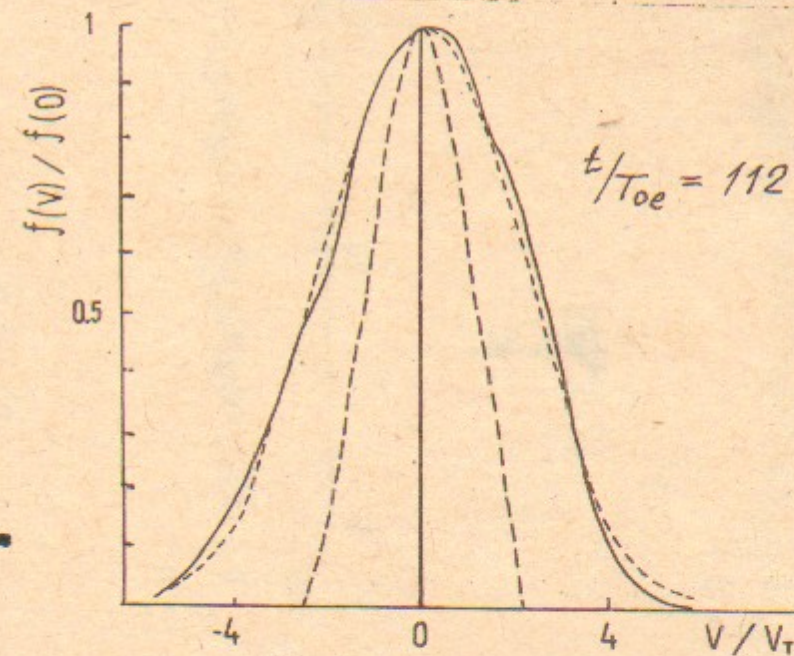


Рис. 33в.

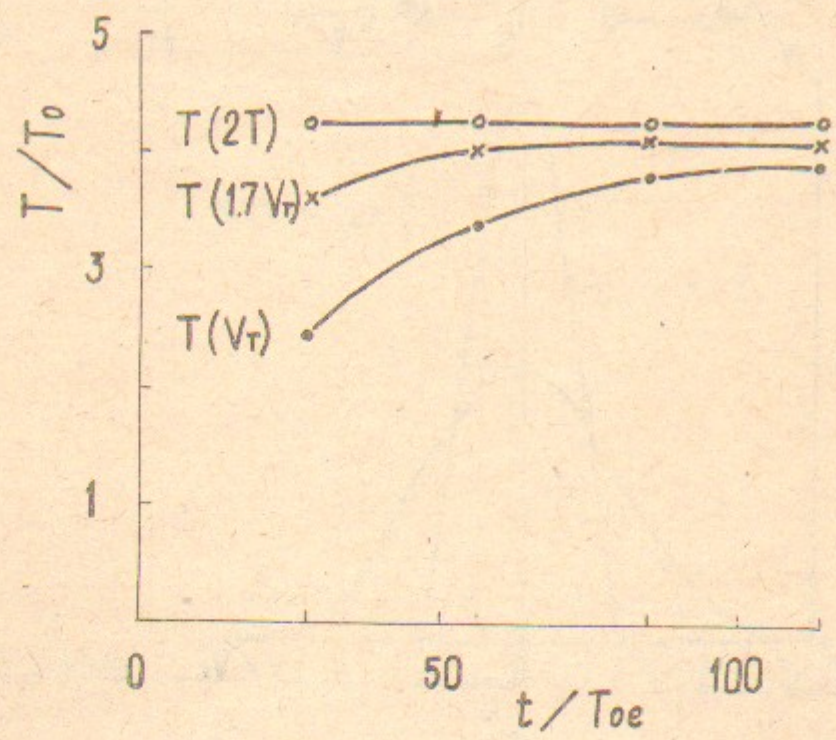


Рис. 34.



Рис. 35.

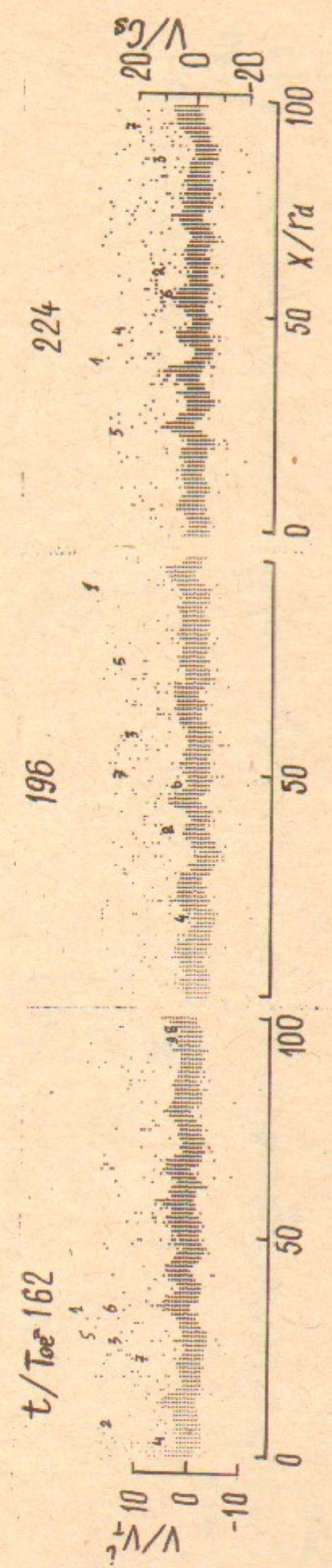
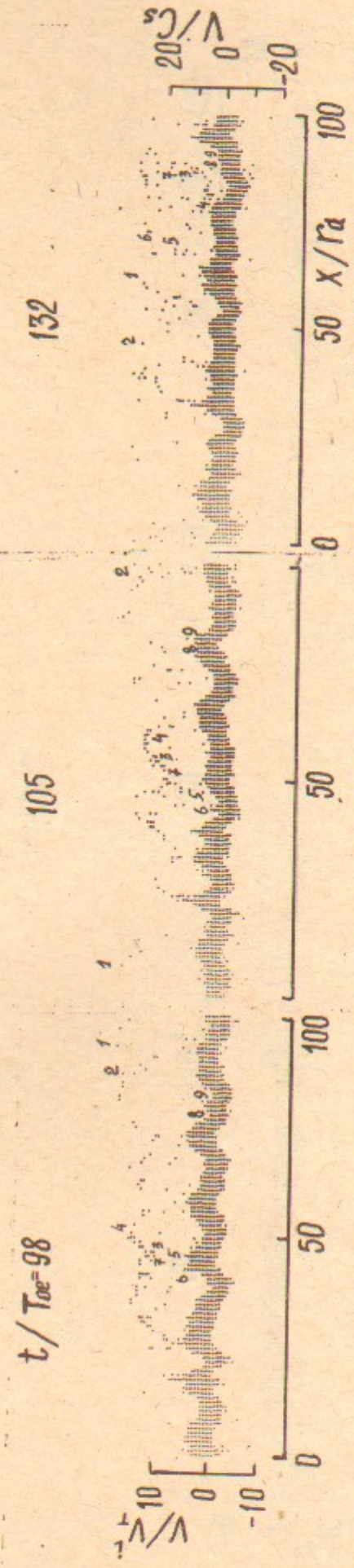


Рис. 35.

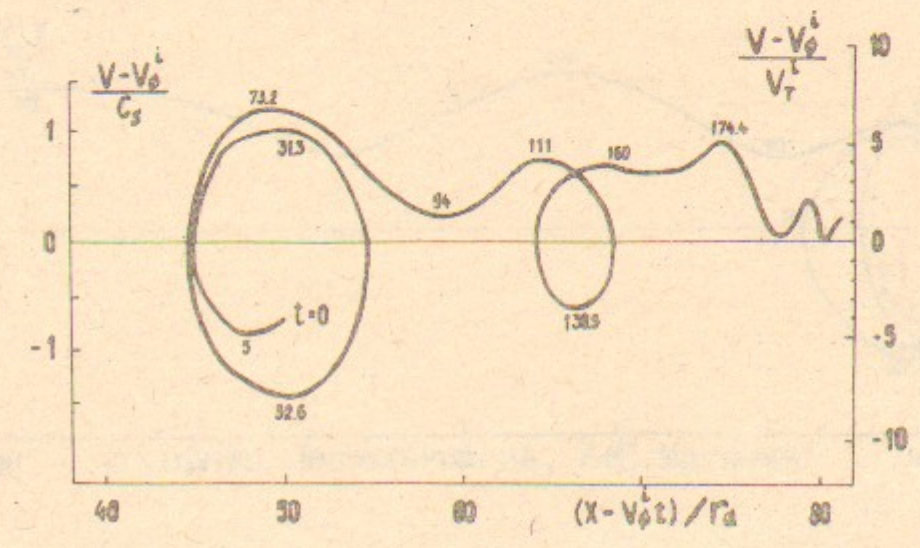


Рис. 36а.

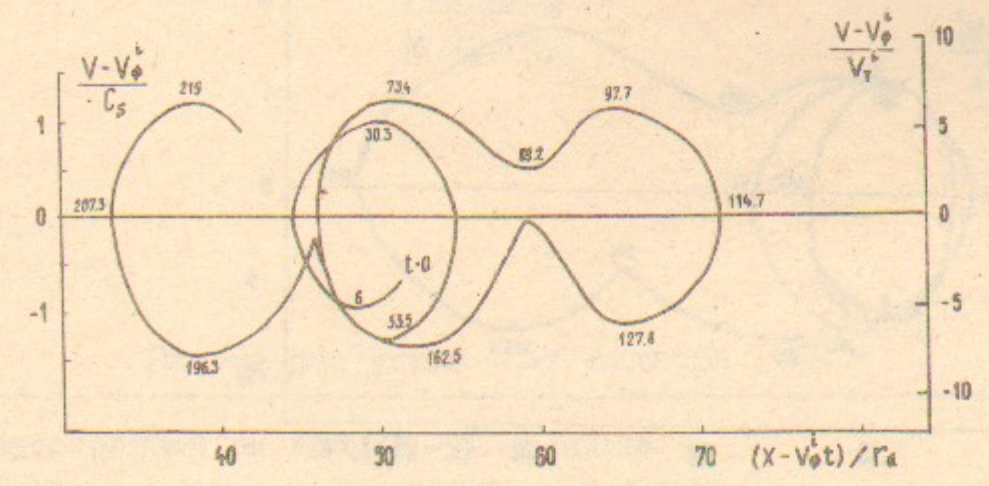


Рис. 36б.

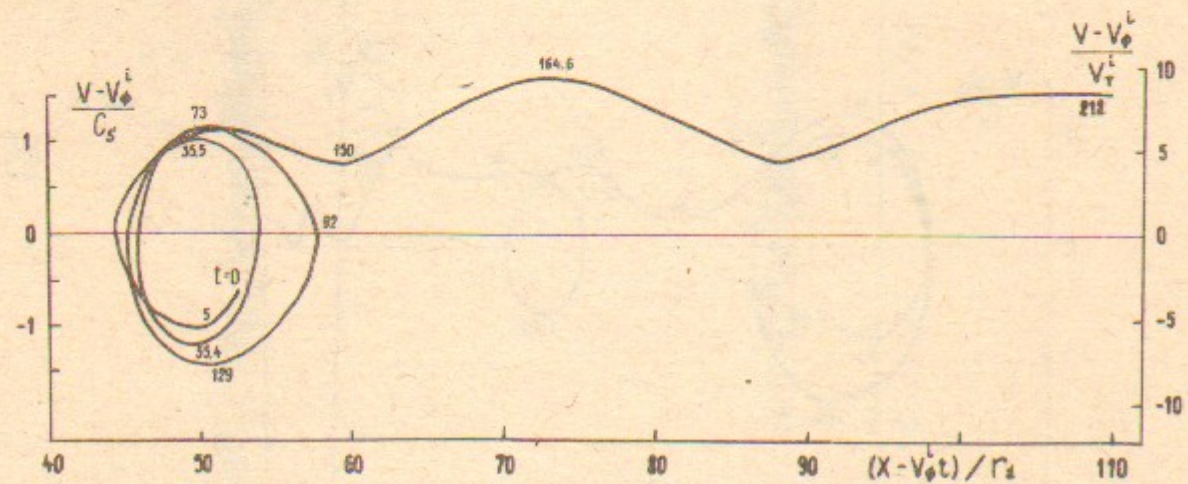


Рис.37а.

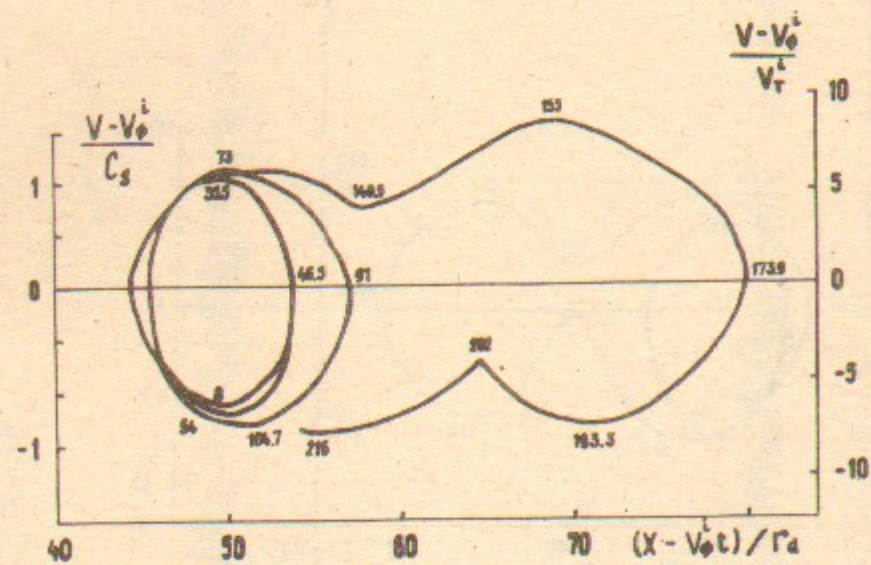


Рис.37б.

Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ВОЛНЫ С ИОННО-
ЗВУКОВОЙ. СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ.У.

Препринт
№ 89-155

Работа поступила - 26 октября 1989 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 20.XI.89г. МН 02397
Формат бумаги 60x90 I/16 Усл.4,3 печ.л., 3,0 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 155.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90