

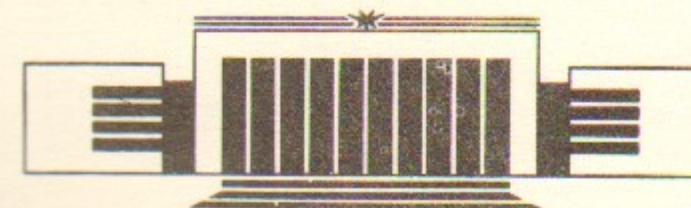


ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

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

ПРЕПРИНТ 88-163



НОВОСИБИРСК

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

Н. С. Бучельникова, Е. П. Маточкин

А Н Н О Т А Ц И Я

Проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию стохастических явлений при взаимодействии ленгмюровской волны ($E_0^2/8\pi nT = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $v_0/v_T = 16$; $N_e = 1$) с ионно-звуковой (случай 2-1: $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 20$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 5$; случай 3-1: $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $N_i = 7$).

Конверсия ленгмюровской волны на ионно-звуковой приводит к генерации гармоник $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3 \dots$. Затухание поля определяется захватом электронов основными гармониками конверсии ($\beta = 1$) и развитием стохастической неустойчивости движения электронов (образованием стохастических слоев) в районе областей захвата гармоник конверсии $N_e + N_i$, $N_e - N_i$ и ионно-звуковой волны, а также сильной стохастической неустойчивостью в районе $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$.

Развитие стохастических слоев гармоник конверсии приводит к ускорению части электронов и образованию "ближних" хвостов функции распределения. Развитие сильной стохастической неустойчивости приводит к нагреву основной массы электронов. В случае 2-1 половина энергии поглощается хвостами, половина - нагревом. В случае 3-1 практически вся энергия поглощается нагревом.

LANGMUIR-ION-SOUND WAVE INTERACTION. STOCHASTIC PHENOMENA. II.

N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin

A b s t r a c t

The numerical experiments (PIC-method) were made to study the stochastic phenomena by the interaction of Langmuir wave ($E_0^2/8\pi nT = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $V_{ph}/V_T = 16$) and ion-sound wave (case 2-1: $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 20$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 5$; case 3-1: $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $N_i = 7$).

The conversion of the Langmuir wave on the ion-sound wave leads to the excitation of Langmuir wave modes $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3, \dots$. The damping of the electric field is determined by the trapping of the electrons by the main ($\beta = 1$) conversion modes and by the stochastic instability of the electron motion (the stochastic layers formation) in the trapping regions of the conversion modes $N_e + N_i$, $N_e - N_i$ and of the ion-sound wave. The large scale stochasticity in the trapping regions of the waves $N_i - (N_e + \beta N_i)$ and $N_i - (N_e - \beta N_i)$ is also essential, particularly in the case 3-1.

The evolution of the stochastic layers of the conversion modes leads to the acceleration of a part of the electrons and to the formation of the "short" tails of the velocity distribution function. The evolution of the large scale stochasticity leads to the heating of the main part of the electrons. In the case 2-1 a half of the energy is absorbed by the tails, a half - by the heating. In the case 3-1 practically all the energy is absorbed by the heating.

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ВОЛНЫ С ИОННО-ЗВУКОВОЙ.

СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. II.

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

Настоящая работа является продолжением и составной частью работы /1/ и продолжением работы /2/. Цель работы - исследование стохастических явлений при взаимодействии ленгмюровской волны с ионно-звуковой, выяснение механизма затухания ленгмюровских волн и механизма нагрева электронов, обнаруженного ранее /2/. В работе /1/ исследовалось взаимодействие ленгмюровской волны с параметрами $E_0^2/8\pi nT = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $V_{ph}/V_T = 16$; $N_e = \lambda_e/\lambda_i = 1$ с ионно-звуковой волной с параметрами $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 50$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 2$ (случай I-I). Было показано, что в этом случае затухание ленгмюровских волн обусловлено захватом и стохастической неустойчивостью движения электронов - образованием стохастических слоев в районе областей захвата гармоник конверсии $N = N_e + N_i$ и $N = N_e - 2N_i$ (обратная волна). Захват и стохастическая неустойчивость приводит к ускорению части электронов, т.е. к образованию хвостов функции распределения по скоростям. В отличие от случаев, рассмотренных в работе /3/, в случае I-I образуются "ближние" хвосты. Температура основной массы электронов практически не меняется, так как стохастические слои гармоник конверсии и ионно-звуковой волны не пересекаются.

В настоящей работе исследуется взаимодействие ленгмюровской волны с теми же параметрами, что и в случае I-I, с ионно-звуковой волной с параметрами $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 20$; $N_i = 5$ (случай 2-I) и $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $N_i = 7$ (случай 3-I). Согласно /4/ ионно-звуковые волны с такими параметрами слабо-нелинейны. Ранее было показано, что в случае 2-I некоторая часть энергии ленгмюровских волн, а в случае 3-I практически вся энергия идет на нагрев электронов /2/. В настоящей работе показано, что нагрев связан со стохастизацией движения электронов при стохастической неустойчивости. При уменьшении λ_i в случаях I-I, 2-I, 3-I растет стохастический слой ионно-звуковой волны. В случае I-I этот слой не пересекается, а в случае 2-I начинает пересекаться со слоями гармоник конверсии $N_e + N_i$ и $N_e - N_i$. В случае 3-I стохастические слои ионно-звуковой волны и гармо-

ник конверсии перекрываются, т.е. развивается сильная стохастическая неустойчивость движения электронов, приводящая к быстрому обмену энергией. Затухание ленгмюровских волн и в этих случаях связано с захватом электронов и развитием стохастической или сильной стохастической неустойчивости.

Поглощение энергии ленгмюровских волн электронами происходит на начальной стадии стохастической неустойчивости - переходной стадии от регулярного к стохастическому движению. Развитие стохастическое движение не успевает развиться за время поглощения энергии. Поэтому области стохастического движения - стохастические слои, которые мы определяем, имеют довольно условное значение, но позволяют качественно сравнивать разные случаи.

Описание численного эксперимента, методики изучения стохастических явлений приведены в работе /1/.

Рассмотрим развитие неустойчивости ленгмюровской волны в случаях 2-1 и 3-1 (ранее они рассматривались в работе /2/: случай 2-1 в работе /2/ обозначен, как случай 3-4; случай 3-1 - как 2-3, он же 3-3). На Рис.1-6 приведены кривые, описывающие развитие неустойчивости.

Рис.1а,б - зависимость от времени энергии электрического поля W_E и энергии электронов ΔW_e . Рис.2 - зависимость от времени верхней ($V_{\phi}^N + V_{\beta}^N$) и нижней ($V_{\phi}^N - V_{\beta}^N$) границы области захвата основной волны $N_e = 1$, ионно-звуковой волны $N_i = 5$ или $N_i = 7$, основных гармоник конверсии и модуляционной неустойчивости (для $N_e = 1$ приведена только ($V_{\phi}^N - V_{\beta}^N$)). Рис.3 - распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности $\tilde{n}(x)$ в разные моменты времени. Рис.4,5 - фазовые плоскости электронов и ионов в разные моменты времени. Рис.6 - функции распределения электронов по скоростям в $t/T_{oe} \sim 30$.

В обоих случаях 2-1 и 3-1 при развитии неустойчивости ленгмюровской волны основную роль играет конверсия этой волны на ионно-звуковой волне /5,6/, которая приводит к генерации гармоник ленгмюровской волны прямых $N = N_e + \beta N_i$ и обратных $N = N_e - \beta N_i$ волн ($\beta = 1, 2, 3, \dots$). Параметры ионно-звуковых волн и нескольких гармоник конверсии приведены в таблицах 1 и 2.

Из таблиц 1, 2 и Рис.2а, б видно, что энергия основной волны

ТАБЛИЦА I
Параметры ионно-звуковой волны и гармоник конверсии.
Случай 2-1.

N_i	β	N	$\frac{\lambda}{l_d}$	$\frac{V_{\phi}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\beta m}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi}^N + V_{\beta m}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi}^N - V_{\beta m}^N}{V_T}$	$\frac{T_B^N}{T_{oe}}$	$\frac{t}{T_{oe}}$	$\frac{V_{\beta t}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi}^N + V_{\beta t}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi}^N - V_{\beta t}^N}{V_T}$	
		5	20	0,0954	0	0,89	0,99	-0,80	7,1	28,0	0,57	0,66	-0,47
	I	6	16,7	3,18	3,2	1,9	5,1	1,2	2,7	27,7	0,7	3,9	2,5
	2	II	9,1	2,26									
	3	16	6,3	2,00									
	I	-4	25	-4,36	2,4	3,3	-1,1	-7,7	2,5	27,6	1,0	-3,3	-5,4
	2	-9	II, I	-2,48									
	3	-14	7,1	-2,08									

t_{max} - момент, когда максимальна амплитуда гармоники конверсии; $V_{\beta m}^N = 2\sqrt{\frac{e\varphi^N}{m}}$ в $t = t_{max}$;
 $V_{\beta 0}^i = V_{\beta 0}^i$; $V_{\beta 0}^N = 2\sqrt{\frac{e\varphi^N}{m}}$ в $t/T_{oe} \sim 30$; $T_B^N = \frac{2\pi}{k\sqrt{\frac{e\varphi^N}{m}}} = \frac{2\lambda^N}{V_{\beta m}^N}$ - период захваченных частиц.

ТАБЛИЦА 2

Параметры ионно-звуковой волны и гармоник конверсии.
Случай 3-1.

β	N	$\frac{\lambda}{V_d}$	$\frac{V_\phi}{V_T}$	$\frac{t_{max}}{T_{oe}}$	$\frac{V_{\beta m}^N}{V_T}$	$\frac{V_\phi + V_{\beta m}^N}{V_T}$	$\frac{V_\phi - V_{\beta m}^N}{V_T}$	$\frac{T_B}{T_{oe}}$	$\frac{t}{T_{oe}}$	$\frac{V_{\beta t}^N}{V_T}$	$\frac{V_\phi + V_{\beta t}^N}{V_T}$	$\frac{V_\phi - V_{\beta t}^N}{V_T}$
N_i	7	14,1	0,0915	0	0,89	0,99	-0,80	5,1	28	0,52	0,61	-0,43
$N_e + \beta N_i$	1	8	12,5	2,65	2,9	1,3	4,0	1,3	2,8	0,8	3,5	1,8
	2	15	6,7	2,03								
	3	22	4,5	1,88								
$N_e - \beta N_i$	1	-6	16,7	-3,18	3,6	2,1	-1,1	-5,3	2,5	1,2	-2,0	-4,4
	2	-13	7,7	-2,12								
	3	-20	5	-1,91								

Пояснения - см. таблицу 1.

быстро перекачивается в гармоники конверсии, амплитуда которых достигает максимума в $t/T_{oe} \sim 2-4$. Отметим, что с уменьшением λ_i уменьшается фазовая скорость гармоник конверсии. Однако, максимальная амплитуда также падает, так что области захвата гармоник конверсии не пересекаются с областью захвата ионно-звуковой волны, как и в случае 1-1. Отметим, что в случае 2-1 амплитуда гармоник конверсии заметно уменьшается с течением времени. В случае 3-1 изменение амплитуды значительно меньше (Рис.2а,б, Таблица 1,2).

В динамическом описании конверсия проявляется в концентрации поля во впадинах плотности, причем максимальная концентрация достигается в $t/T_{oe} \sim 4-5$ (Рис.3а,в). Напомним, что минимумы плотности совпадают с узлами сепаратрисы (см. /1/), так что плотность энергии поля периодически достигает максимума именно в районе узлов сепаратрисы (Рис.3б,г).

Концентрация поля во впадинах плотности приводит к вторичной модуляционной неустойчивости, которая проявляется в росте впадин (Рис.3а,б). По фазовым плоскостям ионов в $t/T_{oe} \sim 8$ (Рис.5б, 6б) в случае 2-1 видно возмущение скорости ионов пондеромоторной силой. В случае 3-1 этот эффект выражен несколько менее четко, зато более явно выражено укрупнение скорости ионов в нелинейной ионно-звуковой волне ($t/T_{oe} \sim 8-12$). Отметим, что возмущение скорости пондеромоторной силой приводит к возбуждению обратной ионно-звуковой волны, так что ионно-звуковая волна приобретает характер стоячей. Это особенно хорошо видно в случае 2-1.

После затухания поля ленгмюровских волн в $t/T_{oe} \approx 8$ на краях впадин плотности формируются фронты плотности и скорости (ударная волна) и возникает скачок потенциала - двойной электрический слой (см. /1,7/). Формирование фронтов хорошо видно по Рис.3а,в и Рис.4б, 5б в $t/T_{oe} \approx 12$. Фронты движутся навстречу друг другу и в случае 2-1 встречаются в $t/T_{oe} \sim 18-20$, причем небольшое число ионов ускоряется. В случае 3-1 еще до встречи фронтов в $t/T_{oe} \sim 16-18$ начинается захват ионов ионно-звуковой волной, а встреча происходит в $t/T_{oe} \sim 24-26$.

Затухание поля начинается, когда амплитуда основных гармоник конверсии дорастает до границы захвата электронов /8/ и когда начинается захват этими гармониками. В случаях 2-1, 3-1 это происходит в $t/T_{oe} \sim 0,5-1$ (Рис.1а,б). По фазовым плоскостям

тям электронов (Рис.4а,5а) в $t/T_{oe} \sim 1-3$ четко видно развитие захвата электронов гармониками конверсии $N_e = 6$ и (-4) в случае 2-1 и $N_e = 8$ и (-6) в случае 3-1. Захваченные электроны совершают $\sim 1/2$ оборота в области захвата гармоники $N = N_e + N_i$ за $t/T_{oe} \sim 1,5$ и $N = N_e - N_i$ - за $t/T_{oe} \sim 2,5$ (в случае 3-1 это время несколько меньше). В это время электроны ускоряются и поглощают энергию поля. Однако это не приводит к полному затуханию поля (Рис.1а,б). Поле продолжает затухать и в случае 2-1 достигает уровня $W_E \lesssim 0,1 W_E^0$ за время $t/T_{oe} \sim 8-10$. В случае 3-1 к $t/T_{oe} \sim 8-10$ поле затухает до уровня $W_E \sim 0,2 W_E^0$. По фазовым плоскостям электронов видно, что в это время происходит интенсивное перемешивание электронов на фазовой плоскости в районе областей захвата гармоник конверсии $N_e + N_i$. В случае 2-1 область захвата заполняется электронами к $t/T_{oe} \sim 26-28$, а в случае 3-1 уже к $t/T_{oe} \sim 10-12$. Медленнее идет перемешивание в районе областей захвата гармоник конверсии $N_e - N_i$. В обоих случаях область захвата заполняется только к $t/T_{oe} \sim 26-28$. Соответственно продолжается и затухание поля, хотя и более медленно. В случае 3-1 поле затухает до уровня $W_E \lesssim 0,1 W_E^0$ к $t/T_{oe} \approx 20$.

Отметим, что в случае 3-1 медленнее происходит затухание основной волны $N_e = 1$ (Рис.2а), т.к. из-за более быстрого затухания гармоник конверсии дорастают до меньшей амплитуды (таблица 2) и поглощают меньшую энергию из волны $N_e = 1$. В результате на волне $N_e = 1$ развивается слабая модуляционная неустойчивость, что видно по широкой впадине $\tilde{n}(x)$ на $x/r_d \sim 0-10$ в $t/T_{oe} \sim 28$ (Рис.3в). В результате этой неустойчивости отдельные частицы ускоряются до больших скоростей (Рис.4а, $t/T_{oe} \sim 28$), подобно случаям работы /3/. Отметим, что модуляционная неустойчивость волны $N_e = 1$ играет некоторую роль и в случае 2-1, но частиц, ускоренных до больших скоростей в этом случае нет.

Функции распределения электронов по скоростям меняются во времени, но к $t/T_{oe} \sim 20-25$ устанавливаются и остаются, в основном, постоянными. Из Рис.6а,б видно, что в обоих случаях функции распределения заметно меняются по сравнению с начальными, причем наблюдается нагрев основной массы электронов. Температура электронов на уровне $V \sim V_T$ или $V \sim 1,7 V_T$ (см. /1,2I/) в случае 2-1 $T_e(V_T)/T_e^0 \sim 1,1$; $T_e(1,7 V_T)/T_e^0 \sim 1,6$; в случае 3-1 $T_e(V_T)/T_e^0 \sim 2,5 \pm 0,3$; $T_e(1,7 V_T)/T_e^0 \sim 3,6 \pm 0,3$ (разброс в

случае 3-1 связан с небольшими изменениями $f(v)$ в течение плазменного периода).

Функции распределения в обоих случаях не являются максвелловскими (отсюда различие $T_e(V_T)$ и $T_e(1,7 V_T)$). Для характеристики нагрева электронов в /2/ была введена величина W_h - энергия, которой обладают электроны в интервале скоростей, соответствующем уровню $f(v)/f(0) = 0,1$ (для максвелловской $f(v)$ этот уровень соответствует интервалу $v/v_T \sim (-2,15) - (2,15)$). Область скоростей, соответствующая уровню $f(v)/f(0) < 0,1$ была названа хвостами. Энергия нагрева - $\delta W_h = W_h - W_e^0$ (W_e^0 - начальная тепловая энергия электронов), энергия хвостов δW_z (в $t = 0$ хвостов нет, т.к. $f_0(v)$ обрезана на $v \sim \pm 2 V_T$). Начальная энергия ленгмювской волны $W_w^0 = W_E^0 + \Delta W_e^0 = 3,6 W_e^0$, энергия, потерянная волной к моменту времени t - $W_w = W_w^0 - 2 W_E(t)$ где $2 W_E(t)$ - остаточное поле плюс возмущение электронов в момент t ($2 W_E(t)$ обычно малая величина, так что $W_w \approx W_w^0$).

Пользуясь этими понятиями, приходим к выводу, что в случае 1-1, рассмотренном в /1/, практически вся энергия волны поглощается хвостами - $\delta W_z/W_w \sim 0,98$; $\delta W_h/W_w \sim 0,01$. В случае 2-1 хвостами поглощается только половина энергии - $\delta W_z/W_w \sim 0,51$, а половина энергии идет на нагрев - $\delta W_h/W_w \sim 0,48$. В случае 3-1 практически вся энергия волны идет на нагрев $\delta W_h/W_w \sim 0,93$, а $\delta W_z/W_w \sim 0,06$. Небольшая часть энергии $\delta W_i/W_w \sim 0,01-0,02$ поглощается ионами. Отметим, что δW_h , δW_z , T_e в случае 2-1 отличаются от приведенных в работе /2/. Это связано с тем, что в работе /2/ использовалась функция распределения в $t/T_{oe} \sim 15$, а здесь в $t/T_{oe} \sim 30$. Различие показывает, что в $t/T_{oe} \sim 15$ $f(v)$ еще не установилась.

Для изучения стохастических эффектов исследовались траектории движения пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости и поведение групп пробных частиц на фазовой плоскости. Траектории частиц с разными начальными координатами показаны на Рис.7-17 (случай 2-1) и Рис.(18-31). На Рис.32а-г показаны функции распределения по скоростям групп пробных частиц. Начальные координаты групп пробных частиц приведены в таблицах 3,4, координаты отдельных частиц - на рисунках траекторий. Положение узлов x_1 , x_2 и максимума x_m сепаратрисы ионно-звуковой волны в случаях 2-1 и 3-1 приведены в таблицах 3,4.

ТАБЛИЦА 3

Начальные координаты пробных частиц. Случай 2-1.

Узлы сепаратрис $X_1/r_d = 10$; $X_2/r_d = 30$; максимум $X_m/r_d = 20$.
($V_{\phi}^i + V_{z0}^i$)/ $V_T = 0,99$; ($V_{\phi}^i - V_{z0}^i$)/ $V_T = -0,80$; $V_{\phi}^i/V_T = 9,54 \cdot 10^{-2}$.

Группа	1	2	3	4	5	6	7
Δn	100	2x50	100	100	50	50	100
X_0/r_d	20	20	20	20	20	20	II, 0+28, 8
$(X_0 - X_1)/\lambda_i$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,05+0,94
V_0^o	-1+0,98	4,5+2,5 -(4+1,55)	6+12,9	-(6-12,9)	(13,3+30)	-(13,3+30)	0
V_0^o/V_T	-0,159+0,156	0,72+0,40 -(0,64+0,25)	0,96+2,06	-(0,96+2,06)	(2,12+4,77)	-(2,12+4,77)	0
$V_0^o - V_{\phi}^i$	-1,60+0,38	3,9+1,90 -(4,6+2,15)	5,40+12,3	-(6,6+13,3)	(12,7+29,4)	-(13,9+30,6)	-0,60
$V_0^o - V_{\phi}^i$ V_{z0}^i	-0,29+0,067	0,7+0,34 -(0,82+0,38)	0,96+2,20	-(1,18+2,42)	(2,28+5,25)	-(2,49+5,46)	-0,11

V нормировано на V_d / T_{oe} ; V_0^o - невозмущенная начальная скорость (для групп I-6)
возмущенная начальная скорость $V_0 = V_0^o$.

10

ТАБЛИЦА 4

Начальные координаты пробных частиц. Случай 3-1.

Узлы сепаратрис $X_1/r_d = 7,14$; $X_2/r_d = 21,43$; максимум $X_m/r_d = 14,28$.
($V_{\phi} + V_{z0}^i$)/ $V_T = 0,99$; ($V_{\phi}^i - V_{z0}^i$)/ $V_T = -0,80$; $V_{\phi}^i/V_T = 9,15 \cdot 10^{-2}$.

Группа	1	2	3	4	5;6	7	8
Δn	100	2x50	100	100	2x50	100	100
X_0/r_d	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	7,6+20,8	14,3+28,5
$(X_0 - X_1)/\lambda_i$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,032+0,96	0,5+1,49
V_0^o	-1+0,98	4,5+2,5 -(4+1,55)	6+12,9	-(6+12,9)	(13,3+30) -(13,3+30)	0	12,6
V_0^o/V_T	-0,159+0,156	0,72+0,4 -(0,64+0,25)	0,96+2,06	-(0,96+2,06)	(2,12+4,77) -(2,12+4,77)	0	2,0
$V_0^o - V_{\phi}^i$	-1,575+0,405	3,92+1,92 -(4,58+2,13)	5,42+12,3	-(6,58+13,5)	(12,8+29,4) -(13,9+30,6)	-0,57	12,0
$V_0^o - V_{\phi}^i$ V_{z0}^i	-0,28+0,072	0,70+0,34 -(0,82+0,38)	0,97+2,21	-(1,17+2,41)	2,28+5,25 -(2,49+5,46)	-0,10	2,14

Пояснения - см. таблицу 3.

11

Рассмотрим траектории частиц в случае 2-1. Начнем рассмотрение с групп частиц 1, 2 и 7. Начальные координаты этих частиц расположены в области захвата ионно-звуковой волны, так что можно ожидать, что эти частицы будут двигаться как захваченные. Действительно, заметная часть этих частиц (~ половина) оказывается захваченной, несмотря на сильное возмущение траекторий полем основной волны и гармоник конверсии (Рис. 7б, г, 9в). Однако, есть заметное число частиц, которые выходят из захвата (Рис. 7-10). В группах 1-2-7 доля таких частиц $\Delta \tilde{n}/n_0 \sim 0,44-0,66-0,60$. В отличие от случая 1-1 [1] оказывается, что практически нет такой области $x_0 - v_0$, где все частицы были бы захвачены - даже в самом центре области захвата $x_0/r_d \sim 20$, $v_0/v_T \sim v_{\phi}^i/v_T \sim 0,1$ есть частицы, которые выходят из захвата (Рис. 7в, 9г). Правда, есть небольшой интервал $v_0/v_T = 0,01-0,12$ вблизи $v_{\phi}^i/v_T = 0,095$, где частицы все время захвачены. Хотя такие интервалы разделяют захваченные и выходящие из захвата частицы и при других v_0 , мы будем считать границы этого интервала внутренними границами области, откуда частицы выходят из захвата.

Дальнейшая судьба частиц, вышедших из захвата, различна. Некоторые из них остаются пролетными с $v > 0$ (Рис. 7б, 9б, г, 10б) или $v < 0$ (Рис. 9а, 10а). Некоторые вновь захватываются ионно-звуковой волной (Рис. 10г) и снова выходят из захвата (Рис. 7а, 10в). Отдельные частицы из группы 7 (в группах 1 и 2 таких частиц нет), выйдя из захвата ионно-звуковой волны, попадают в захват высокими, а иногда и основными гармониками конверсии. Так частица Рис. 8а выходит из захвата, становится пролетной с $v < 0$, затем захватывается гармоникой $N_e = -9$, $\beta > 2$ (Рис. 8б), выходит из захвата с $v < v_{\phi}^N$ и попадает в захват основной гармоникой $N_e = -4$ (Рис. в системе $N_e = -4$ не приведен). Частица Рис. 8в выходит из захвата с $v > 0$, ускоряется гармоникой $N_e = 6$, становится пролетной с $v > v_{\phi}^N$, захватывается $N_e = 6$ и т.д. (Рис. 8г). Траектории частиц с близкими начальными координатами оказываются различными и расходятся на фазовой плоскости (Рис. 11а, б, в). Такой характер траекторий указывает на стохастический характер движения частиц (см. [1, 3]).

В работе [1] было показано, что существует некоторая область фазового пространства около сепаратрисы ионно-звуковой волны, в которой движение частиц является стохастическим (стохастический слой). В рассматриваемом случае 2-1 также образует-

ся стохастический слой. В отличие от случая 1-1 этот слой практически не имеет внутренних границ по x_0 для $v_0^0 = 0$ и по v_0 для $x_0 = x_m$, так что можно полагать, что стохастический слой занимает почти всю область захвата. Отметим, что число частиц выходящих из захвата и участвующих в стохастическом движении довольно заметно - около половины частиц из групп 1, 2, 7.

Проследивая движение групп частиц 1, 2, 7 на фазовой плоскости электронов (фазовые плоскости выводились через 1-2 T_{oe}), можно видеть, что обычно в какой-то момент времени (в группах 7-2-1 в $t/T_{oe} \approx (1-2)-(8-10)-(16-20)$) в районе узла сепаратрисы из захвата выходит группа в несколько частиц. Позже эта группа "растаскивается" по фазовой плоскости, т.к. некоторые частицы остаются в сфере влияния (в стохастическом слое) ионно-звуковой волны, а некоторые попадают в сферу влияния гармоник конверсии, т.е. в их стохастические слои. Отметим, что это свидетельствует о пересечении стохастического слоя ионно-звуковой волны и слоев гармоник конверсии. Напомним, что в случае 1-1 эти слои не пересекались.

С течением времени функции распределения частиц размываются. Это хорошо видно по $f(v)$ частиц группы 7 (Рис. 32а) и группы 1 (Рис. 32б) в $t/T_{oe} \sim 30$. Пунктиром на этих рисунках показана начальная функция распределения. Из Рис. 32а, б видно несимметричное уширение функций распределения (уширение больше в области скоростей $v > 0$). Это соответствует несимметричному уширению функции распределения электронов, т.е. нагреву электронов (Рис. 6а).

Выходя из захвата частицы набирают энергию. В группе 1 максимальная скорость не превышает $v/v_T \sim \pm 2$ (см. траектории Рис. 9а, б; 10а, г и Рис. 32б). В группе 7 скорости основной массы частиц также не превышают $v/v_T \sim \pm 2$, но отдельные частицы ускоряются до скорости $v/v_T \sim 3$ и даже $v/v_T \sim \pm 5$ (см. траектории Рис. 8а, б и Рис. 32а).

Для определения внешних границ стохастического слоя ионно-звуковой волны рассматривались траектории частиц из групп 3, 5 и 4, 6 с начальными v_0 , лежащими вне области захвата ионно-звуковой волны. Траектории частиц Рис. 12а, 13а, 13в из группы 3 и Рис. 15а, б из группы 4, а также траектории Рис. 17а частиц из группы 5 и Рис. 17в из группы 6 указывают на стохастический характер движе-

странствует по областям захвата гармоник конверсии $N_e = 6$ (Рис. I4б) и гармоник модуляционной неустойчивости $N_e = 5$ и 4 (Рис. I4в, г).

Подобным образом ведут себя и частицы из группы 4. Частица Рис. I6а, б сначала пролетная, затем попадает в захват гармоникой $N_e = -9$, $\beta = 2$ (не показано на Рис.), затем переходит в стохастический слой $N_e = -4$ (Рис. I6б), где частица то захватывается, то выходит из захвата. Частица Рис. I6в, г сначала пролетная, затем захватывается $N_e = -4$ и выходит из захвата с $|v| > |v_\phi^N|$.

Такой характер траекторий показывает, что движение частиц в районе областей захвата гармоник конверсии является стохастическим. Это подтверждается тем, что траектории частиц с близкими начальными координатами становятся различными и расходятся на фазовой плоскости.

Стохастический слой гармоник конверсии $N_e = 6$ и $N_e = -4$ будем определять подобно случаю I-I /I/, как область начальных координат v_0 (v_0 вне конечной области захвата соответствующей гармоники), из которой к $t/t_{oe} \sim 30$ частицы попадают в область $|v| > |v_\phi^N|$. При таком определении стохастические слои более высоких ($\beta > 1$) гармоник конверсии включаются в слой основных гармоник. Отметим, что в случае 2-I высокие гармоники играют меньшую роль, чем в случае I-I - по траекториям видно, что существенными оказываются только гармоники с $\beta = 2; 3$.

Анализируя скорости частиц из групп 3 и 4, а также из группы 2 в $t/t_{oe} \sim 30$ можно определить границы стохастических слоев гармоник $N_e = 6$ и $N_e = -4$ на $x = x_m$ (см. /I/). Мы определяли нижнюю границу стохастического слоя гармоник $N_e = 6$ и верхнюю границу слоя гармоник $N_e = -4$. Эти границы приведены в таблице 5, а также показаны на Рис. 33а. Напомним, что на этом рисунке показана начальная и конечная (пунктир) область захвата ионно-звуковой волны и границы ее стохастического слоя, а также половины областей захвата гармоник $N_e = 6$ и $N_e = -4$ в $t = t_{max}$ и в конечное $t/t_{oe} \sim 30$. Стрелками показаны границы стохастических слоев. По фазовой плоскости электронов в $t/t_{oe} \sim 30$ найдено, что слой гармоник $N_e = 6$ занимает практически всю область захвата, так что за внутреннюю границу можно принять фазовую скорость $v_\phi/v_T = 3,18$. Слой гармоник $N_e = -4$ имеет внутреннюю границу $v_\phi/v_T \sim -4,2$, почти не отличающуюся от $v_\phi^N/v_T = -4,36$.

Мы не определяли специально верхнюю границу стохастического слоя гармоник $N_e = 6$ и нижнюю границу слоя гармоник $N_e = -4$. Их можно оценить по максимальной $v_{max}/v_T \sim 6,8$ и минимальной $v_{min}/v_T \sim -9,4$ скорости электронов в $t/t_{oe} \sim 30$ (см. /I/). При этом следует иметь в виду, что некоторый вклад в стохастическое движение дают гармоники модуляционной ($N_e \approx 3$), вторичной модуляционной неустойчивости и вторичной конверсии с фазовыми скоростями $v > |\pm v_\phi^N|$, так что эти границы могут отличаться от границ слоя собственно гармоник конверсии.

Из Рис. 33а видно, что стохастический слой ионно-звуковой волны пересекается со слоями гармоник конверсии (напомним, что в случае I-I /I/ эти слои не пересекались). Пересечение слоев подтверждается траекториями. Так частица Рис. I0б из группы 2 сначала захвачена ионно-звуковой волной, затем становится пролетной, после чего захватывается в слой гармоник $N_e = 6$. Частицы Рис. 8а, б и 8в, г из группы 7 из захвата ионно-звуковой волны переходят в слой гармоник $N_e = -4$ или $N_e = 6$. Всего из групп I, 2, 7 переходит из слоя ионно-звуковой волны в слой гармоник $N_e + N_i$ (в $t/t_{oe} \sim 30$ скорость частиц $v/v_T > 2$) I-9-6 частиц соответственно, а в слой $N_e - N_i$ ($v/v_T > 1-21$) - 0-I-I частица. Отметим, что перекрытие слоев больше для гармоник $N_e + N_i$, в соответствии с этим и число частиц, переходящих из слоя N_i в слой $N_e + N_i$ больше (16 частиц), чем в слой $N_e - N_i$ (2 частицы).

Частицы из групп 3-6 также переходят из слоя в слой. Так частица из группы 3 Рис. I3а, б сначала в слое ионно-звуковой волны, затем переходит в слой $N_e = -4$; частица из группы 3 Рис. I3в, г переходит из слоя $N_e = 6$ в слой ионно-звуковой волны; частица из группы 4 Рис. I5б-г переходит из слоя $N_e = -4$ в слой ионно-звуковой волны. Наконец, частица Рис. I7а, б из группы 5 сначала попадает в слой $N_e = 6$, затем в слой ионно-звуковой волны, а частица Рис. I7в, г из группы 6 - сначала в слое $N_e = -4$, а затем в слое ионно-звуковой волны. Всего из слоя гармоник $N_e + N_i$ переходит в слой ионно-звуковой волны (в $t/t_{oe} \sim 30$ скорость частиц из групп 3 и 5 $v < v_\phi^i$) I6 и 3 частицы соответственно, а из слоя гармоник $N_e - N_i$ в слой ионно-звуковой волны (скорость частиц из групп 4 и 6 $v > v_\phi^i$) I7 и 2 частицы.

Переход частиц из одного слоя в другой свидетельствует о сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата волн $N_i - (N_e + \beta N_i)$ или $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Отметим, что

за время $t/T_{0e} \sim 30$ из слоя $N_e + N_i$ переходит в слой $N_e - N_i$ всего 1 частица (частицы из групп 3 и 5 со скоростью в $t/T_{0e} \sim 30$ $v/v_T > 1-21$), из слоя $N_e - N_i$ в слой $N_e + N_i$ — ни одной. Таким образом, сильная стохастическая неустойчивость в районе областей захвата волн $(N_e + N_i) - N_i - (N_e - N_i)$ в случае 2-1 роли не играет.

Подводя итоги, можно сделать вывод, что в случае 2-1 основную роль играет стохастическая неустойчивость, которая приводит к образованию стохастических слоев в районе областей захвата ионно-звуковой волны N_i и гармоник конверсии $N_e + \beta N_i$ и $N_e - \beta N_i$. Некоторую роль играет также сильная стохастическая неустойчивость в районе областей захвата $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$, хотя число частиц участвующих в этой неустойчивости не очень велико. Эта неустойчивость сильнее проявляется в районе $N_i - (N_e + \beta N_i)$, что приводит к несимметричному расплыванию функций распределения пробных частиц (Рис.32а,б) и электронов (Рис.6а).

Развитие стохастической неустойчивости в районе области захвата N_i и сильной стохастической неустойчивости $N_i - (N_e + \beta N_i)$ приводит к нагреву электронов, поглощающему около половины энергии поля ($\delta W_h/W_w \sim 0,48$). Развитие стохастической неустойчивости в районе областей захвата $N_e + \beta N_i$ и $N_e - \beta N_i$ также приводит к поглощению энергии поля электронами и к образованию "ближних" хвостов функции распределения ($\delta W_t/W_w \sim 0,51$).

Рассмотрим траектории частиц в случае 3-1 (Рис.18-31). Этот случай представляет особенный интерес, так как практически вся энергия ленгмюровских волн идет на нагрев основной массы электронов плазмы. Как обычно, начнем рассмотрение с групп 1,2 и 7 частиц, захваченных в начальный момент времени. В случае 3-1 только малая часть частиц из этих групп $\Delta n/n_0 \sim 0,1$ остается захваченной (Рис.18в). Подавляющая часть частиц $\Delta n/n_0 \sim 0,9-1,0$ ($\Delta n/n_0 \sim 0,98-0,92-0,86$ в группах 1-2-7) выходит из захвата (Рис.18-21). При этом нет области $x_0 - v_0$, где все частицы были бы захвачены — частицы с любыми x_0, v_0 выходят из захвата, иногда перемежаясь частицами, остающимися в захвате.

Судьба частиц, вышедших из захвата, различна. Часть из них остается вблизи области захвата ионно-звуковой волны то захватываясь ею, то вновь выходя из захвата (Рис.18а,20а,21г) или

оставаясь пролетными с $v > 0$ (Рис.18г) или $v < 0$ (Рис.18б). Однако наиболее типичны для случая 3-1 траектории частиц, переходящие из области захвата ионно-звуковой волны в области захвата гармоник конверсии, высоких ($\beta > 1$) или основных ($\beta = 1$). Такие траектории показаны на Рис.19-21. Частица Рис.19а,б из группы 7 и частица Рис.20б-г из группы 1 сначала захвачены ионно-звуковой волной, затем переходят в захват гармоникой $N_e = 15, \beta = 2$ (Рис.20в) и гармоникой $N_e = 8, \beta = 1$ (Рис.19б,20г). Частица Рис.19в,г из группы 7 и частица Рис.21а-в из группы 1 из захвата ионно-звуковой волной переходят в захват $N_e = -13, \beta = 2$ (Рис.21б) и в захват $N_e = -6, \beta = 1$ (Рис.19г,21в). Отметим, что слово захват мы употребляем здесь чисто условно — на самом деле частица переходит в соответствующий стохастический слой.

Траектории частиц из групп 1,2 и 7 с близкими начальными координатами оказываются различными и расходятся на фазовой плоскости (Рис.22а-в). Это показывает, что в районе области захвата ионно-звуковой волны образуется стохастический слой. Этот слой не имеет внутренних границ по x_0 для $v_0 = 0$ и по v_0 для $x_0 = x_m$, так что можно полагать, что стохастический слой занимает всю область захвата ионно-звуковой волны.

Развитие стохастического слоя свидетельствует о стохастической неустойчивости движения электронов в районе области захвата ионно-звуковой волны N_i . Переход траекторий частиц из стохастического слоя ионно-звуковой волны в стохастические слои гармоник конверсии свидетельствует о сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата волн $N_i - (N_e + \beta N_i)$ или $N_i - (N_e - \beta N_i)$. В случае 3-1 в этой неустойчивости участвует значительное число частиц. Действительно, из групп 1,2 и 7 в область $v/v_T > 2$ переходит к $t/T_{0e} \sim 30$ 13-9-9 частиц соответственно, т.е. 31 частица ($\Delta n/n_0 \sim 0,1$), в область $v/v_T > 1-21 - 26-17-22$ частицы соответственно, т.е. 65 частиц ($\Delta n/n_0 \sim 0,2$).

Анализ движения групп частиц 1,2 и 7 на фазовой плоскости электронов (фазовые плоскости выводились через $1-2 T_{0e}$) показывает, что частицы выходят из захвата в районе узлов сепаратрисы в группах 7-2-1 в $t/T_{0e} \approx (1-2) - (4-6) - (12-14)$. В дальнейшем они расходятся по фазовой плоскости, довольно равномерно заполняя некоторую область фазового пространства. Границы этой области заметно отличаются от границ области захвата ионно-звуковой

волны. Это хорошо видно по функциям распределения $f(v)$ пробных частиц групп 7 (Рис.32в) и I (Рис.32г). Видно, что частицы распределились в интервале скоростей $v/v_T \sim (-4) - (+3)$ довольно равномерно. Напомним, что область захвата ионно-звуковой волны ограничена скоростями $(v_{\phi}^i + v_{z0}^i)/v_T \sim 1$ и $(v_{\phi}^i - v_{z0}^i)/v_T \sim (-0,8)$. Такой вид функций распределения свидетельствует о нагреве пробных частиц, что подтверждает нагрев электронов (Рис.6б). Отметим, что $f(v)$ в случае 3-I (Рис.32в,г) заметно отличаются от $f(v)$ в случаях 2-I (Рис.32а,б) и I-I (см. /I/ Рис.25а,б).

Для определения внешних границ стохастического слоя ионно-звуковой волны рассматривались траектории частиц из групп 3, 5 и 4,6 с v_0 , лежащими вне области захвата ионно-звуковой волны. Заметное число частиц из этих групп попадает в стохастический слой ионно-звуковой волны. Действительно, в $t/T_{oe} \sim 30$ 18 и 4 частицы из групп 3 и 5 имеют скорости $v < v_{\phi}^i$, а 20 и 10 частиц из групп 4 и 6 имеют скорости $v > v_{\phi}^i$. Как правило, эти частицы вначале попадают в захват (в стохастический слой) гармониками конверсии $\beta = 1,2$. Так, прежде чем попасть в слой ионно-звуковой волны, частица Рис.23а,б из группы 3 попадает в слой гармоника $N_e = 15$, частица Рис.23в,г из группы 3 и частица Рис.28а,б из группы 5 - в слой $N_e = 8$ и 15. Подобным образом, частица Рис.27а-в из группы 4 и частица Рис.28в,г из группы 6 сначала попадают в слой гармоник $N_e = (-6)$ и (-13) . Только редкие частицы типа частицы Рис.26а из группы 4 не попадают в стохастический слой гармоник конверсии. Характер большинства траекторий указывает на развитие сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата волн $(N_e + \beta N_i) - N_i$ или $(N_e - \beta N_i) - N_i$.

Анализ траекторий и скоростей частиц из групп 3,5 и 4,6 показывает, что существуют граничные v_{cp} такие, что часть частиц с $|v_0| < |v_{cp}|$ попадает в стохастический слой ионно-звуковой волны. Эти v_{cp} определяют верхнюю и нижнюю границу слоя. При определении границ учитывались все частицы из групп 3 и 5 ($v_0 > 0$), которые в $t/T_{oe} \sim 30$ имеют скорость $v < v_{\phi}^i$, и все частицы из групп 4 и 6 ($v_0 < 0$), имеющие скорость $v > v_{\phi}^i$. Эти границы показаны стрелками на Рис.33б и приведены в таблице 6. Внутренних границ у стохастического слоя ионно-звуковой волны нет, но поскольку нам удобно для сравнения со случаями I-I, 2-I разделить слой на верхний и нижний, мы полагаем их внутренние границы одинаковыми и равными v_{ϕ}^i .

ТАБЛИЦА 6

Границы и ширина стохастических слоев

Случай 3-I

	Ионно-звуковая волна		Гармоника $N_e + N_i$		Гармоника $N_e - N_i$	
	v_{cp}/v_T	Δ/v_T	v_{cp}/v_T	Δ/v_T	v_{cp}/v_T	Δ/v_T
<u>Верхняя граница</u> Внешняя	3,64	3,6	6,8	0,092	0,64	3,8
Внутренняя Внутренняя / электроны						
<u>Нижняя граница</u> Внешняя	-4,29	4,4	8,4	-0,47	-3,18 ^x	3,2
Внутренняя Внутренняя / электроны	0,092			2,65 ^x		

v_{cp} - граница стохастического слоя; Δ - ширина стохастического слоя; $v_{z0}^N = 21 \sqrt{\frac{c \mu^N}{r L}}$ в $\frac{t}{T_{oe}} \sim 30$.
x - по фазовой плоскости электронов.

Анализ траекторий частиц из групп 3-6 и 8 показывает, что стохастические слои образуются также в районах областей захвата гармоник конверсии. Действительно, в этих районах частицы то захватываются, то выходят из захвата гармониками конверсии. Траектории частиц с близкими начальными координатами различаются и расходятся на фазовой плоскости. Характерные траектории частиц из группы 3 показаны на Рис.23-25, из группы 4 - на Рис.26-27, из группы 5 и 6 - на Рис.28, из группы 8 - на Рис.29-31. Как было показано выше, даже траектории, попадающие в стохастический слой ионно-звуковой волны, вначале попадают в слой гармоник конверсии $\beta = 1,2$ (Рис.23а-г, 27а-в, 28а-г, 29а-г).

Некоторые частицы остаются в пределах слоя гармоник конверсии, но их траектории указывают на стохастический характер движения частиц. Так частица Рис.24а-в из группы 3 странствует по областям захвата $N_e = 15$ и 8, частица Рис.24г - только $N_e = 8$. Частица Рис.26б-г из группы 4 странствует по областям захвата гармоник $N_e = (-13)$ и (-6) .

Некоторые частицы из стохастического слоя гармоник конверсии переходят в слои гармоник модуляционной неустойчивости. Так частица Рис.25а-г из стохастического слоя гармоник конверсии $N_e = 8$ (Рис.25б) переходит последовательно в слои гармоник модуляционной неустойчивости $N_e = 4, N_e = 3$ (Рис.25в), $N_e = 2$ (Рис.25г), набирая большую скорость. Частица Рис.31а-г из группы 8, ускоряется до меньшей скорости, странствуя по стохастическим слоям $N_e = 8$ (Рис.31б), $N_e = 6$ (Рис.31в) и $N_e = 4$ (Рис.31г). Траектории такого типа указывают на сильную стохастическую неустойчивость в районе областей захвата гармоник конверсии $N_e = 8$ и гармоник модуляционной неустойчивости. Однако, в этой неустойчивости участвует очень малое число частиц (единицы), так что в общем развитии она не играет существенной роли.

Наконец, обратим внимание на еще один тип траекторий - траектории частиц, которые переходят из слоя гармоник конверсии с $V_{\phi}^N > 0$ (< 0) через слой ионно-звуковой волны в слой гармоник конверсии с $V_{\phi}^N < 0$ (> 0). Такие траектории имеют частицы Рис.27а-г из группы 3, Рис.28а,б из группы 6, Рис.30а-г из группы 8. Частица Рис.27а-г сначала странствует по слоям гармоник $N_e = (-6)$ и (-13) (Рис.27б,в), затем попадает в слой ионно-звуковой волны (Рис.27а) и, наконец, в слой гармоник $N_e = 15$

(Рис.27г). Частица Рис.28а,б из слоя $N_e = 8$ переходит в слой ионно-звуковой волны и в слой $N_e = -13$. Частица Рис.30а-г переходит из слоя $N_e = 22, \beta = 3$ (Рис.30б) в слой ионно-звуковой волны (Рис.30а) и в слой $N_e = -13$ (Рис.30в), а затем $N_e = -6$ (Рис.30г). Такие траектории свидетельствуют о сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник конверсии с $V_{\phi}^N > 0, V_{\phi}^N < 0$ и ионно-звуковой волны $-(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$. Следует отметить, однако, что в этой неустойчивости участвует очень малое число частиц (единицы), так что она не играет существенной роли. Действительно, в $t/T_{oe} \sim 30$ из группы 3 в область слоя гармоник $N_e - \beta N_i$ ($V/V_T > |1-2|$) переходит всего 2 частицы, а из группы 4 в область слоя гармоник $N_e + \beta N_i$ ($V/V_T > 2$) переходит 3 частицы.

Анализируя траектории и движение пробных частиц на фазовой плоскости, можно сделать вывод, что основную роль в случае 3-1 играет сильная стохастическая неустойчивость в районе области захвата ионно-звуковой волны и областей захвата гармоник конверсии с $V_{\phi}^N > 0 - N_i - (N_e + \beta N_i)$ или гармоник с $V_{\phi}^N < 0 - N_i - (N_e - \beta N_i)$.

Определим некоторые границы стохастических слоев гармоник конверсии. Подобно случаям 1-1 и 2-1, будем включать стохастические слои высоких гармоник конверсии $\beta > 1$ в слой основных гармоник $\beta = 1$. Следует отметить, что в случае 3-1 кроме основных гармоник заметную роль играют только гармоник с $\beta = 2$. Анализ траекторий и скоростей в $t/T_{oe} \sim 30$ частиц из групп 1,2 и 3,4 показывает, что существуют граничные скорости V_{zp} такие, что часть частиц с $|V_0| < |V_{zp}|$ попадает в стохастический слой той или иной гармоник конверсии и к $t/T_{oe} \sim 30$ попадает в область $|V| > |V_{\phi}^N|$. Эти V_{zp} дают нижнюю границу стохастического слоя гармоник $N_e = 8$ на $X_0 = X_m$ и верхнюю границу стохастического слоя гармоник $N_e = -6$ на $X = X_m$. Эти границы показаны стрелками на Рис.33б и приведены в таблице 6. Внутренних границ у обоих слоев нет, поэтому мы полагаем эти границы равными соответствующей фазовой скорости V_{ϕ}^N .

Мы не определяли специально верхнюю границу стохастического слоя гармоник $N_e = 8$ и нижнюю границу слоя гармоник $N_e = -6$. Нижнюю границу слоя $N_e = -6$ можно оценить по минимальной $V_{min}/V_T \sim -6,7$ скорости электронов в $t/T_{oe} \sim 30$. Определить верхнюю границу слоя $N_e = 8$ по максимальной скорости электро-

нов $V_{max}/V_T \sim 19,7$ нельзя, так как эта скорость определяется сильной стохастической неустойчивостью на $N_e = 8$ и гармониках модуляционной неустойчивости.

Из Рис.326 видно, что стохастический слой ионно-звуковой волны и слой гармоник конверсии пересекаются, причем пересечение заметно больше, чем в случае 2-1 (Рис.32а). Это подтверждает вывод, сделанный на основании анализа траекторий и движения частиц на фазовой плоскости, о сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата ионно-звуковой волны и гармоник конверсии $N_i - (N_e + \beta N_i)$ или $N_i - (N_e - \beta N_i)$. В отличие от случая 2-1 в данном случае 3-1 в этой неустойчивости участвует значительное число частиц. Именно эта неустойчивость в случае 3-2 приводит к нагреву электронов, который поглощает практически всю энергию поля - $\delta W_h/W_h \sim 0,93$.

Попробуем выделить основные механизмы, приводящие к стохастической неустойчивости движения электронов. Начнем с ионно-звуковой волны. Будем анализировать движение групп пробных частиц 1, 2 и 7 на фазовой плоскости (из-за технических сложностей мы не можем привести соответствующие фотографии) и траектории частиц на фазовой плоскости. Движение частиц этих групп приобретает стохастический характер после того, как они выходят из захвата ионно-звуковой волной. По фазовым плоскостям видно, что частицы выходят из захвата в районе узлов сепаратрисы, а затем "растаскиваются" по фазовой плоскости. В работе /1/ мы обратили внимание на основные причины, которые могут привести к стохастической неустойчивости - образованию стохастического слоя ионно-звуковой волны: возмущение полем основной волны ($N_e = 1$), полем гармоник конверсии, эффекты, связанные с ионной нелинейностью (образование двойных электрических слоев и т.п.). Все эти эффекты могут действовать одновременно, но на начальной стадии основную роль играют $N_e = 1$ и гармоника конверсии, позже (в случае 3-1 в $t/T_{oe} \approx 8-12$, в случае 2-1 в $t/T_{oe} \approx 12-14$, см. Рис.4б, 5б) включаются эффекты ионной нелинейности. Отметим, что с уменьшением длины ионно-звуковой волны уменьшается период оборота захваченных частиц (таблица 3,4), так что частицы чаще попадают в район узлов сепаратрисы и имеют большую вероятность выйти из захвата, попав в узел в соответствующей фазе поля.

Оказывается, что в обоих случаях 2-1 и 3-1 в группах 7 и

2 заметное число частиц выходит из захвата на начальной стадии (см., например, траектории Рис.7а, 8а, в, 10б-г, 21г). Роль возмущения полем волны $N_e = 1$ хорошо видна, например, по траекториям Рис.7а, 21г. В группе 1 (в этой группе v_0 близки к v_{ϕ}^i , так что захваченные частицы движутся по глубоким орбитам) частицы начинают выходить из захвата в случае 2-1 только в $t/T_{oe} \approx 16-20$, в случае 3-1 - в $t/T_{oe} \approx 12-16$, т.е. на стадии, когда становятся существенными эффекты ионной нелинейности (см. траектории Рис.9а, б, г; 20а, б; 21а). На этой стадии и в группах 7 и 2 выходит из захвата заметное число частиц (см. траектории Рис.7а, в; 10а, г; 18а, б, г; 19а, в). Напомним, что в случае 1-1 /1/ в группах 1 и 2 из захвата вышло всего несколько частиц также на этой стадии.

Таким образом, в случаях 2-1, 3-1 существенную роль играет, как возмущение полем волны $N_e = 1$ и гармониками конверсии, так и эффекты, связанные с ионной нелинейностью.

Обратимся к стохастическим слоям гармоник конверсии. В работе /1/ мы обратили внимание на основные механизмы, которые могут привести к образованию этих слоев: модуляция амплитуды гармоники конверсии при движении захваченных ею электронов; возмущение полем основной волны $N_e = 1$; возмущение полем высоких $\beta > 1$ гармоник конверсии; возмущение полем второй основной гармоники конверсии.

Анализируя движение на фазовой плоскости электронов (Рис. 4а, 5а) и пробных частиц из групп 3 и 4, можно видеть, что одной из причин перемешивания в районе областей захвата гармоник конверсии является изменение амплитуды этой гармоники. При этом частицы то выходят из захвата, то вновь попадают в захват. Столь же наглядно проявляется захват частиц высокими гармониками конверсии и странствия частиц по областям захвата высоких и основной гармоник конверсии. Мы обращали внимание на этот эффект, анализируя траектории (см., например, траектории Рис. 12б-г, 15а-в, 24а-в, 26б-г).

Роль возмущения полем основной волны $N_e = 1$ проверялась в модельном численном эксперименте. В однородной плазме с неподвижными ионами задавалась основная ленгмювская волна $N_e = 1$ и гармоника $N_e = 8$ с параметрами гармоники конверсии $N_e = 8$ в $t = t_{max}$ в случае 3-1. В такой плазме нет конверсии и модуляционной неустойчивости, поэтому амплитуды волн $N_e = 1$ и $N_e = 8$

практически постоянны. В отсутствие $N_e = 1$ в районе области захвата $N_e = 8$ стохастических эффектов практически не наблюдаются. При задании $N_e = 1$ в районе сепаратрисы $N_e = 8$ развивается стохастический слой, занимающий заметную часть фазового пространства в области захвата $N_e = 8$ и вне ее (ширина слоя достигает величины $\Delta/V_3^N \sim 1$). В рассматриваемых случаях этот эффект также должен играть существенную роль, хотя и несколько меньшую, т.к. амплитуда волны $N_e = 1$ падает. Роль этого эффекта можно видеть по траекториям (см., например, Рис.24г).

Роль второй гармоники конверсии эквивалентна роли обратной волны в стоячей волне, т.к. фазовые скорости гармоник $N_e + N_i$ и $N_e - N_i$ близки по абсолютной величине. Известно, что в стоячей волне вблизи сепаратрисы прямой и обратной волны образуется стохастический слой [9,10]. Ширина этого слоя растет с ростом амплитуды волны — параметра V_3/V_ϕ [8,9]. В случаях 2-1 и 3-1 этот параметр для обеих основных гармоник конверсии лежит в пределах $V_3^N/V_\phi^N \sim 0,5-0,7$. В работе [8] показано, что при таком V_3^N/V_ϕ^N ширина стохастического слоя невелика.

Таким образом, в случаях 2-1, 3-1 при образовании стохастического слоя гармоник конверсии существенную роль играют модуляция амплитуды основных гармоник конверсии, возмущение полем основной волны $N_e = 1$, возмущение полем высоких гармоник конверсии (сильная стохастическая неустойчивость в районе областей захвата основной и высоких гармоник конверсии).

Анализируя движение на фазовой плоскости пробных частиц из групп 1,2,7 и 3-6,8 можно наблюдать, как происходит пересечение стохастических слоев ионно-звуковой волны и гармоник конверсии. Частицы из групп 1,2 и 7 после выхода из захвата ионно-звуковой волной иногда попадают в захват высокими гармониками или основной гармоникой конверсии и начинают странствовать по их областям захвата. Это можно видеть, например, по траекториям Рис. 8а-г,10б,19а-г,20б,г;21а-в.

Частицы из групп 3 и 4, а также из групп 5,6 и 8 в начальный период захватываются только основной и высокими гармониками конверсии. Переход в стохастический слой ионно-звуковой волны можно наблюдать по частицам, которые переходят из области $V > 0$ (< 0) в область $V < 0$ (> 0). Этот переход происходит в районе узлов сепаратрисы группами по несколько частиц или отдельными частицами. Эти частицы как бы огибают область захвата

ионно-звуковой волны на фазовой плоскости. Такие переходы наблюдаются в случае 2-1 в группе 3 в $t/T_{oe} \approx 6-8$ и $\sim 16-18$; в группе 4 в $t/T_{oe} \approx 8-10$ и $\sim 14-18$. В случае 3-1 переходы наблюдаются в группе 3 в $t/T_{oe} \approx 6-8$ и $\sim 10-14$; в группе 4 в $t/T_{oe} \approx 8-12$. Время перехода показывает, что переход может быть связан как с возмущением полем волны $N_e = 1$ и гармоник конверсии ($t/T_{oe} < 12$ в случае 2-1; $t/T_{oe} < 8$ в случае 3-1), так и с эффектами ионной нелинейности (см. выше). Первый вариант ($t/T_{oe} < 8-12$) можно видеть по траекториям Рис.13а,в;23в,30а, второй вариант ($t/T_{oe} > 8-12$ в случаях 3-1 и 2-1) — по траекториям Рис. 13в,15а,б;23а,27а,28а,в;29в. Следует отметить, что траектории частиц в области перехода во втором варианте имеют вид скачка скорости. Такой вид траектории характерен для перехода, обусловленного ионной нелинейностью (двойным электрическим слоем), как было показано в работе [1] для случаев 1-0 и 1-1.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Взаимодействие ленгмюровской волны с ионно-звуковой. Стохастические эффекты. I". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 88-139.
2. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Неустойчивость ленгмюровских волн в неоднородной плазме. IV". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 82-53, 1982.
3. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Ленгмюровские волны большой амплитуды. Стохастическая неустойчивость. I,II". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 84-149; № 84-150, 1984; Phys. Lett. 112A, 330, 1985; Proc. XVII ICPIG, v.1, p.73, Budapest, 1985;;
"Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой", стр.221, Ташкент, 1985; Proc.Conf. on Plasma Physics, v.2, p.132, Kiev, 1987.
4. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Ионно-звуковые волны большой амплитуды". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 82-51, 1982; УИ конф. по физике низкотемпературной плазмы, т.1, стр.268, Ленинград, 1983; Proc. XVI ICPIG, v.5, p.738, Dusseldorf, 1983.
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. "Ионные волны большой амплитуды I,II". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 83-88, № 83-89, 1983; Proc. Conf. on Plasma Physics, v.1, p.37,38, Lausanne, 1984.
"Стоячие ленгмюровские волны большой амплитуды. Развитие ионного возмущения". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 84-80, 1984.
8. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Ленгмюровские волны большой амплитуды. Электронная нелинейность и стохастические эффекты. I,II,III". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 86-153, № 86-154, № 86-155, 1986; Proc. Conf. on Plasma Physics, v.2,

- p. 128, Kiev, 1987; Proc. XVIII ICPIG, v.2, p.284, Swansea, 1987;
- УИ конф. по физике низкотемпературной плазмы, т.1, стр.215, Ташкент, 1987.
9. G.Schmidt, Comments Plasma Phys. 7, 87, 1982.
10. D.F.Escande. Phys. Reports 121, 165, 1985.

Подписи к рисункам:

Рис.1. Зависимость от времени энергии электрического поля W_E и энергии электронов $\Delta W_e = W_e - W_e^0$ (W_e^0 - тепловая энергия электронов, W_E^0 - начальная энергия поля ленгмюровской волны).

а. Случай 2-I; б. Случай 3-I.

Рис.2. Зависимость от времени верхней ($V_{\phi}^N + V_{\gamma}^N$) и нижней ($V_{\phi}^N - V_{\gamma}^N$) границы захвата основной волны $N_e = 1$ ионно-звуковой волны $N_i = 5$ или $N_i = 7$, основных гармоник конверсии и модуляционной неустойчивости.

а. Случай 2-I; б. Случай 3-I.

Риски - фазовые скорости высоких ($\beta = 2, 3, \dots$) гармоник конверсии; стрелки - границы стохастических слоев.

Рис.3. Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности $\tilde{n}(x)$ в разные моменты времени.

а, б. Случай 2-I; в, г. Случай 3-I.

Рис.4. Фазовые плоскости электронов (а) и ионов (б) в разные моменты времени. Случай 2-I.

Рис.5. Фазовые плоскости электронов (а) и ионов (б) в разные моменты времени. Случай 3-I.

Рис.6. Функция распределения электронов по скоростям $f(v)/f_0(0)$ в логарифмическом и линейном масштабе, $f(v)/f_0$ в линейном масштабе.

а. Случай 2-I, $t/T_{oe} \sim 28$; б. Случай 3-I, $t/T_{oe} \sim 28$.

Пунктир - начальная функция распределения $f_0(v)$.

Рис.7-3I. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости.

Рис.7-I7. Случай 2-I.

Рис.18-3I. Случай 3-I.

Цифры на траектории - моменты времени, когда частица имеет данные x и v .

Рис.32. Функции распределения пробных частиц по скоростям.

а. Случай 2-I, группа 7, $t/T_{oe} \sim 28$.

б. Случай 2-I, группа 1, $t/T_{oe} \sim 28$.

в. Случай 3-I, группа 7, $t/T_{oe} \sim 30$.

г. Случай 3-I, группа 1, $t/T_{oe} \sim 28$.

Пунктир - начальная функция распределения.

Рис.33. Область захвата ионно-звуковой волны, половины области захвата гармоник конверсии $N_e + N_i$ и $N_e - N_i$ в $t = t_{max}$ и $t/T_{oe} \sim 30$ (пунктир) и границы стохастических слоев (стрелки).

а. Случай 2-I; б. Случай 3-I.

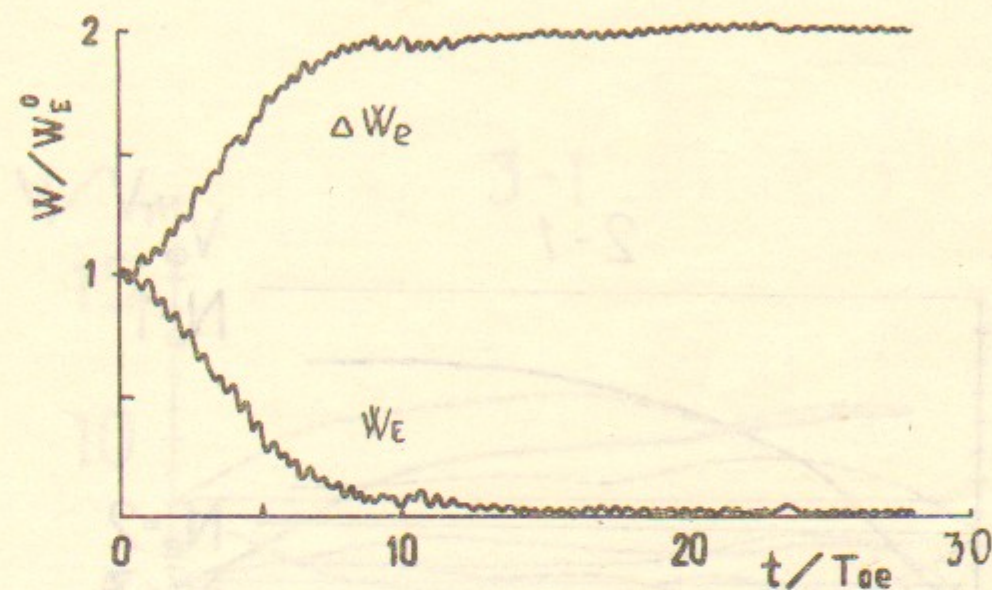


Рис. 1а. Случай 2-I.

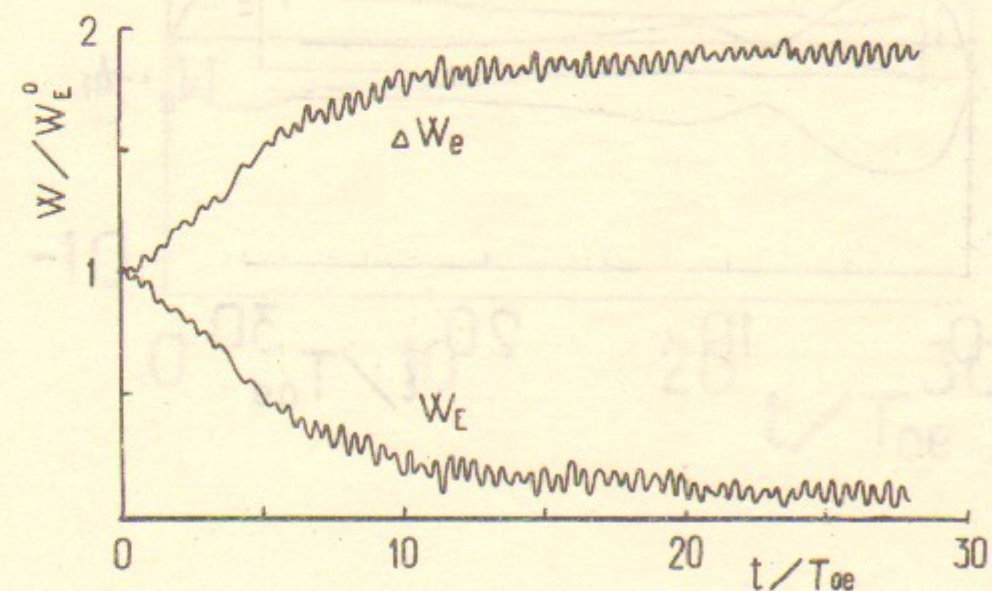


Рис. 1б. Случай 3-I.

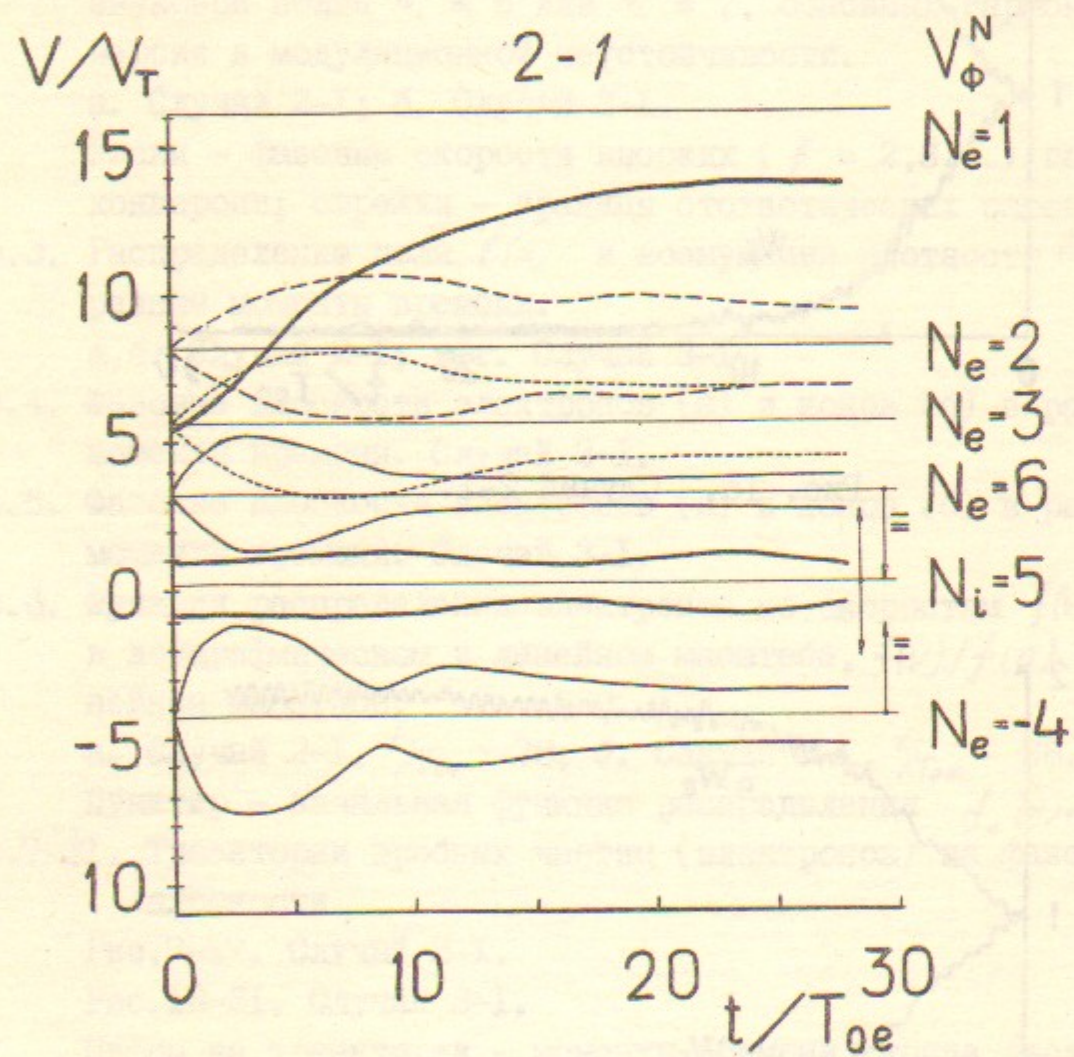


Рис. 2а. Случай 2-1.

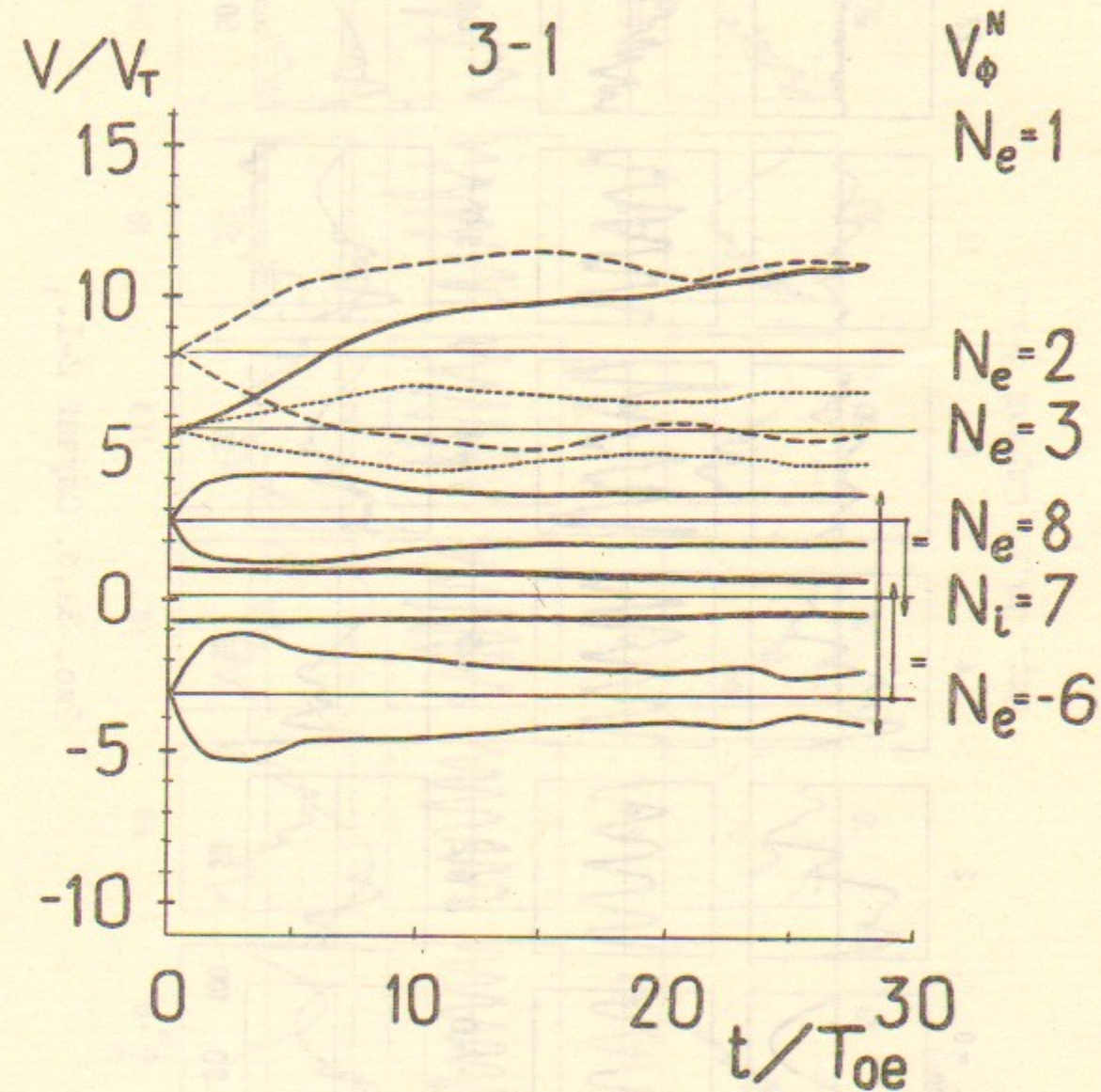


Рис. 2б. Случай 3-1.

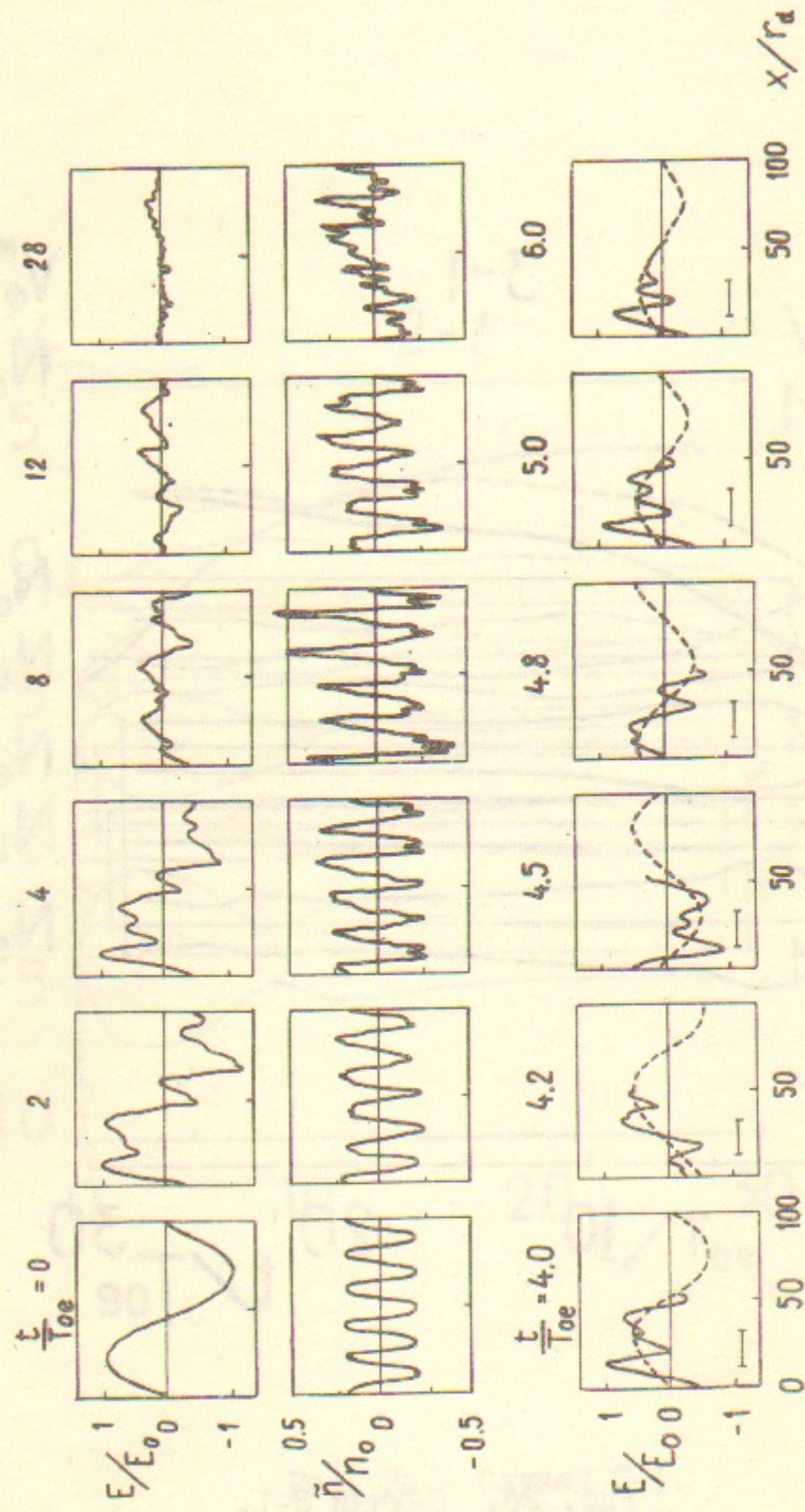


Рис. За,б. Случай 2-I.

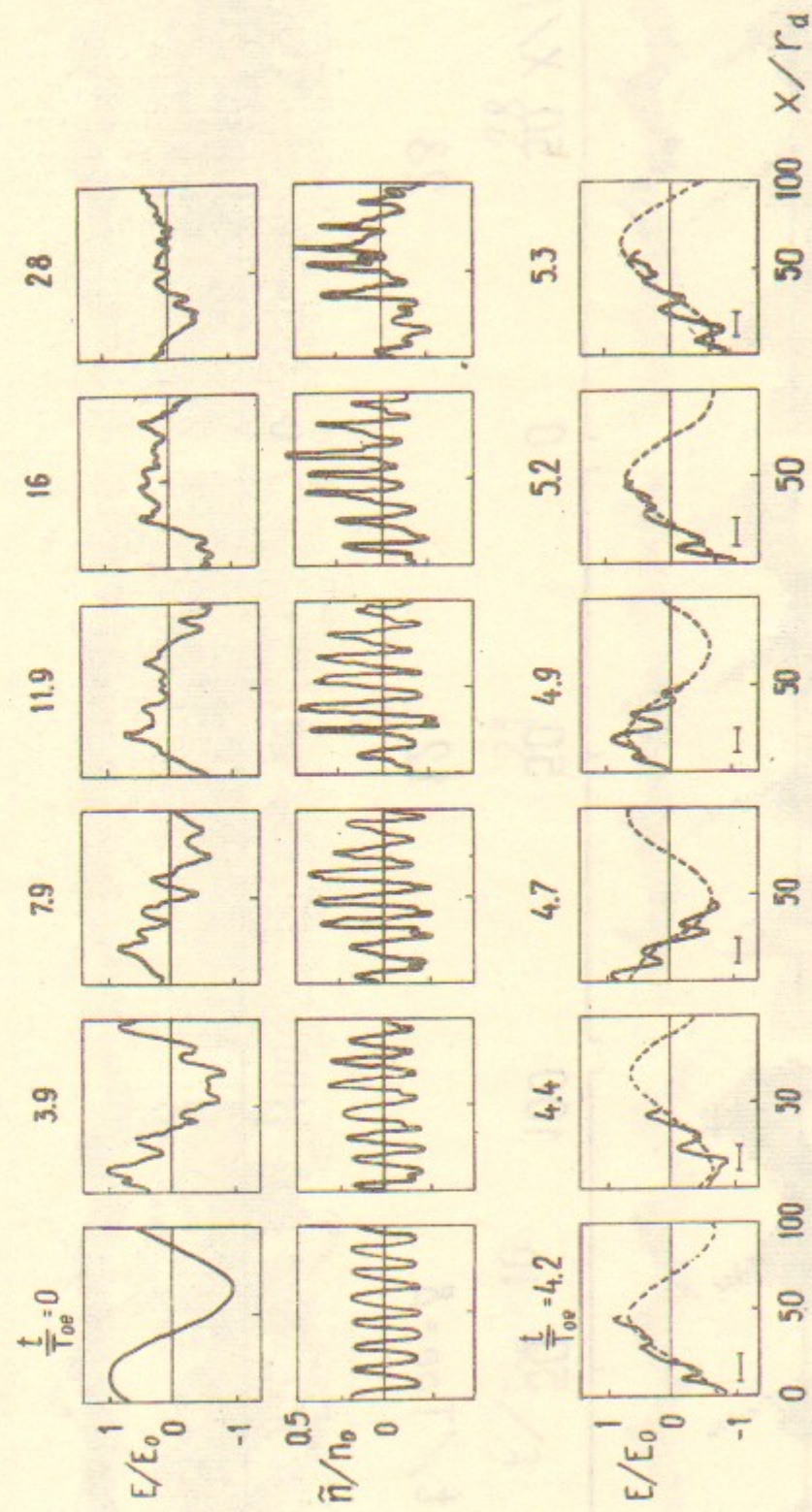


Рис. Зв,г. Случай 3-I.

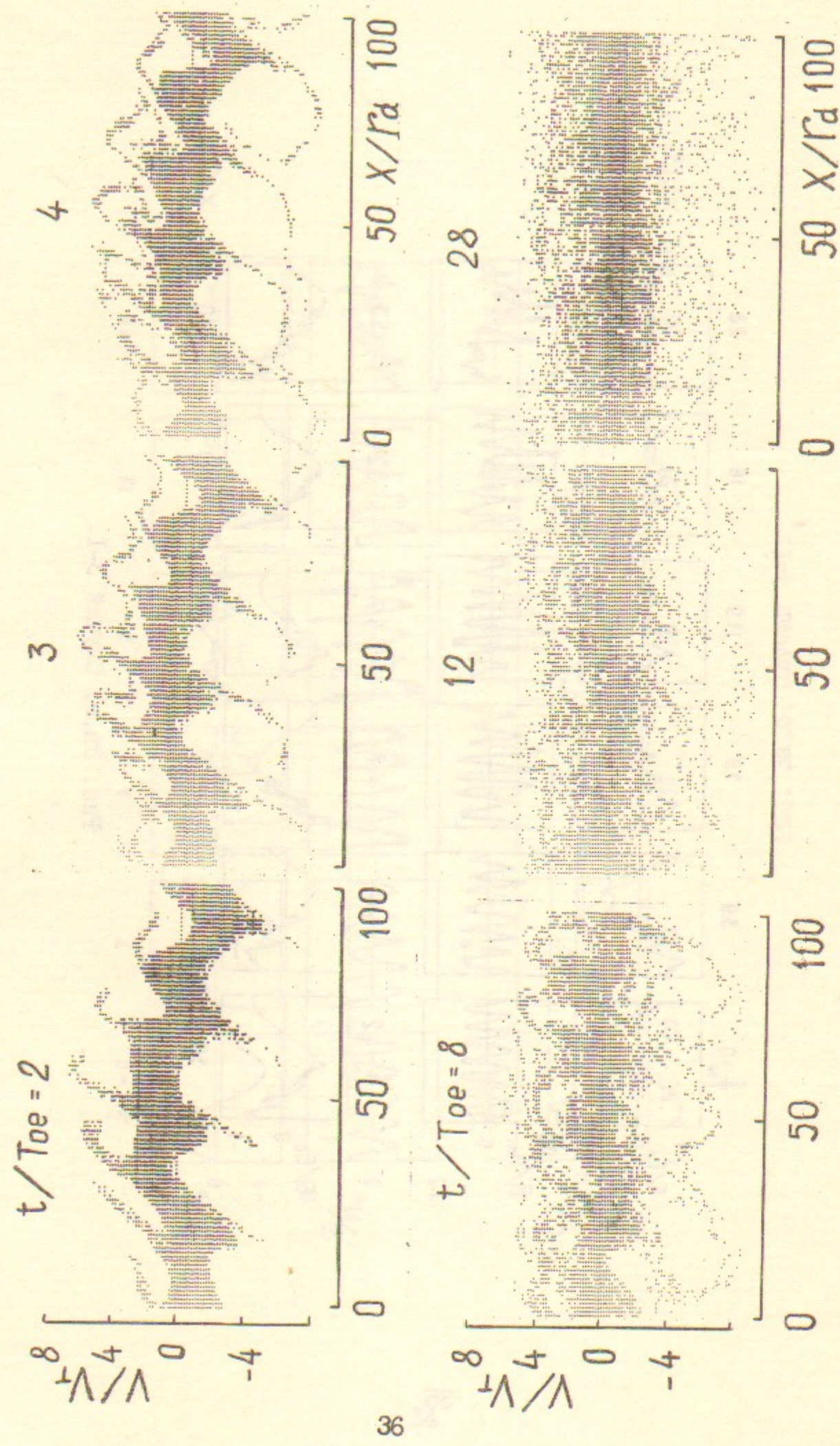


Рис. 4а. Случай 2-Г.

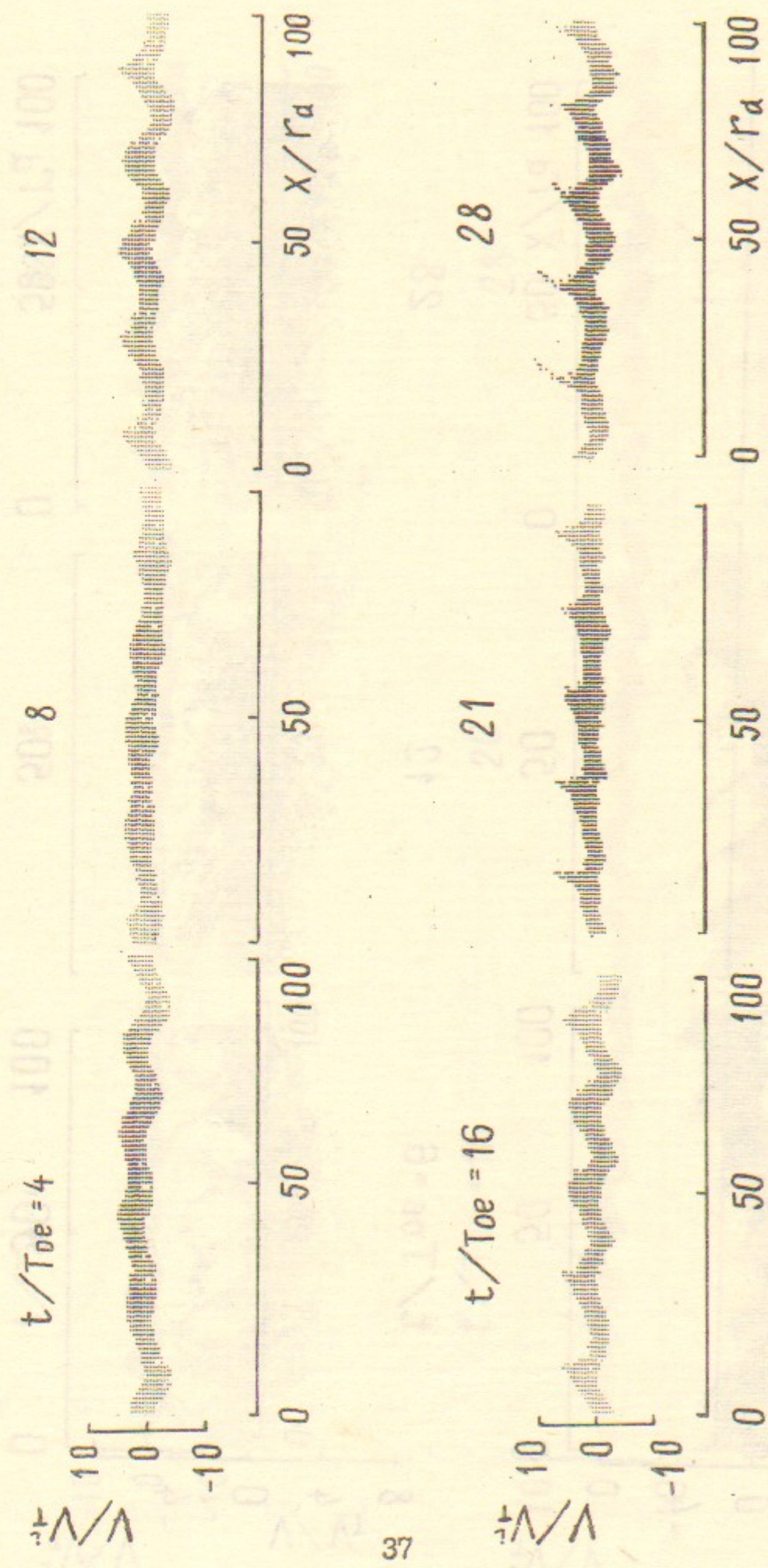


Рис. 4б. Случай 2-Г.

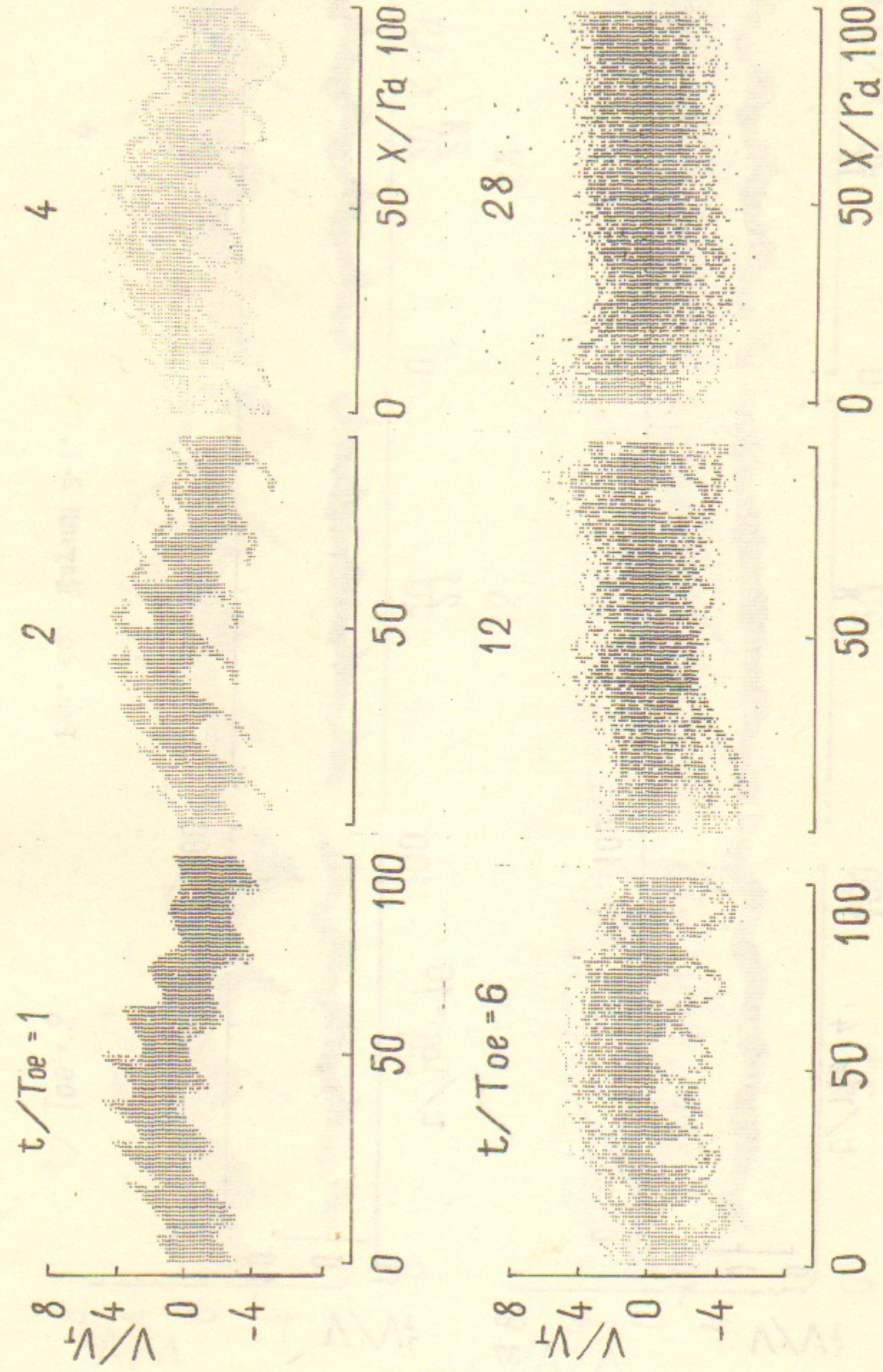


Рис. 5а. Случай 3-1.

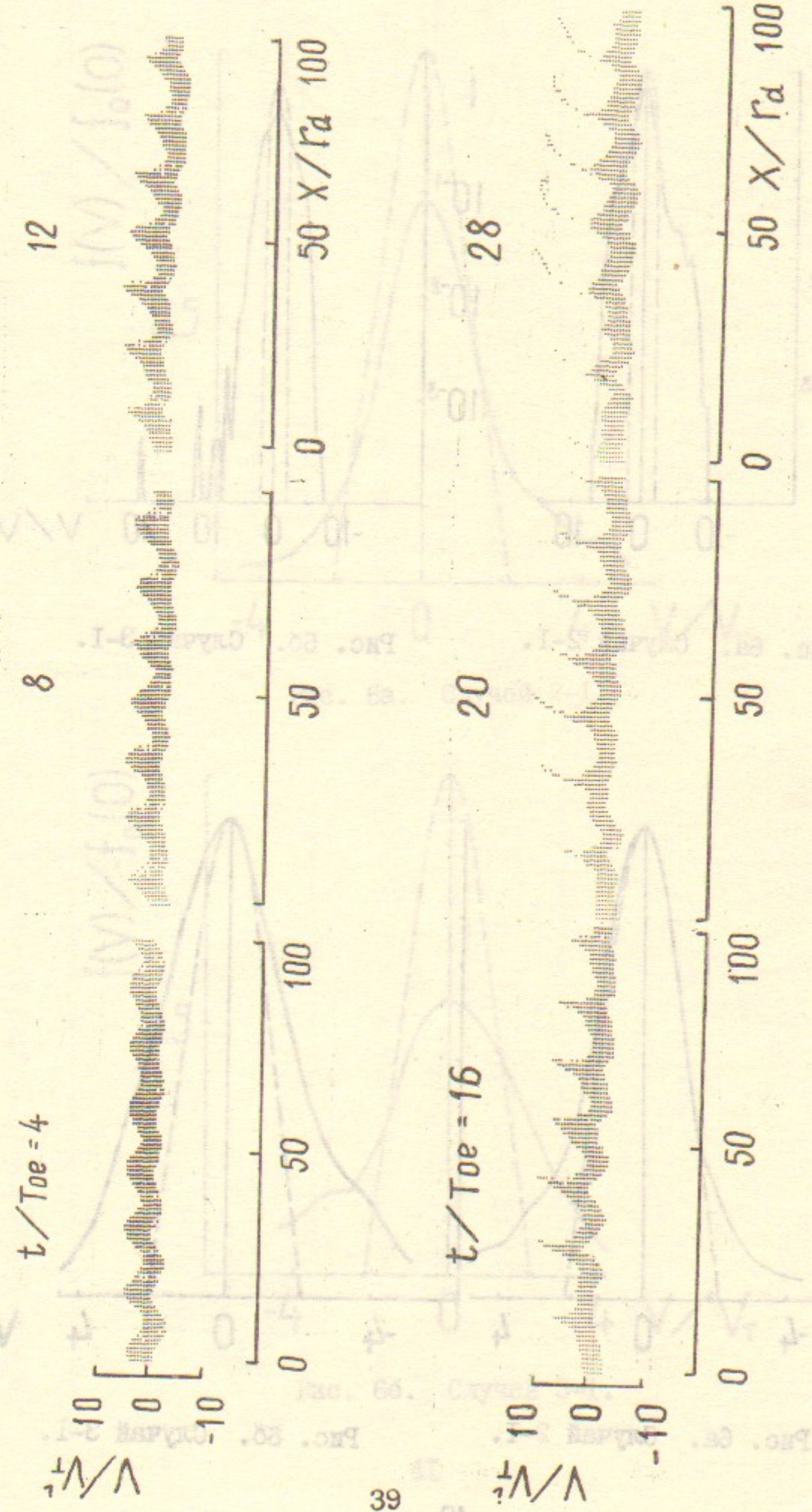


Рис. 5б. Случай 3-1.

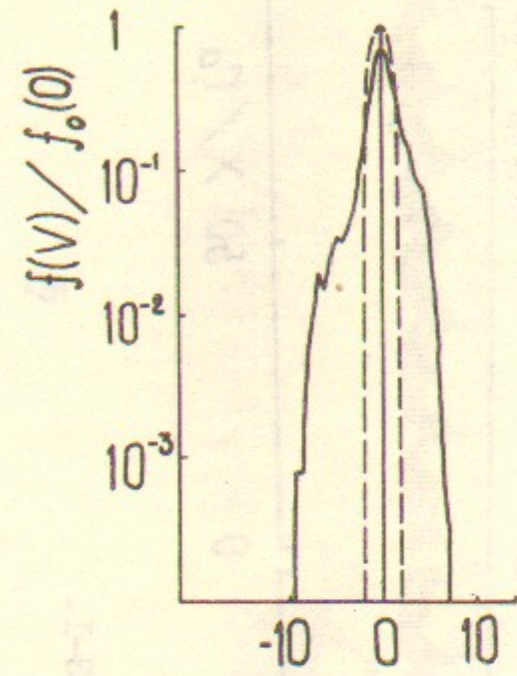


Рис. 6а. Случай 2-І.

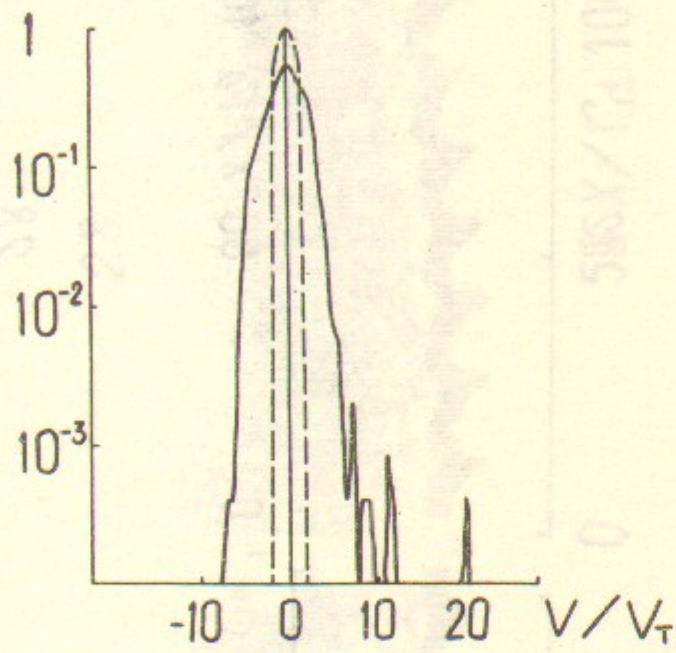


Рис. 6б. Случай 3-І.

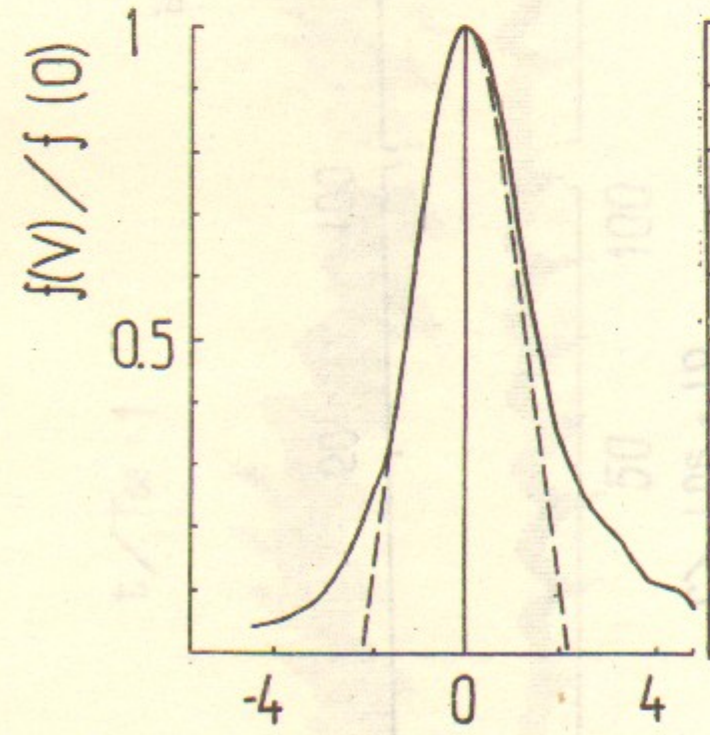


Рис. 6а. Случай 2-І.

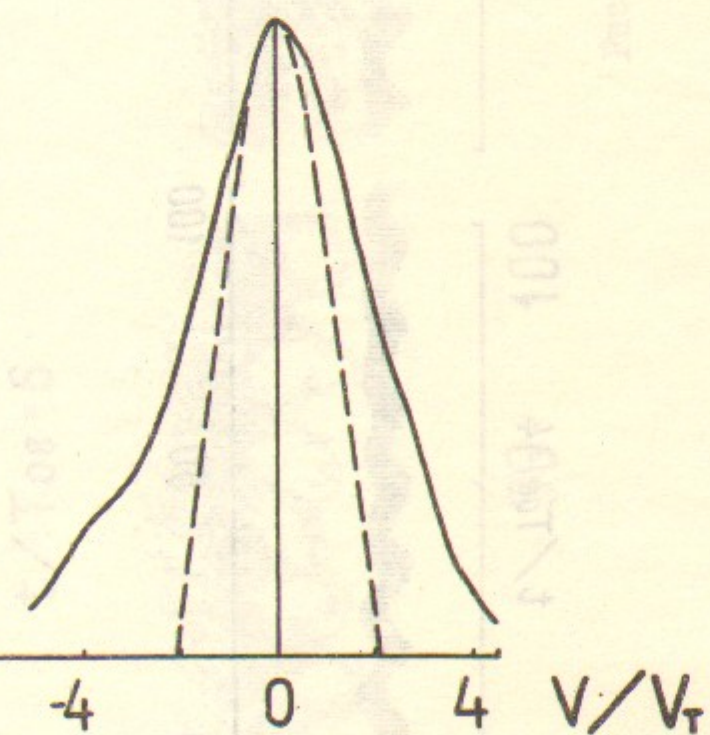


Рис. 6б. Случай 3-І.

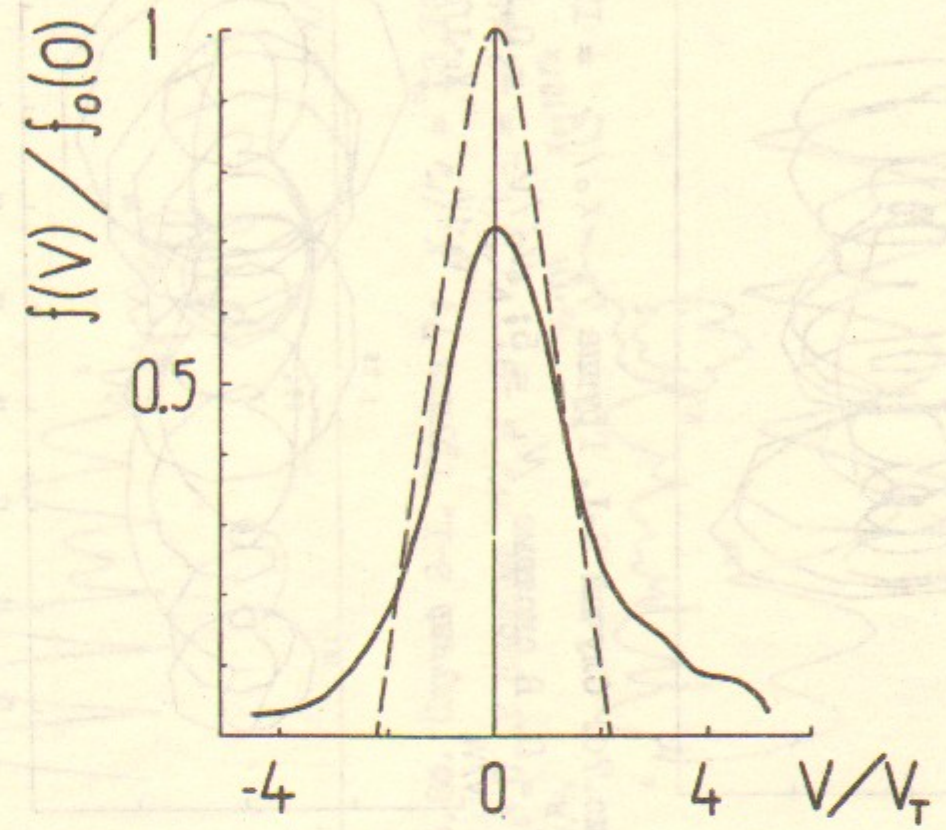


Рис. 6а. Случай 2-І.

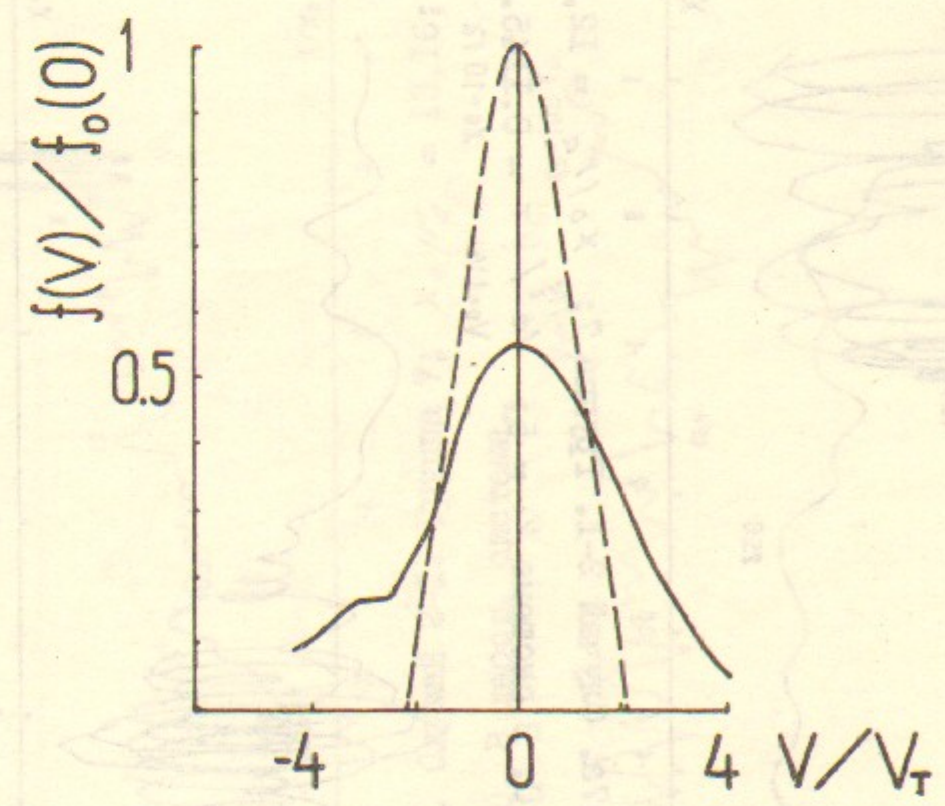


Рис. 6б. Случай 3-І.

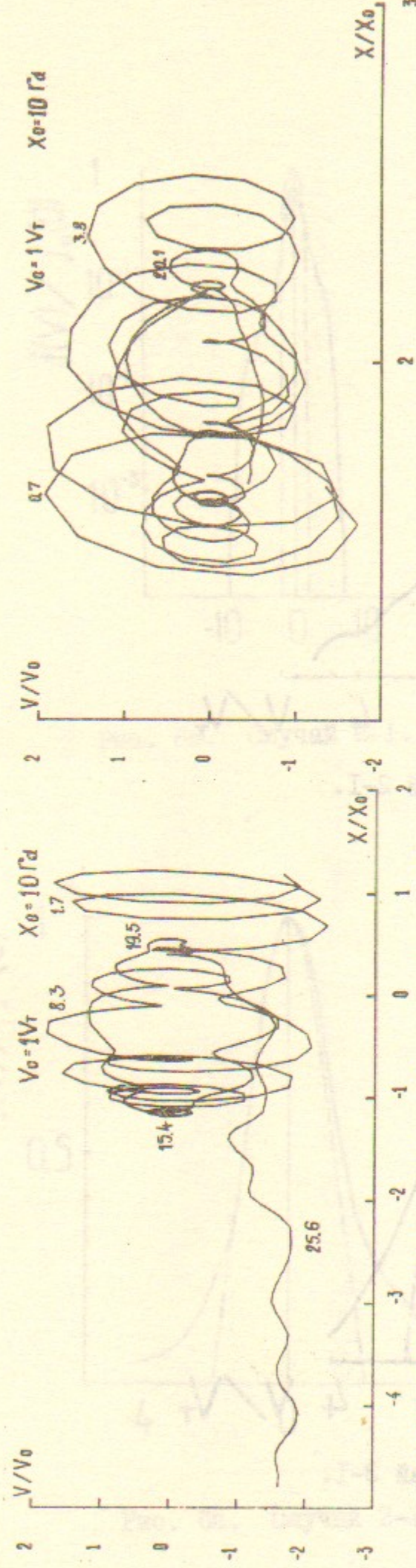


Рис. 7а. Случай 2-1. Груша 7; $X_0/r_d = 12,8$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

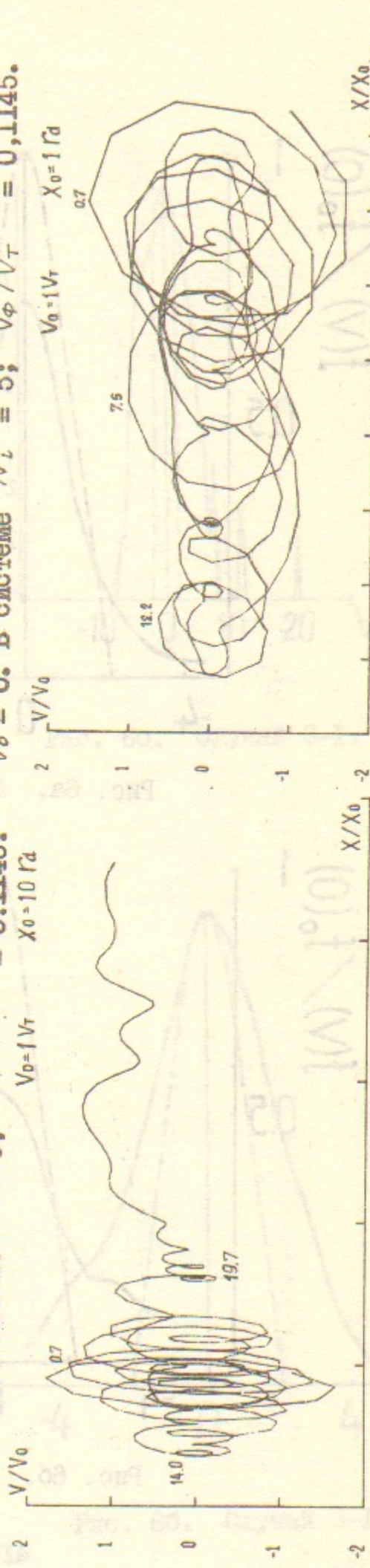


Рис. 7в. Случай 2-1. Груша 7; $X_0/r_d = 20$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

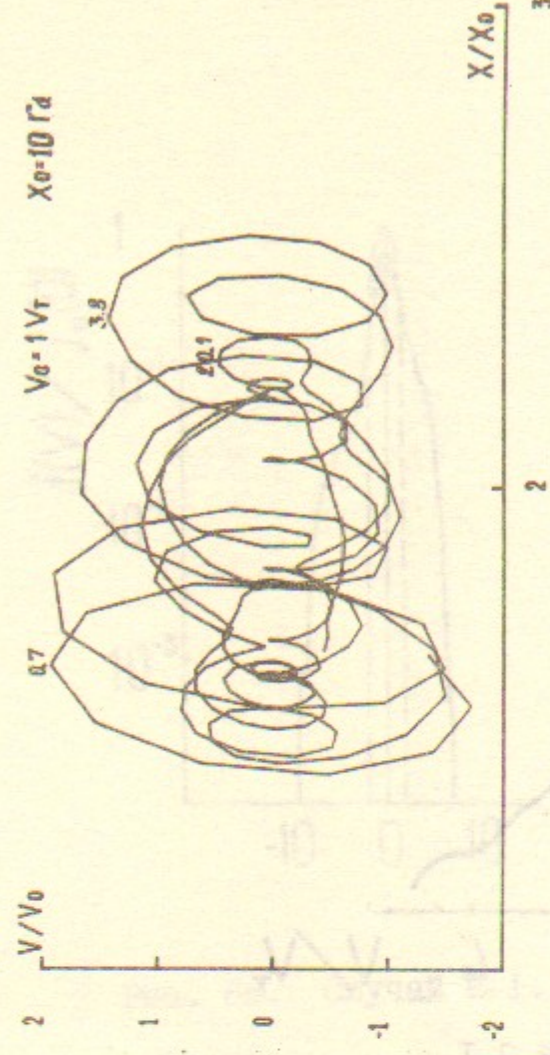


Рис. 7б. Случай 2-1. Груша 7; $X_0/r_d = 17,3$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

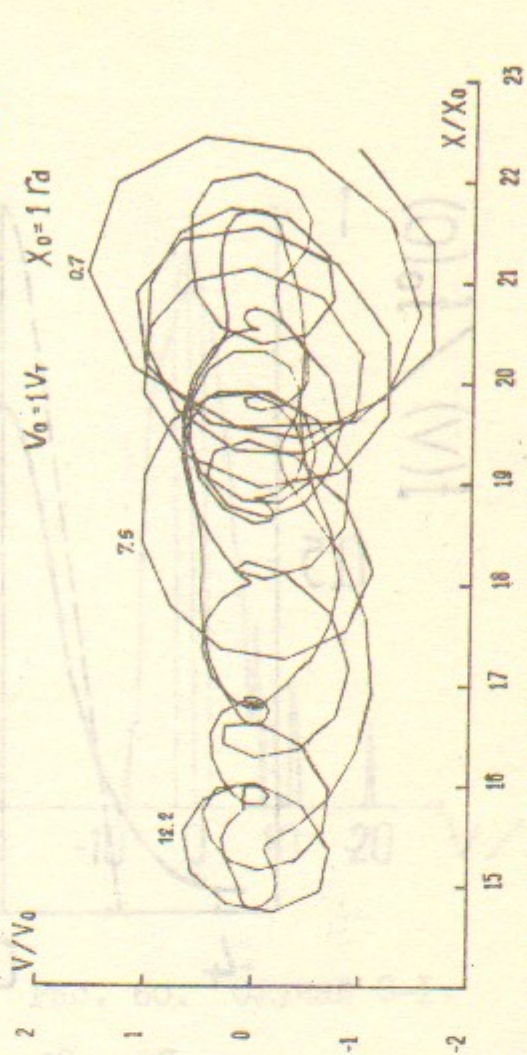


Рис. 7г. Случай 2-1. Груша 7; $X_0/r_d = 22,7$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

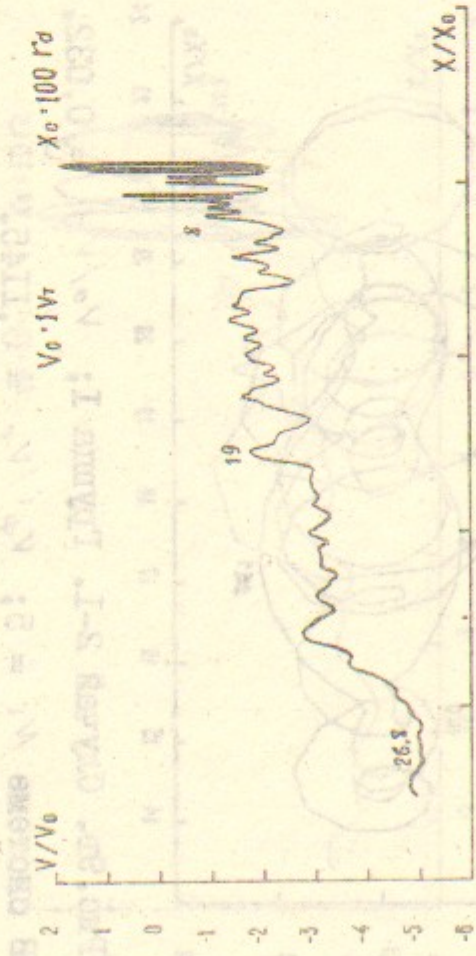


Рис. 8а. Случай 2-1. Груша 7; $X_0/r_d = 13,16$; $V_0^0 = 0$. В лабор. системе.

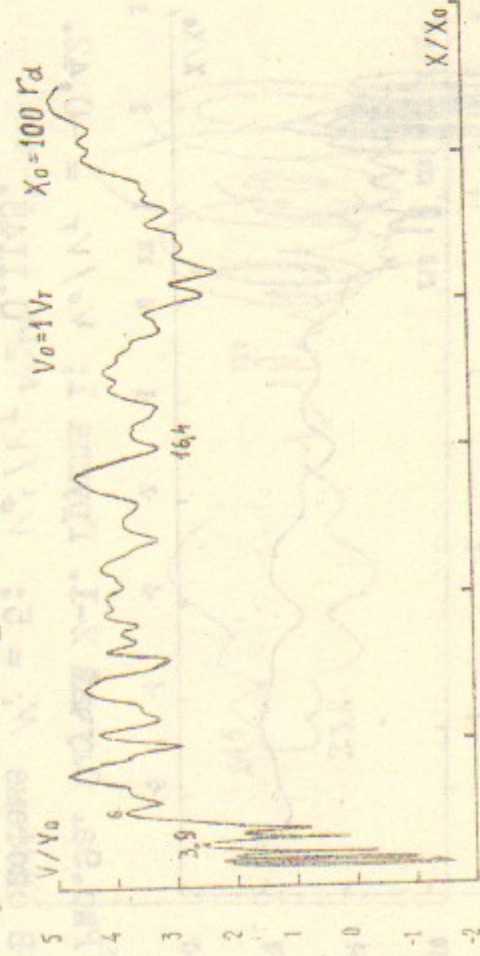


Рис. 8в. Случай 2-1. Груша 7; $X_0/r_d = 15,86$; $V_0^0 = 0$. В лабор. системе.

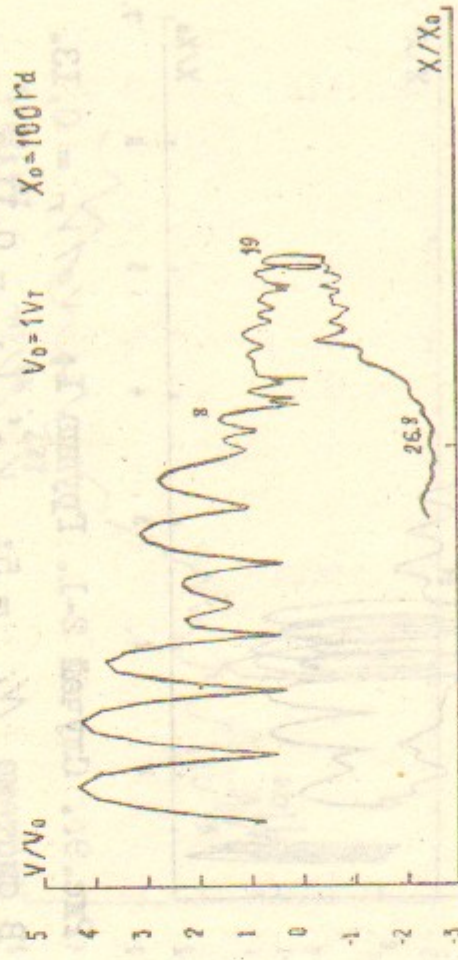


Рис. 8б. Случай 2-1. Груша 7; $X_0/r_d = 13,16$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_e = -9$; $V_{\phi^N}/V_T = -2,482$.

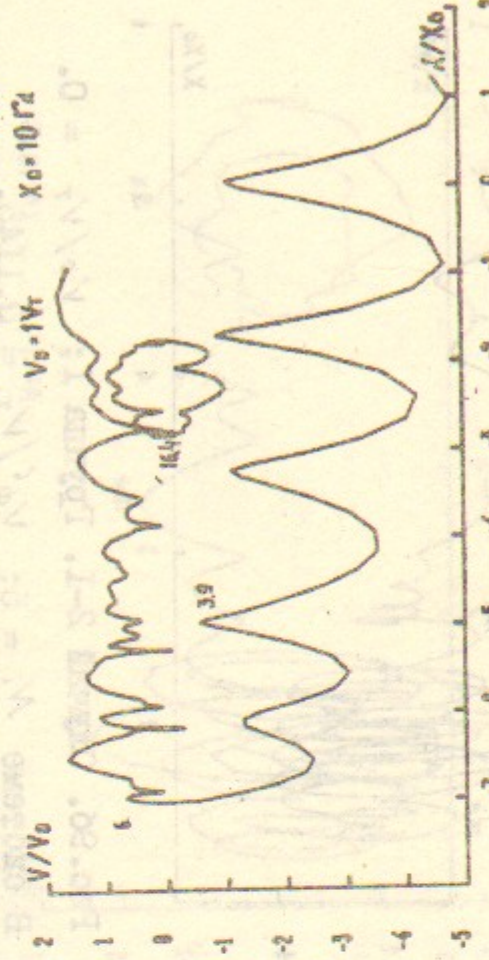


Рис. 8г. Случай 2-1. Груша 7; $X_0/r_d = 15,86$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_e = 6$; $V_{\phi^N}/V_T = 3,18$.

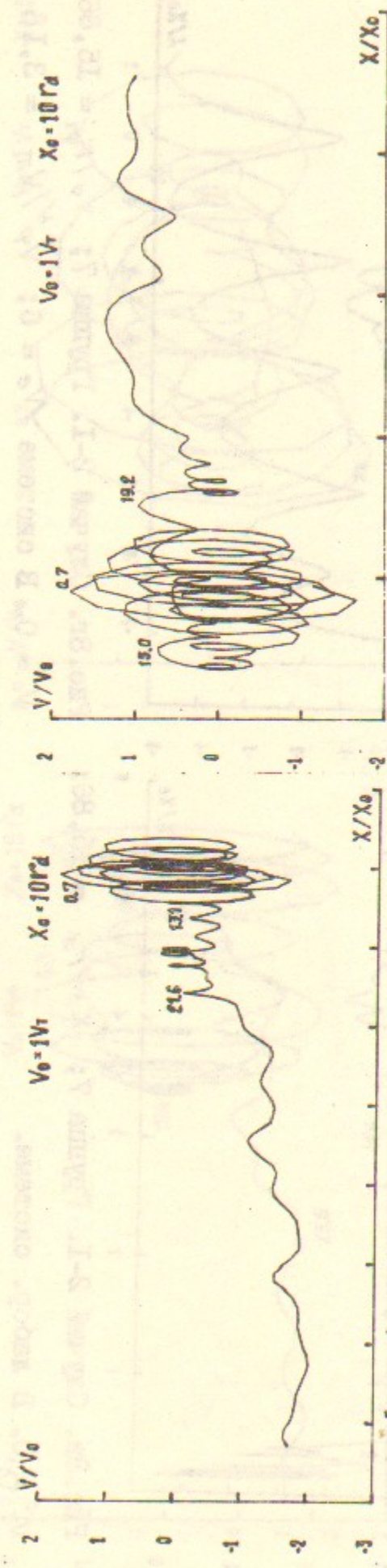


Рис.9а. Случай 2-1. Группа 1; $V_0/V_T = -0,42$.
В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

Рис.9б. Случай 2-1. Группа 1; $V_0/V_T = 0$.
В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

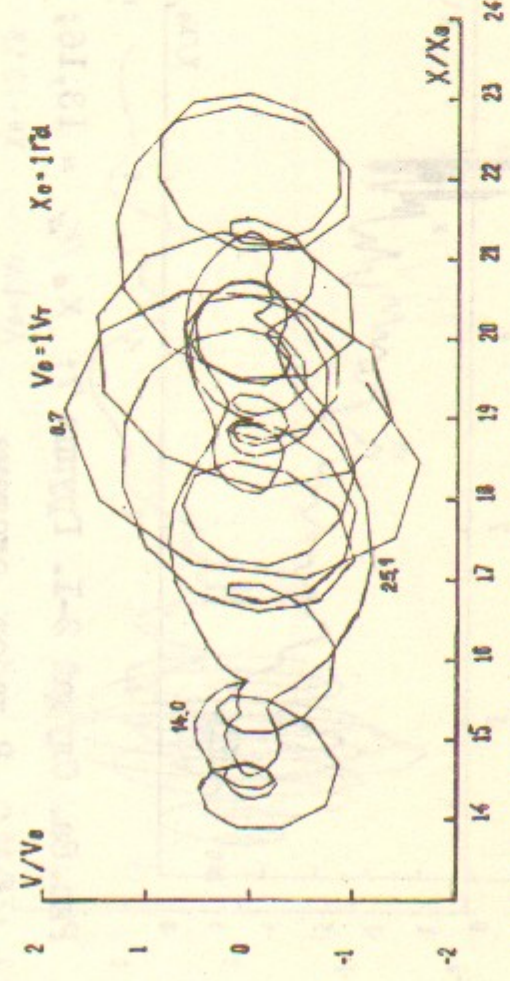


Рис.9в. Случай 2-1. Группа 1; $V_0/V_T = 0,032$.
В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

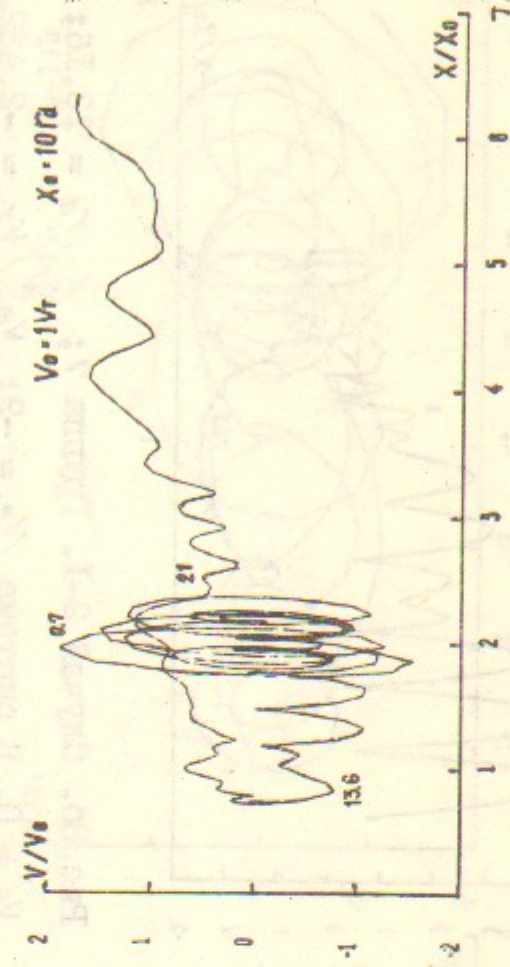


Рис.9г. Случай 2-1. Группа 1; $V_0/V_T = 0,13$.
В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

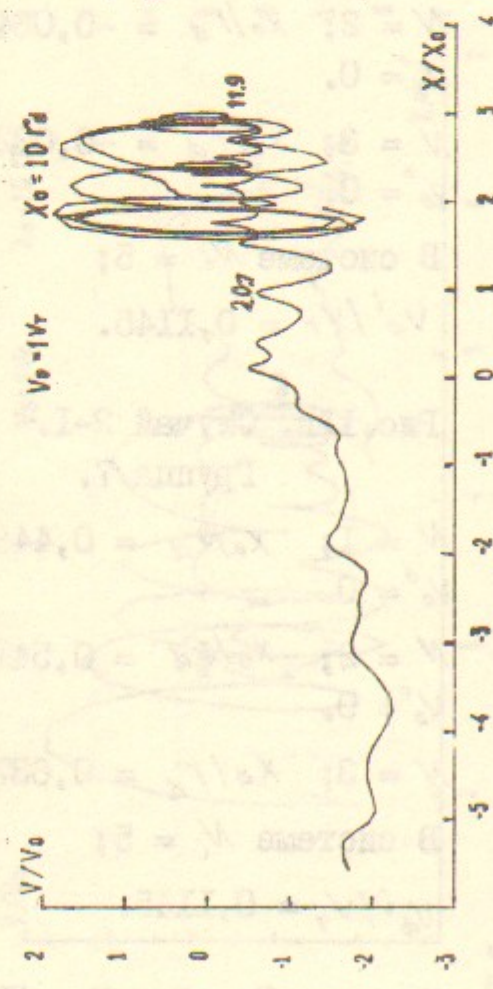


Рис.10а. Случай 2-1. Группа 2; $V_0/V_T = -0,37$.
В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

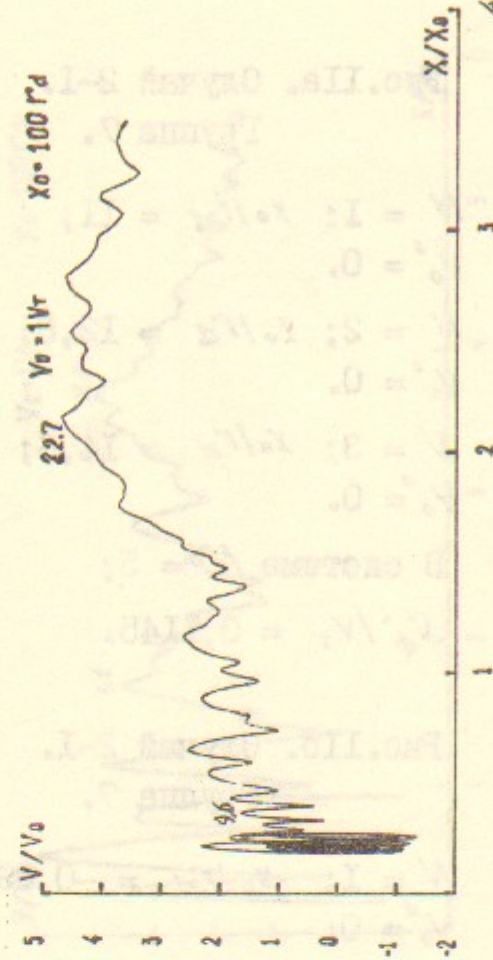


Рис.10б. Случай 2-1. Группа 2; $V_0/V_T = 0,46$.
В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

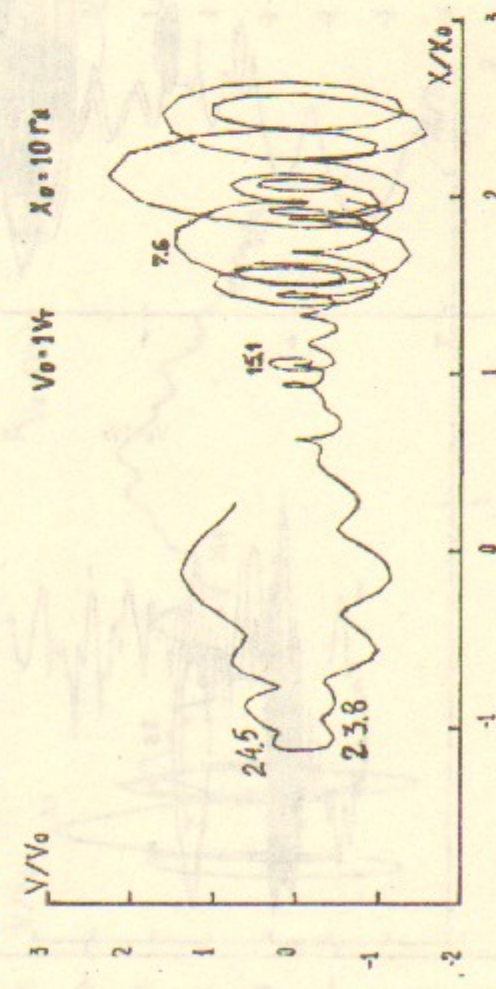


Рис.10в. Случай 2-1. Группа 2; $V_0/V_T = 0,54$.
В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

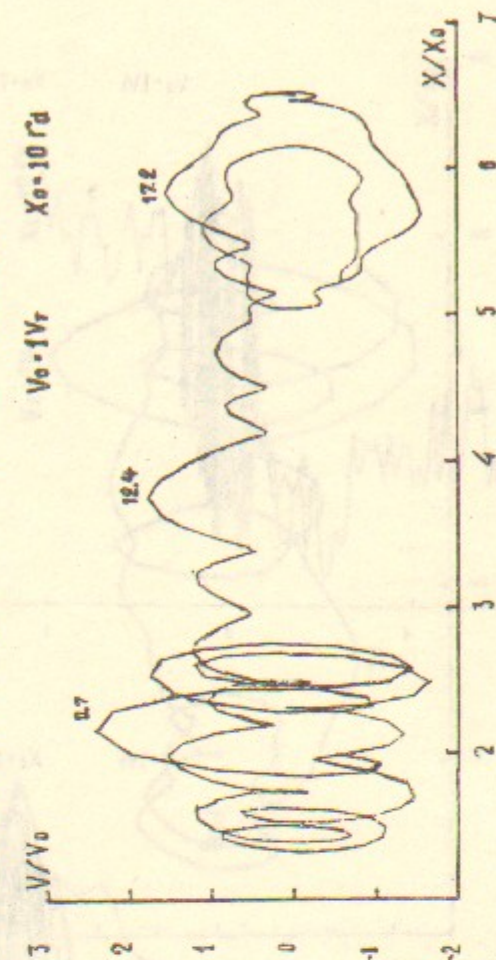


Рис.10г. Случай 2-1. Группа 2; $V_0/V_T = 0,64$.
В системе $N_i = 5$; $V_{\phi^i}/V_T = 0,1145$.

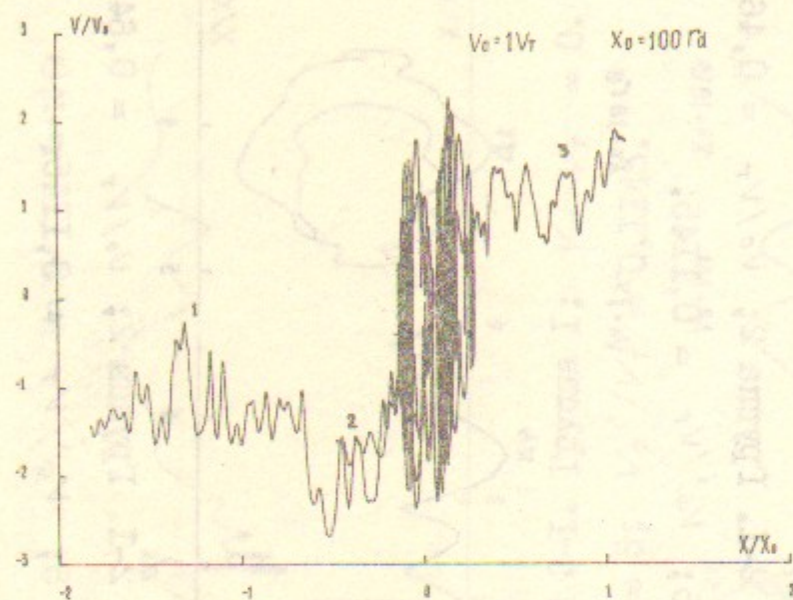


Рис.11а. Случай 2-1.
Группа 7.

$N = 1; x_0/r_d = 11;$
 $V_0^o = 0.$
 $N = 2; x_0/r_d = 12,8;$
 $V_0^o = 0.$
 $N = 3; x_0/r_d = 14,6;$
 $V_0^o = 0.$

В системе $N_i = 5;$
 $V_{\phi}^i/V_T = 0,1145.$

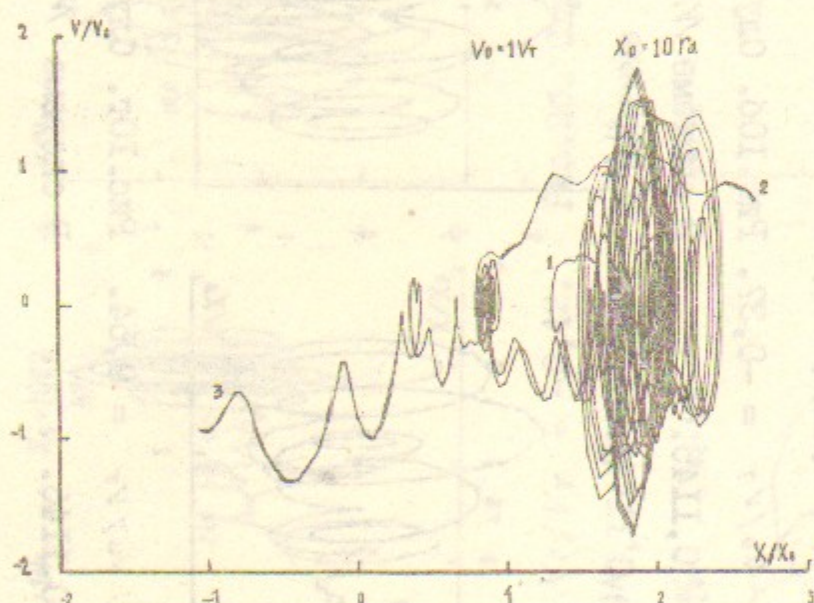


Рис.11б. Случай 2-1.
Группа 7.

$N = 1; x_0/r_d = -0,095;$
 $V_0^o = 0.$
 $N = 2; x_0/r_d = -0,064;$
 $V_0^o = 0.$
 $N = 3; x_0/r_d = -0,032;$
 $V_0^o = 0.$

В системе $N_i = 5;$
 $V_{\phi}^i/V_T = 0,1145.$

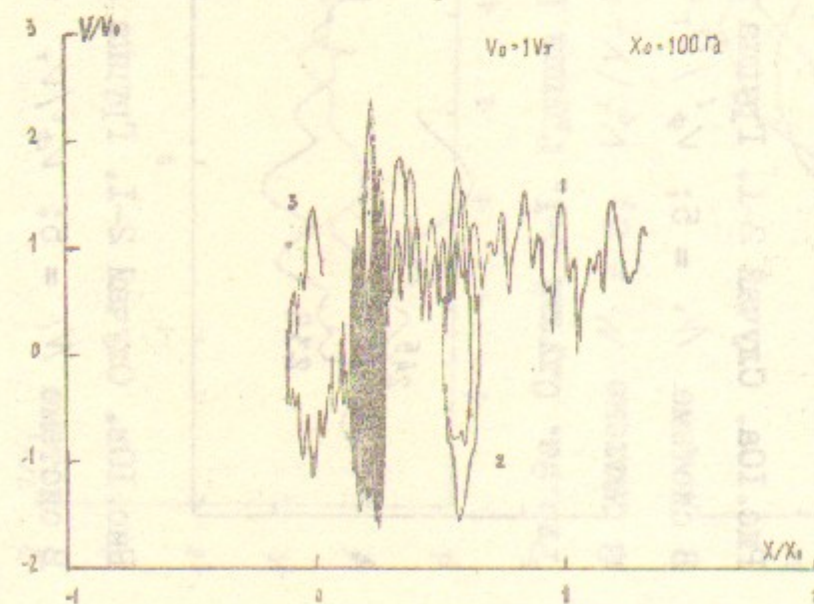


Рис.11в. Случай 2-1.
Группа 7.

$N = 1; x_0/r_d = 0,446;$
 $V_0^o = 0.$
 $N = 2; x_0/r_d = 0,541;$
 $V_0^o = 0.$
 $N = 3; x_0/r_d = 0,637;$

В системе $N_i = 5;$
 $V_{\phi}^i/V_T = 0,1145.$

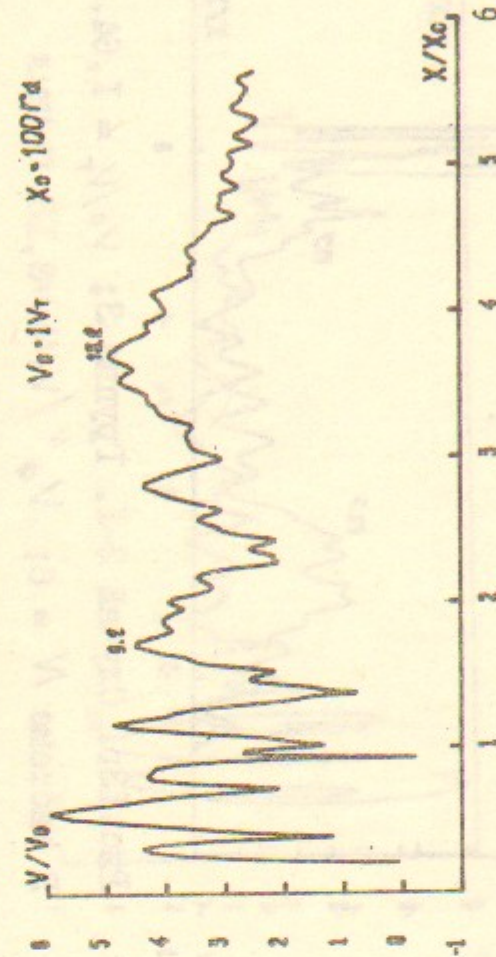


Рис.12а. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,74.$
 В системе $N_i = 5; V_{\phi}^i/V_T = 0,1145.$

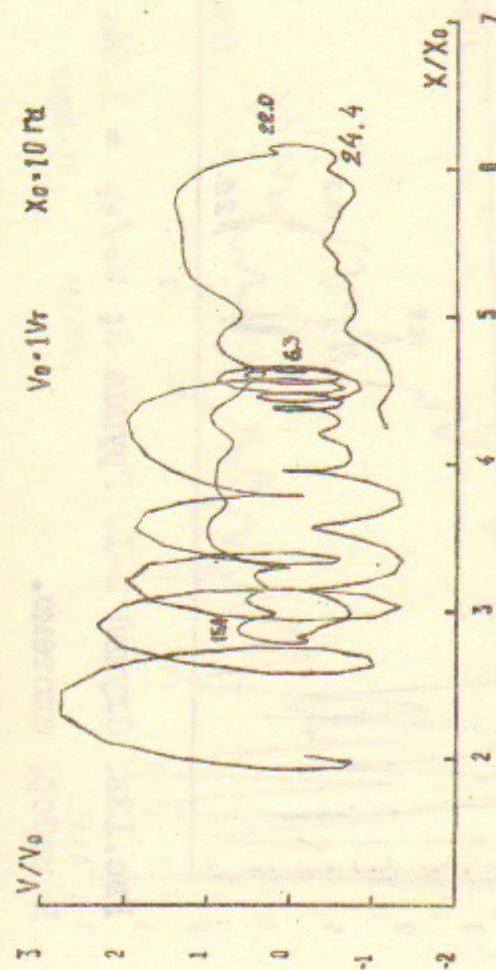


Рис.12б. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 0,98.$
 В системе $N_i = 5; V_{\phi}^i/V_T = 0,1145.$

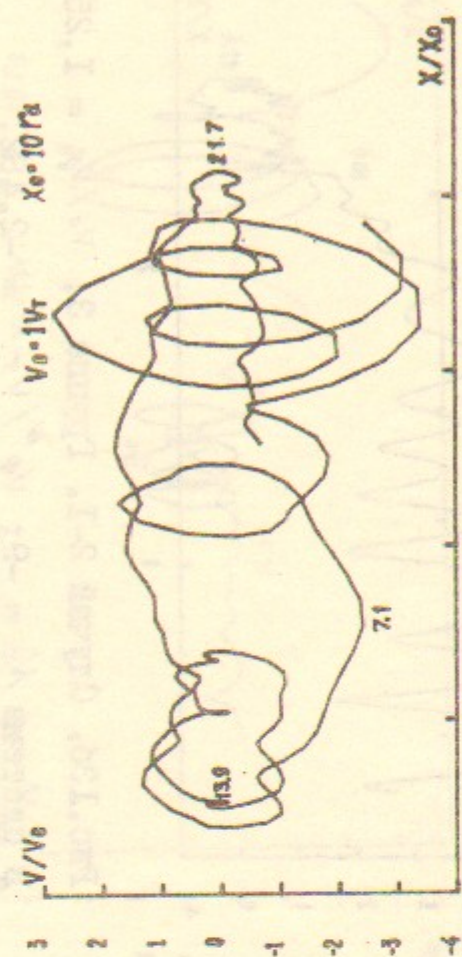


Рис.12г. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,74.$
 В системе $N_e = 11; V_{\phi}^N/V_T = 2,26.$

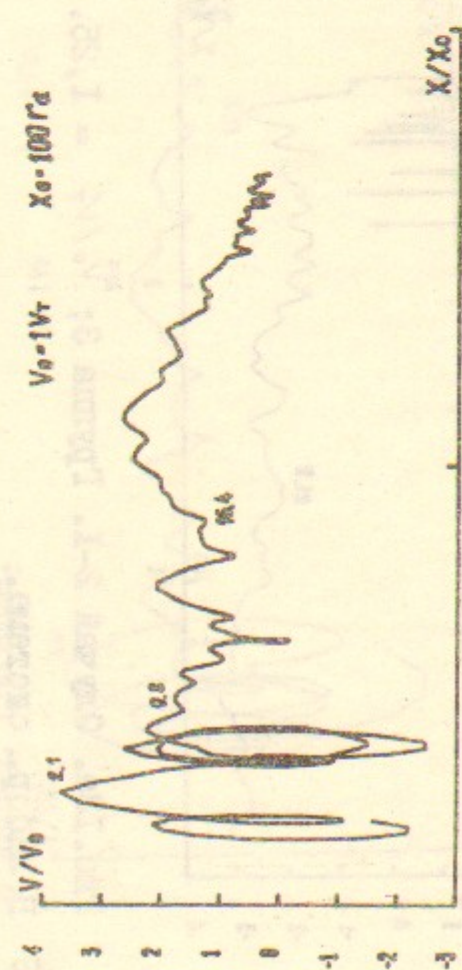


Рис.12з. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,74.$
 В системе $N_e = 11; V_{\phi}^N/V_T = 2,26.$

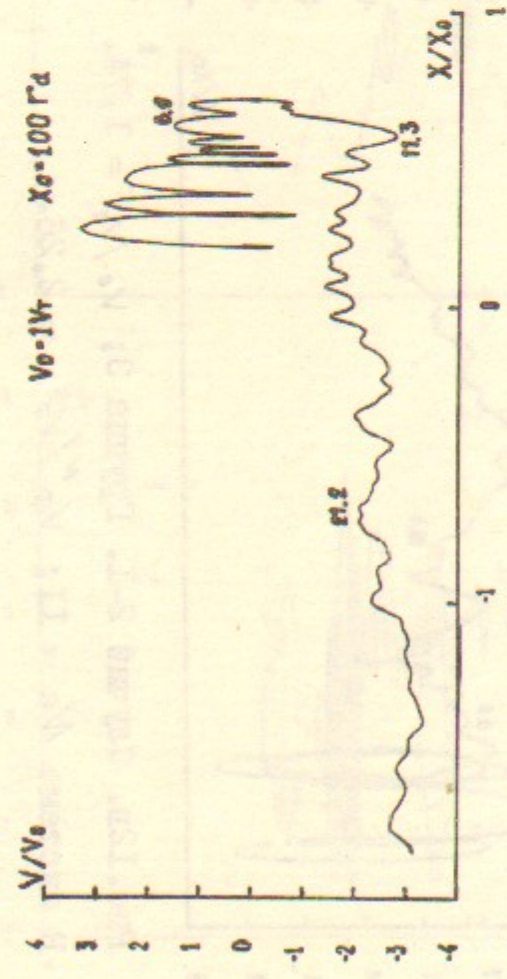


Рис.13а. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,25$.

В лабор. системе.

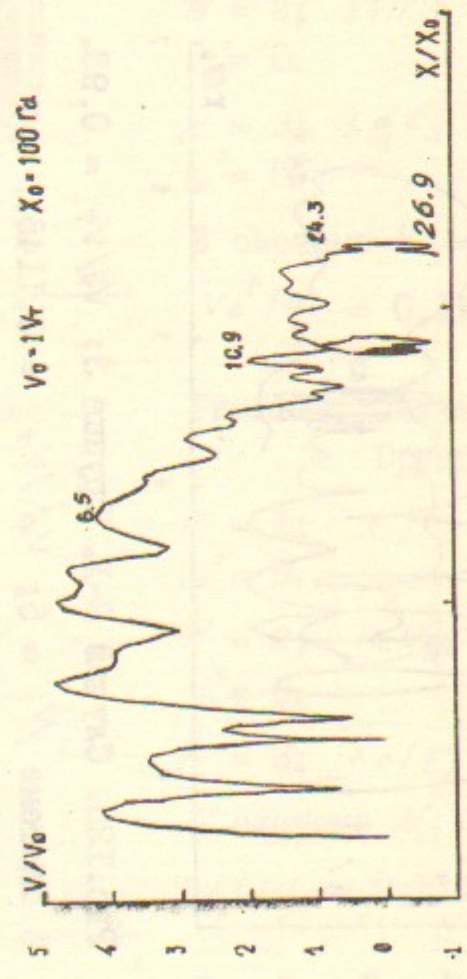


Рис.13в. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,64$.

В лабор. системе.

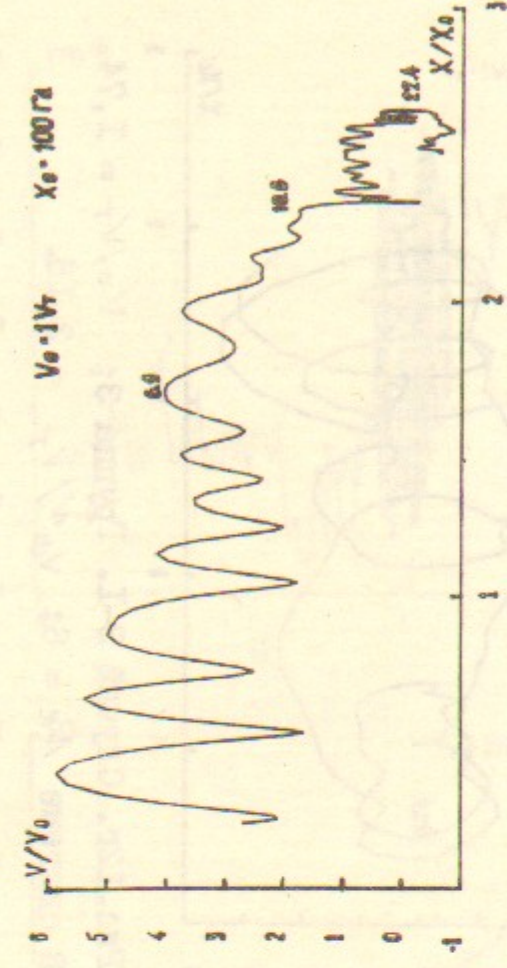


Рис.13б. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,25$.

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

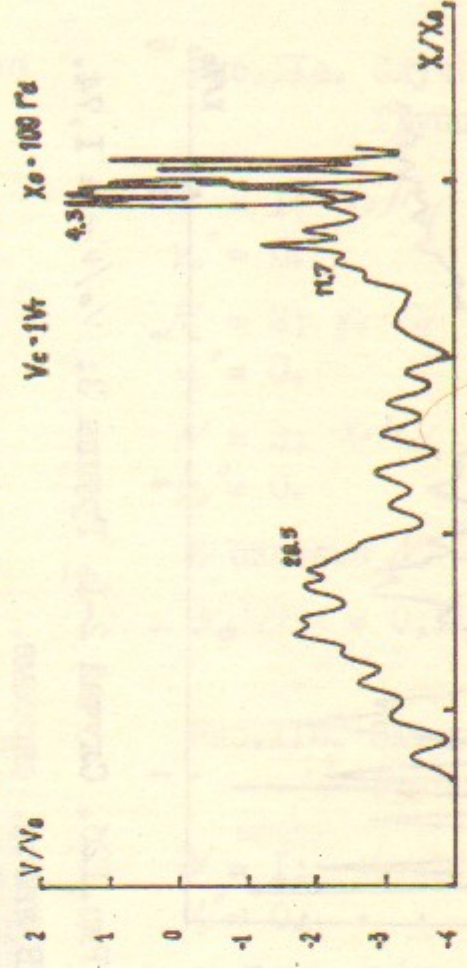


Рис.13г. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,64$.

В системе $N = 6$; $V_{\phi}^N/V_T = 3,18$.

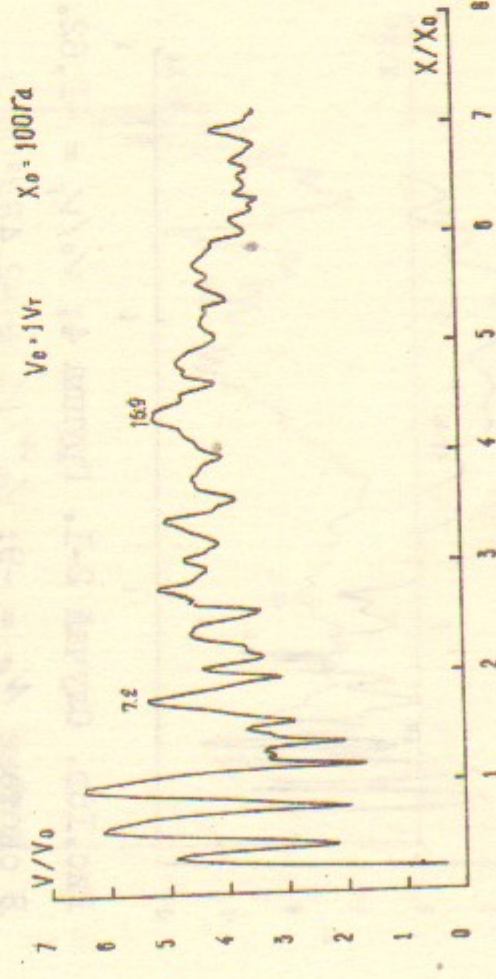


Рис.14а. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 2,01$.

В лабор. системе.

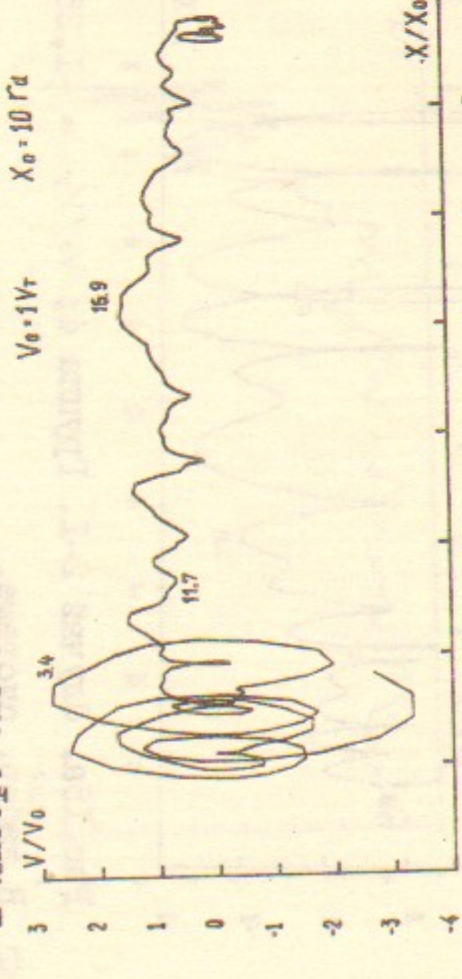


Рис.14в. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 2,01$.

В системе $N_e = 5$; $V_{\phi}^N/V_T = 3,64$.

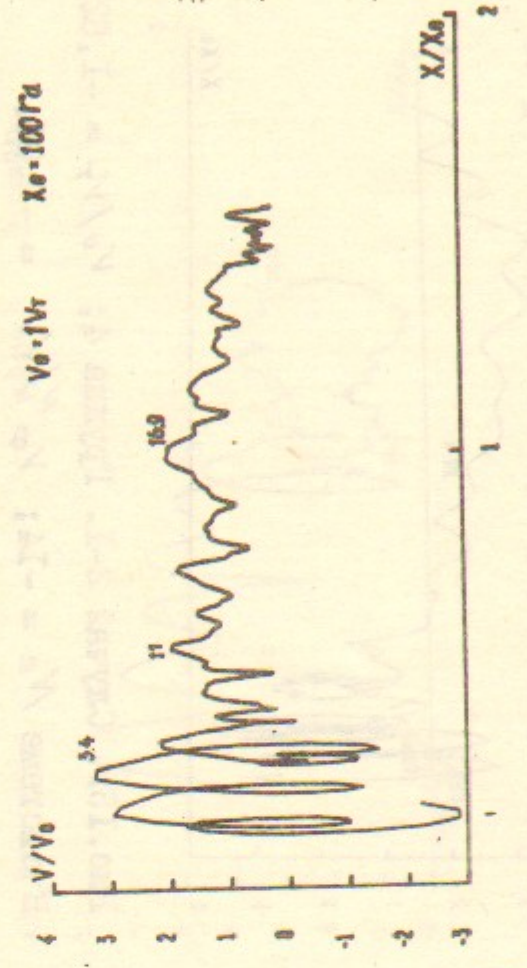


Рис.14б. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 2,01$.

В системе $N_e = 6$; $V_{\phi}^N/V_T = 3,18$.

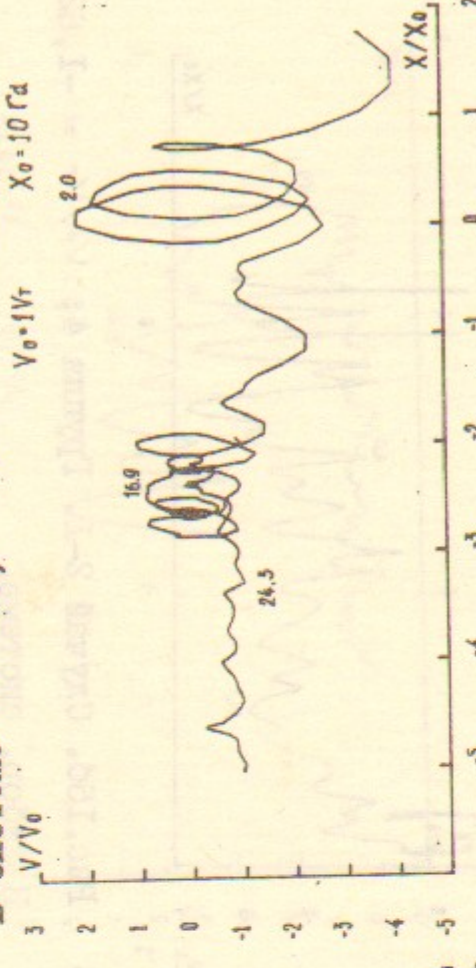


Рис.14г. Случай 2-1. Группа 3; $V_0/V_T = 2,01$.

В системе $N_e = 4$; $V_{\phi}^N/V_T = 4,36$.

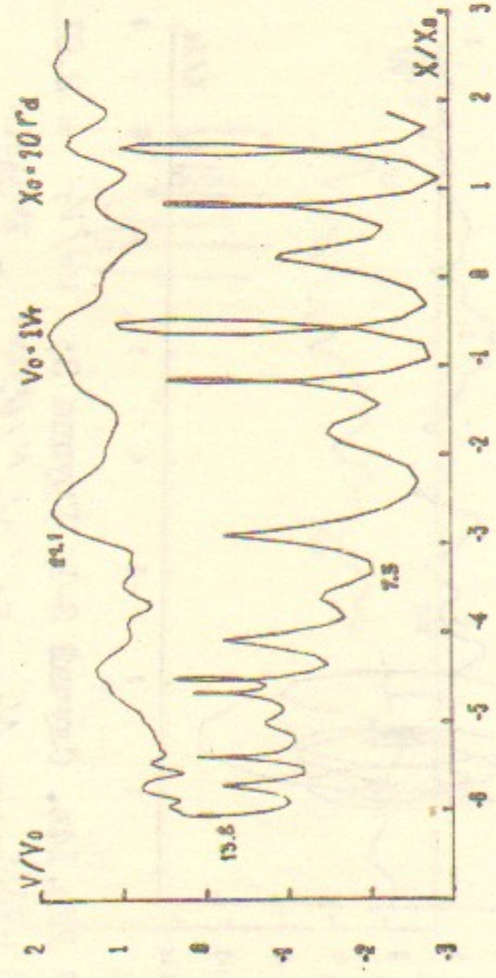


Рис.15а. Случай 2-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,25$

В лабор. системе.

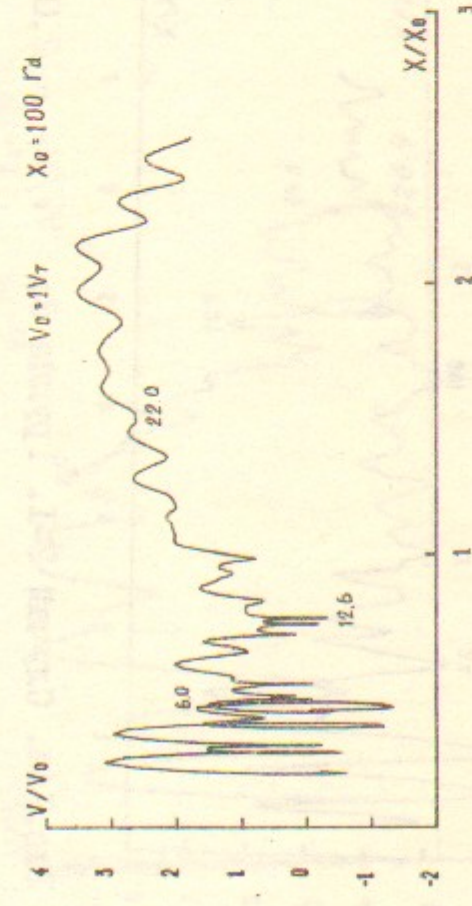


Рис.15б. Случай 2-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,62$.

В системе $N_e = -9$; $V_{\phi}^N/V_T = -2,48$.

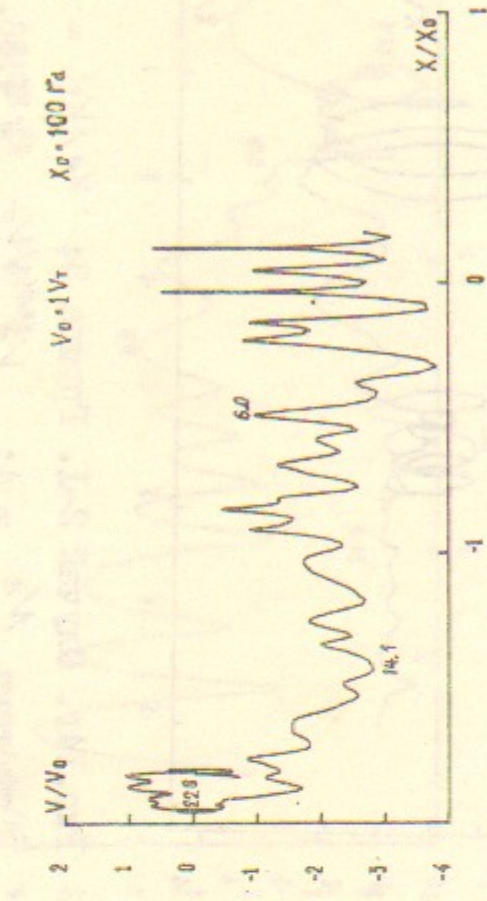


Рис.15в. Случай 2-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,62$.

В лабор. системе.

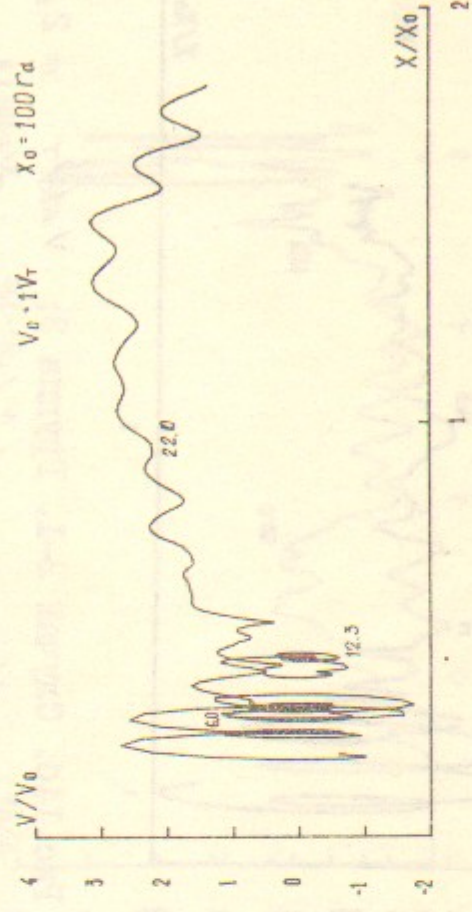


Рис.15г. Случай 2-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,62$.

В системе $N_e = -14$; $V_{\phi}^N/V_T = -2,08$.

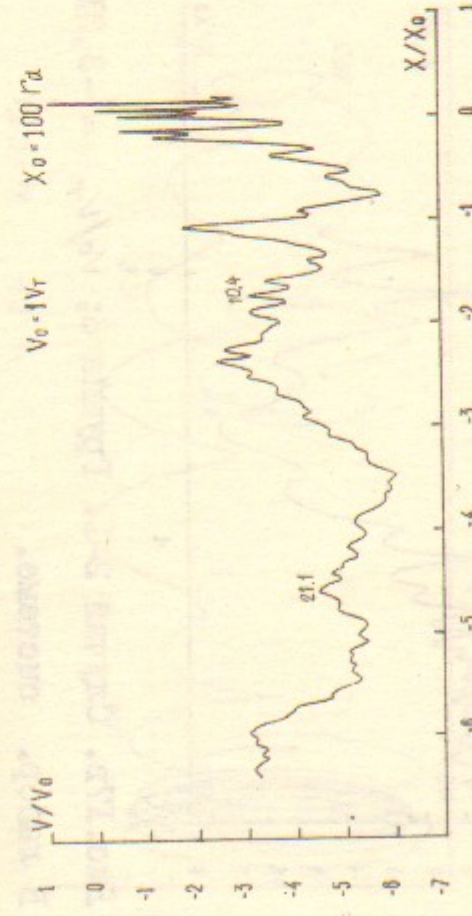


Рис.16а. Случай 2-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,40$.

В лабор. системе.

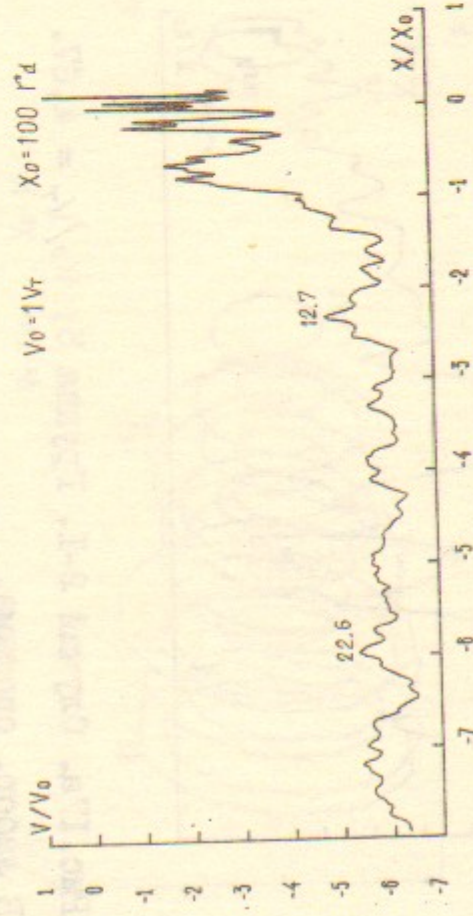


Рис.16в. Случай 2-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,51$.

В лабор. системе.

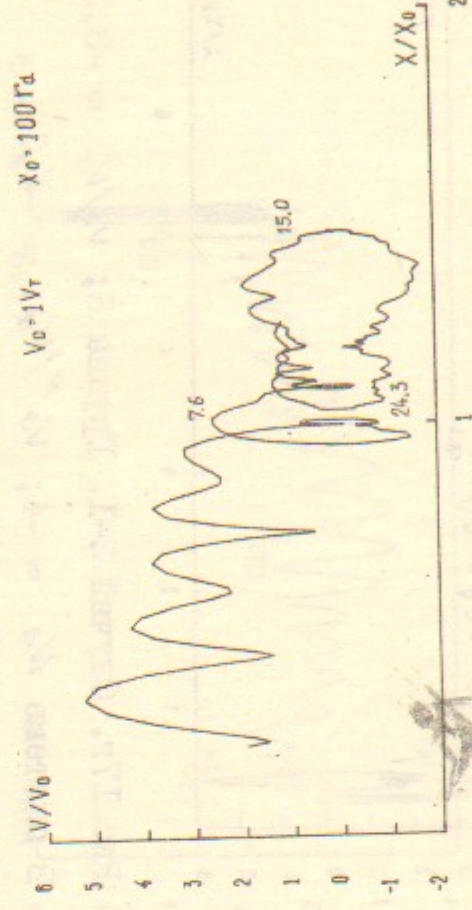


Рис.16б. Случай 2-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,40$.

В системе $N_e = -4$; $V_{\phi}^N/V_T = -4,36$.

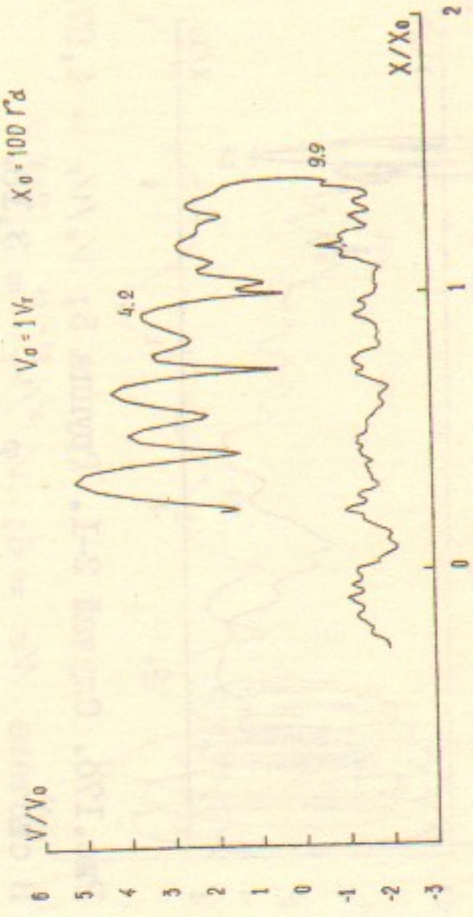


Рис.16г. Случай 2-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,51$.

В системе $N_e = -4$; $V_{\phi}^N/V_T = -4,36$.

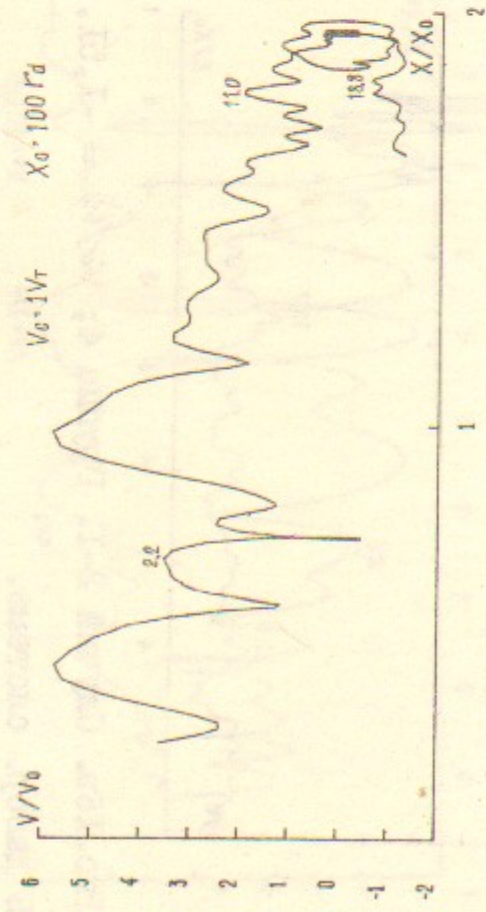


Рис. 17а. Случай 2-1. Группа 5; $V_0/V_T = 4,67$.

В лабор. системе.

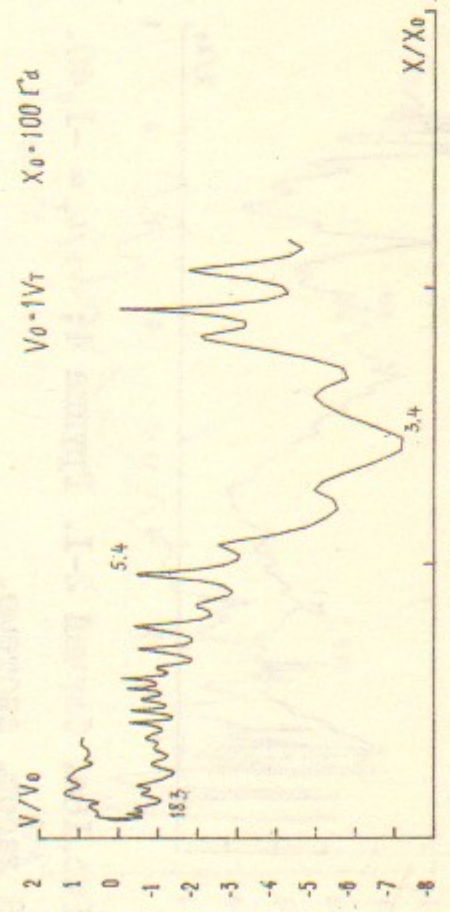


Рис. 17в. Случай 2-1. Группа 6; $V_0/V_T = -3,31$.

В лабор. системе.

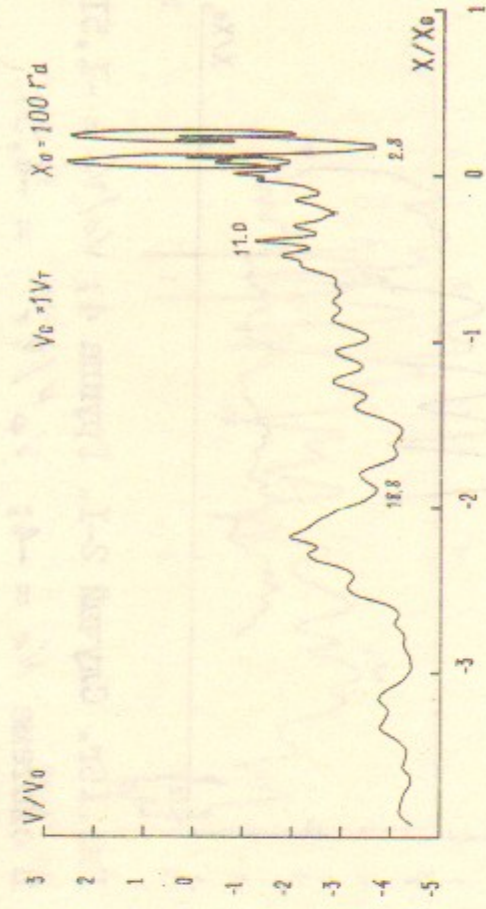


Рис. 17б. Случай 2-1. Группа 5; $V_0/V_T = 4,67$.

В системе $N_i = 6$; $V_{\phi}^i/V_T = 3,18$.

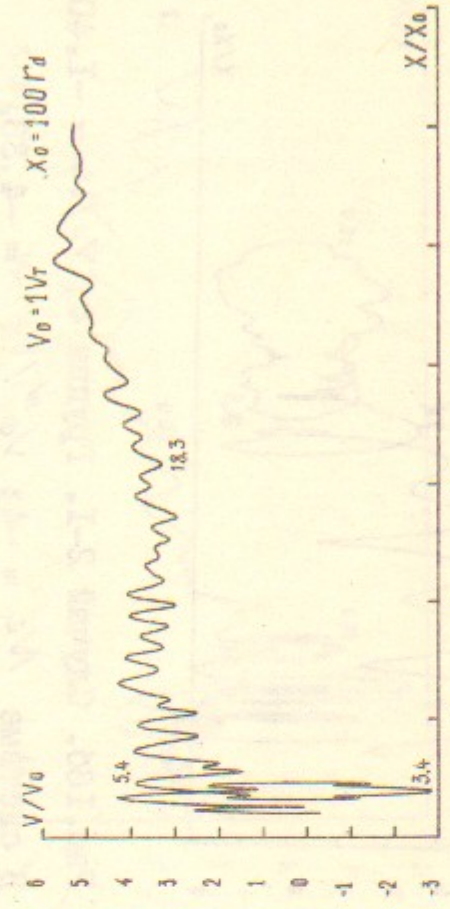


Рис. 17г. Случай 2-1. Группа 6; $V_0/V_T = -3,31$.

В системе $N_i = -4$; $V_{\phi}^i/V_T = -4,36$.

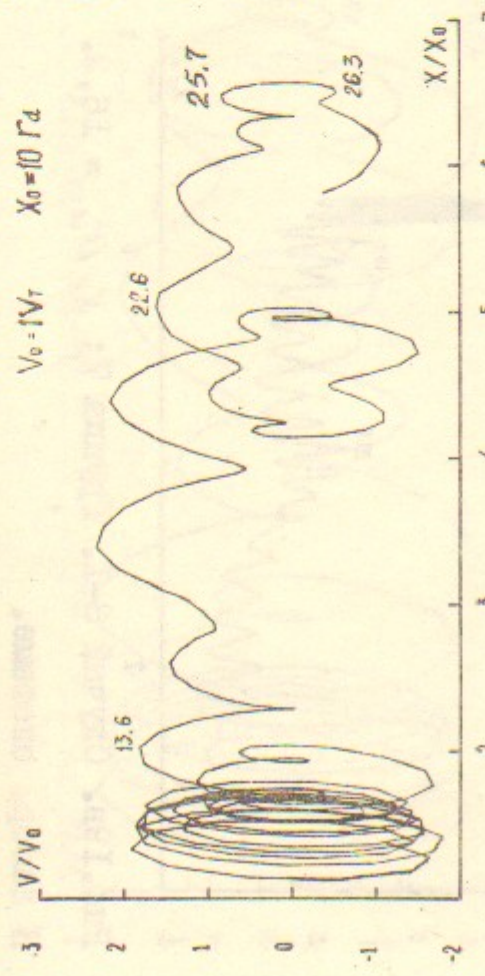


Рис. 18а. Случай 3-1. Группа 7; $X_0/r_d = 14,3$.

В системе $N_i = 7$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,0915$.

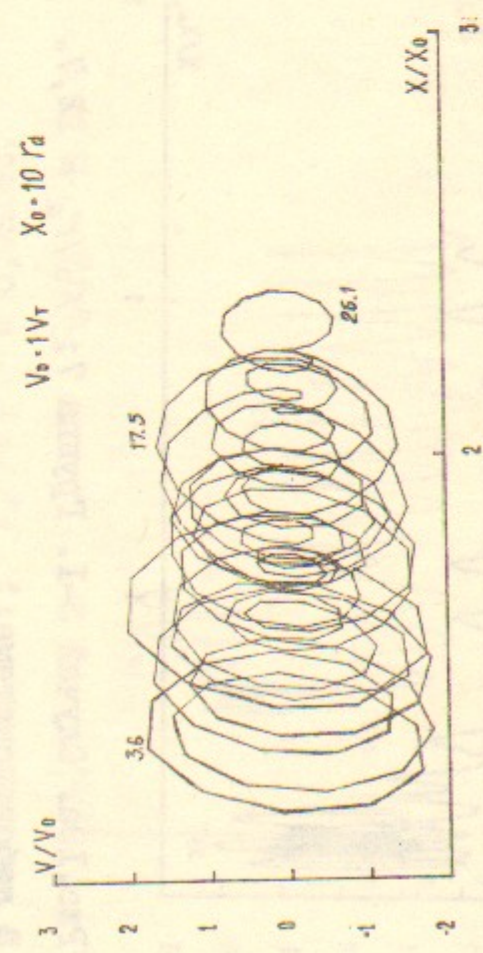


Рис. 18в. Случай 3-1. Группа 7; $X_0/r_d = 17,7$.

В системе $N_i = 7$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,0915$.

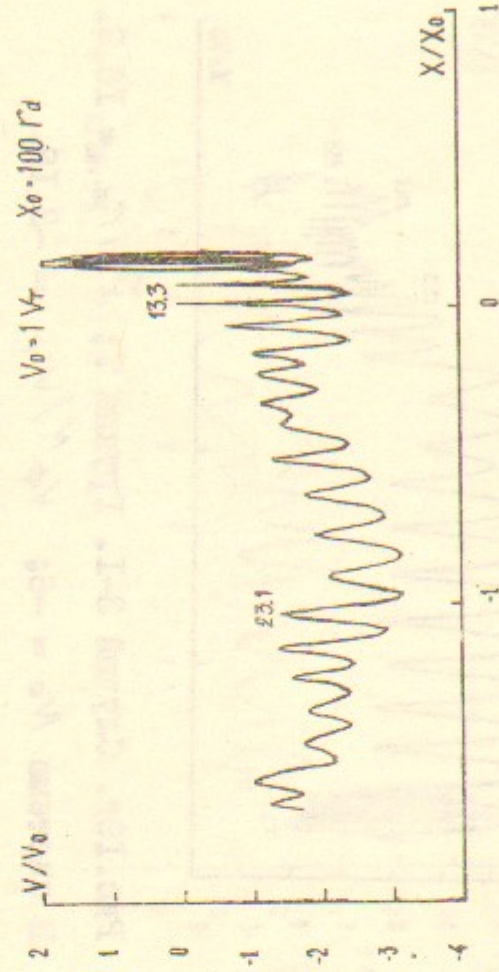


Рис. 18б. Случай 3-1. Группа 7; $X_0/r_d = 16,3$.

В системе $N_i = 7$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,0915$.

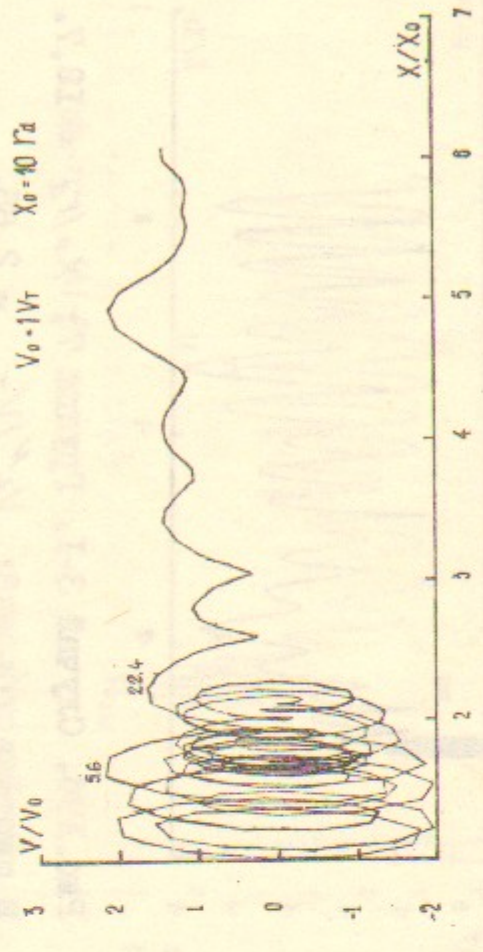


Рис. 18г. Случай 3-1. Группа 7; $X_0/r_d = 19,0$.

В системе $N_i = 7$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,0915$.

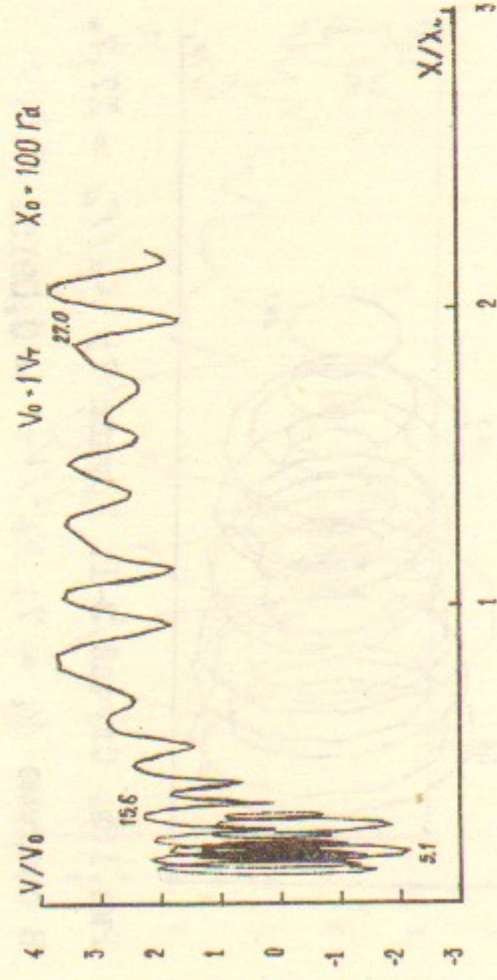


Рис.19а. Случай 3-1. Группа 7; $X_0/r_d = 12,7$.
В лабор. системе.

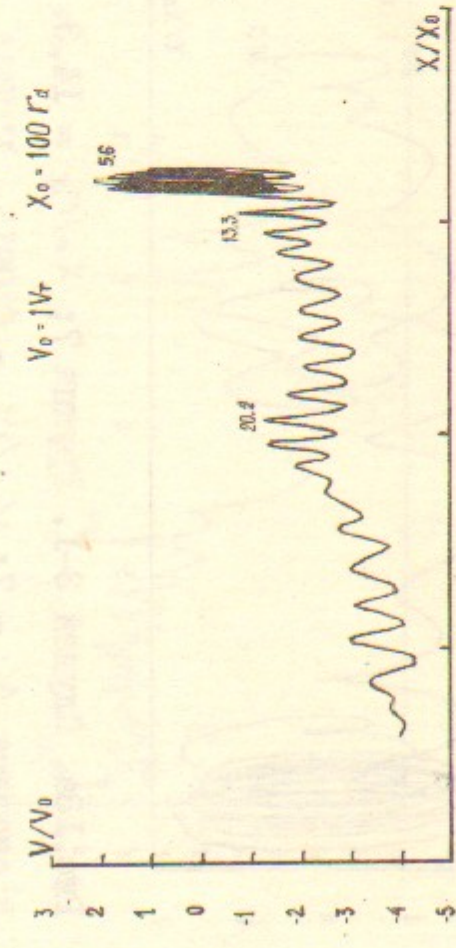


Рис.19в. Случай 3-1. Группа 7; $X_0/r_d = 16,2$.
В лабор. системе.

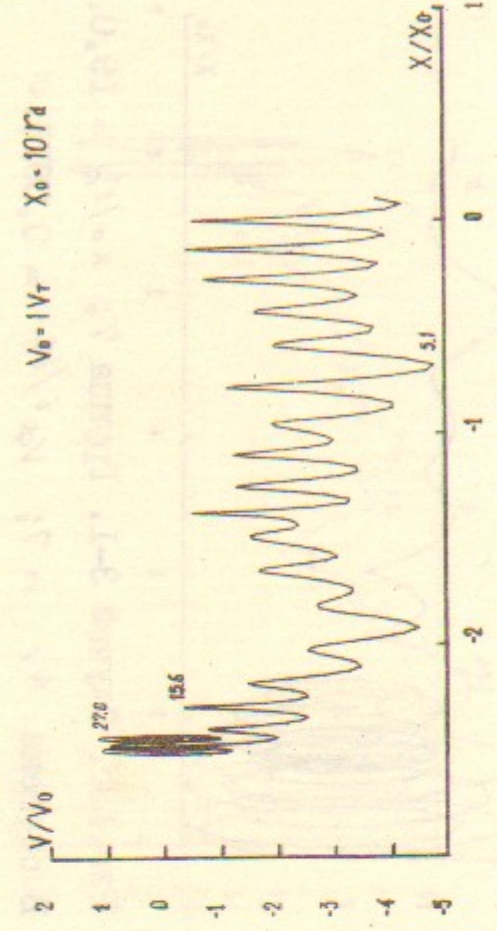


Рис.19б. Случай 3-1. Группа 7; $X_0/r_d = 12,7$.
В системе $N_e = 8$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,65$.

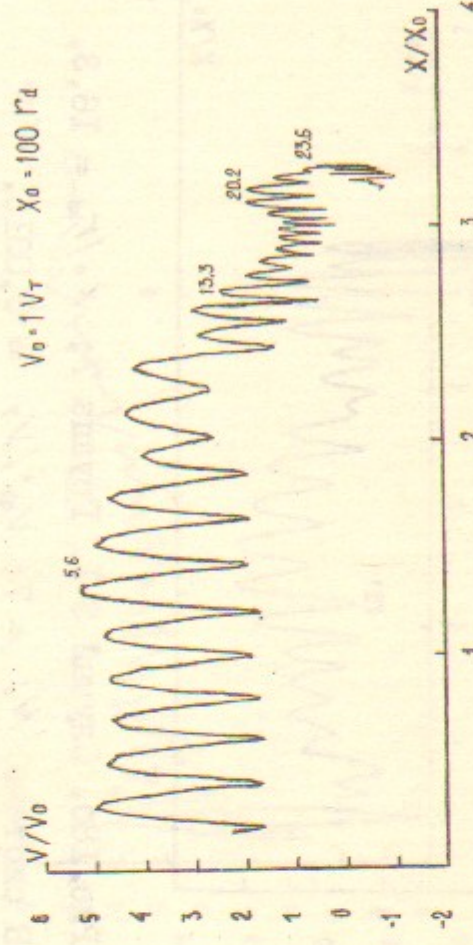


Рис.19г. Случай 3-1. Группа 7; $X_0/r_d = 16,2$.
В системе $N_e = -6$; $V_{\phi}^N/V_T = -3,18$.

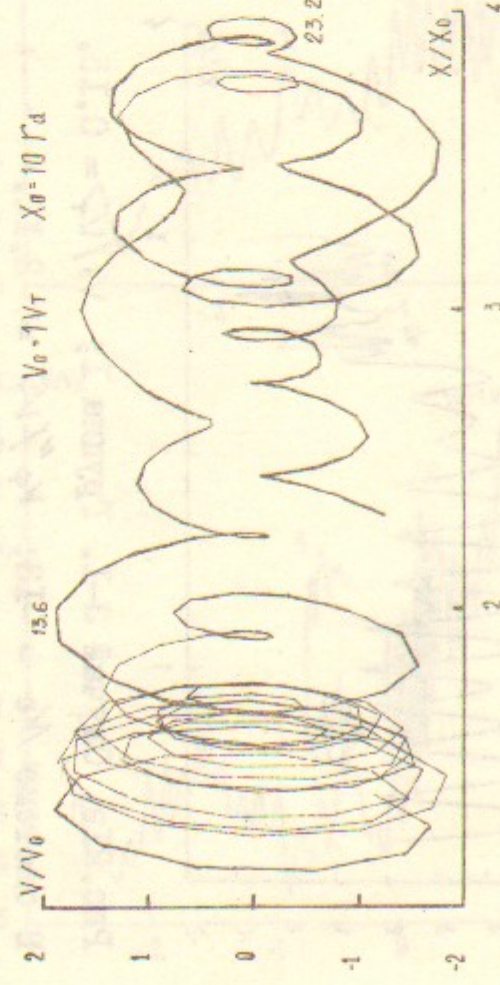


Рис.20а. Случай 3-1. Группа 1; $N_i = -0,03$.
В системе $N_i = 7$; $V_{\phi}^N/V_T = 0,09153$.

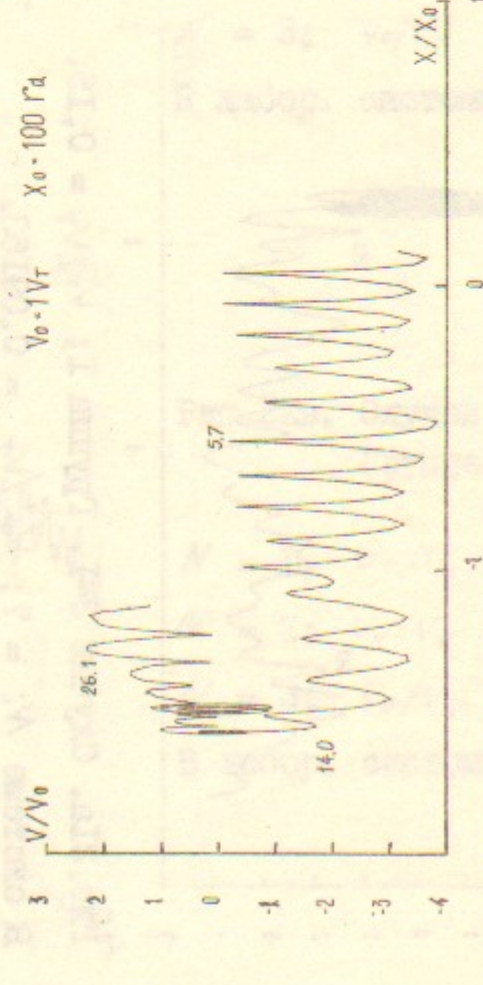


Рис.20в. Случай 3-1. Группа 1; $V_0/V_T = -0,09$.
В системе $N_e = 15$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,03$.

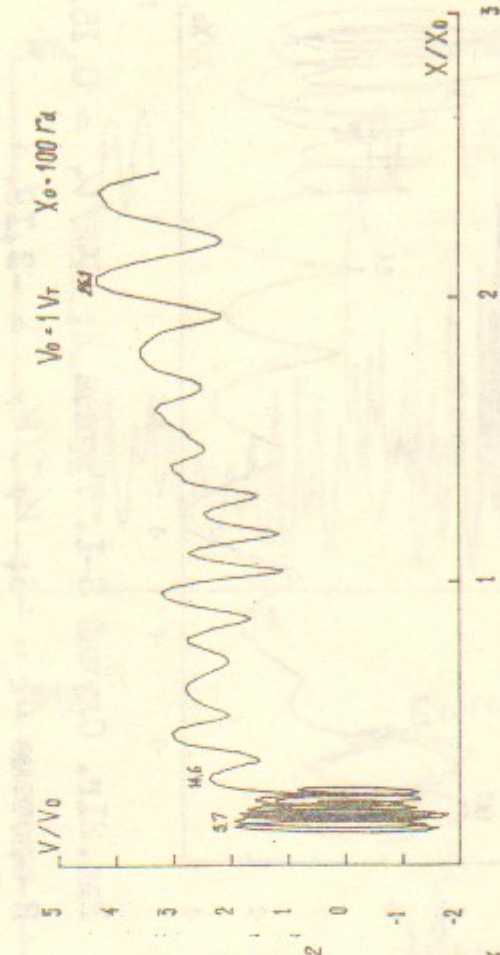


Рис.20б. Случай 3-1. Группа 1; $V_0/V_T = -0,09$.
В лабор. системе.

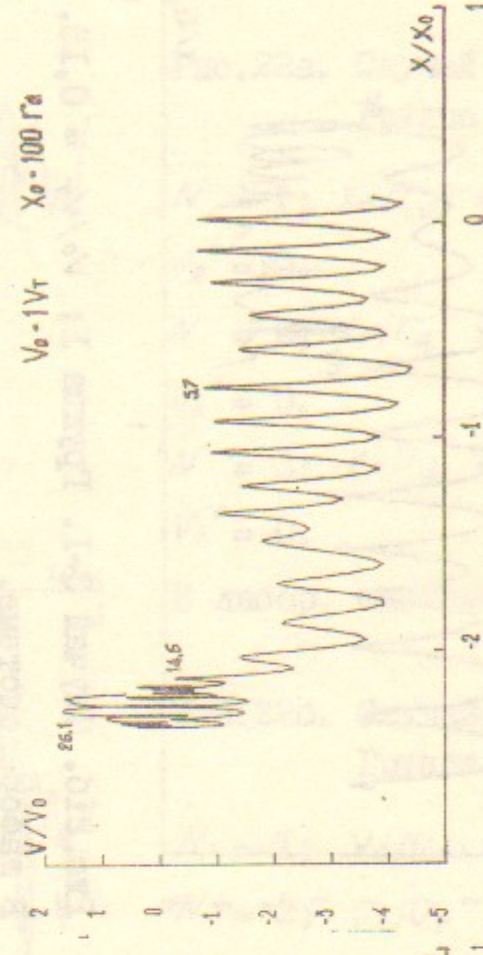


Рис.20г. Случай 3-1. Группа 1; $V_0/V_T = -0,09$.
В системе $N_e = 8$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,65$.

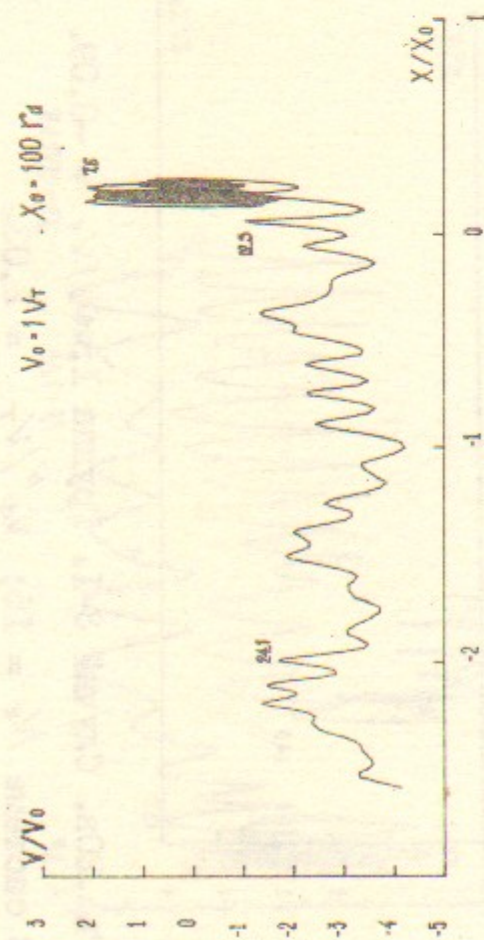


Рис.21а. Случай 3-1. Группа 1; $V_0/V_T = 0,15$.
В системе $N_i = 7$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,09153$.

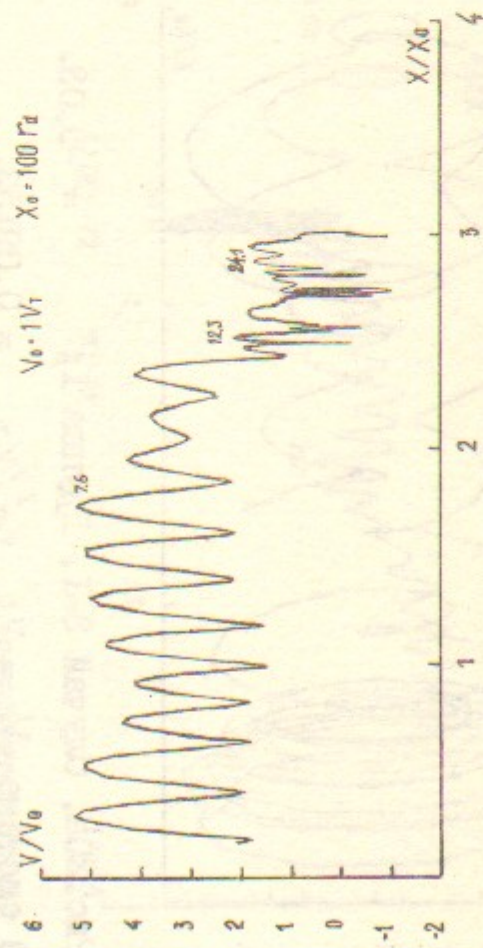


Рис.21б. Случай 3-1. Группа 1; $V_0/V_T = 0,15$.
В системе $N_e = -13$; $V_{\phi}^e/V_T = -2,12$.

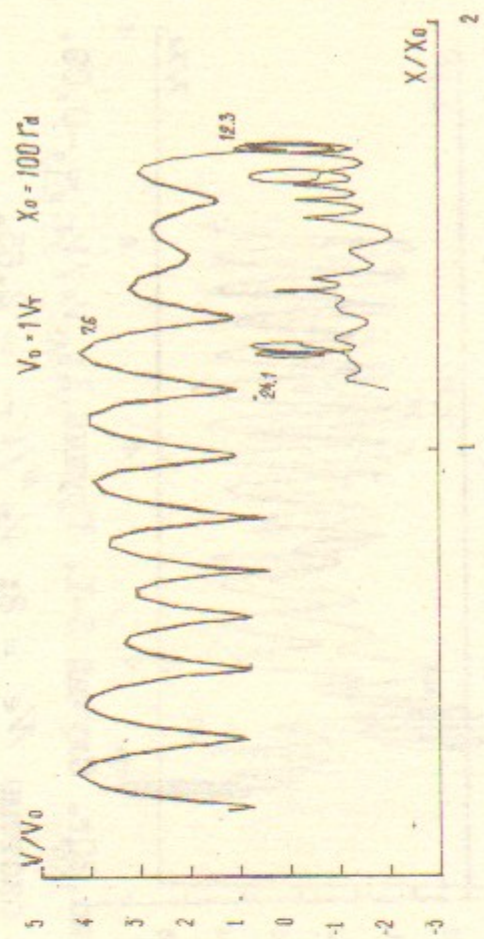


Рис.21б. Случай 3-1. Группа 1; $V_0/V_T = 0,15$.
В лабор. системе.

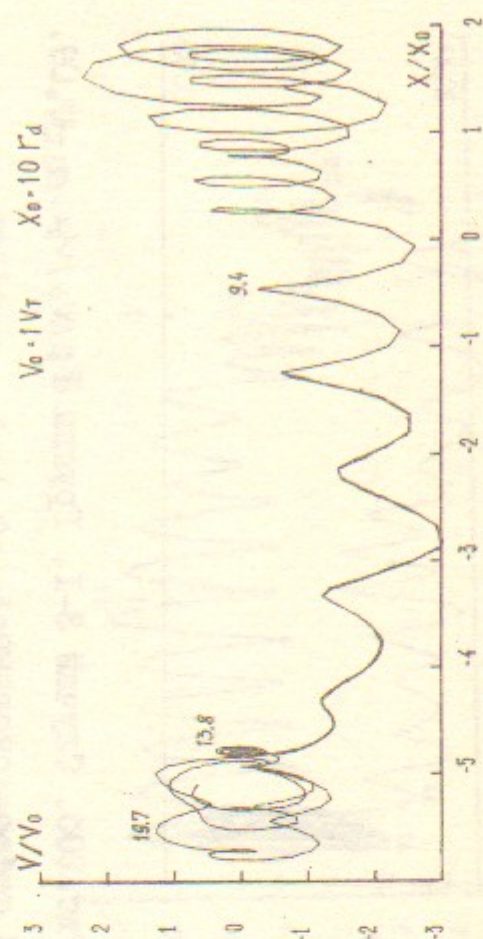


Рис.21г. Случай 3-1. Группа 2; $V_0/V_T = 0,15$.
В системе $N_e = -6$; $V_{\phi}^e/V_T = -3,18$.

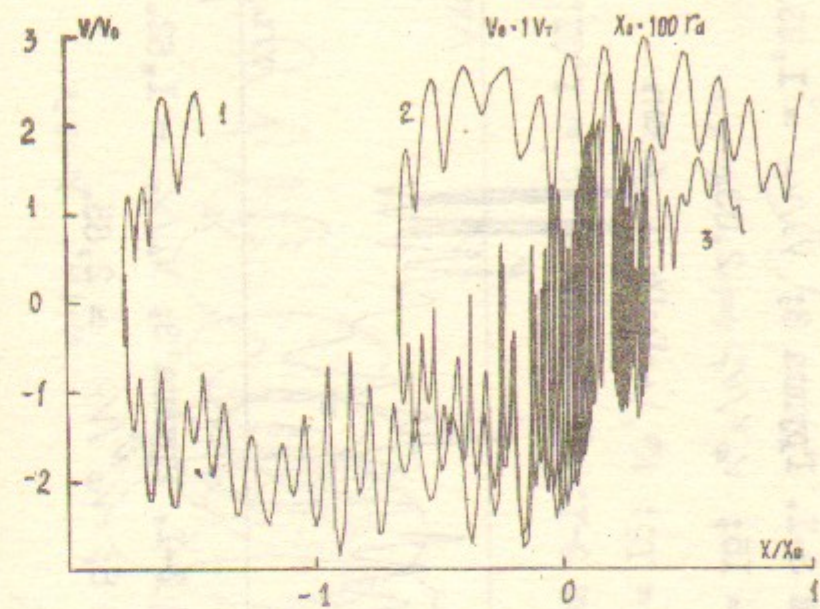


Рис.22а. Случай 3-1.
Группа 7.

$N = 1$; $X_0/r_d = 7,6$;
 $V_0^0 = 0$.
 $N = 2$; $X_0/r_d = 8,9$;
 $V_0^0 = 0$.
 $N = 3$; $X_0/r_d = 10,3$;
 $V_0^0 = 0$.

В лабор. системе.

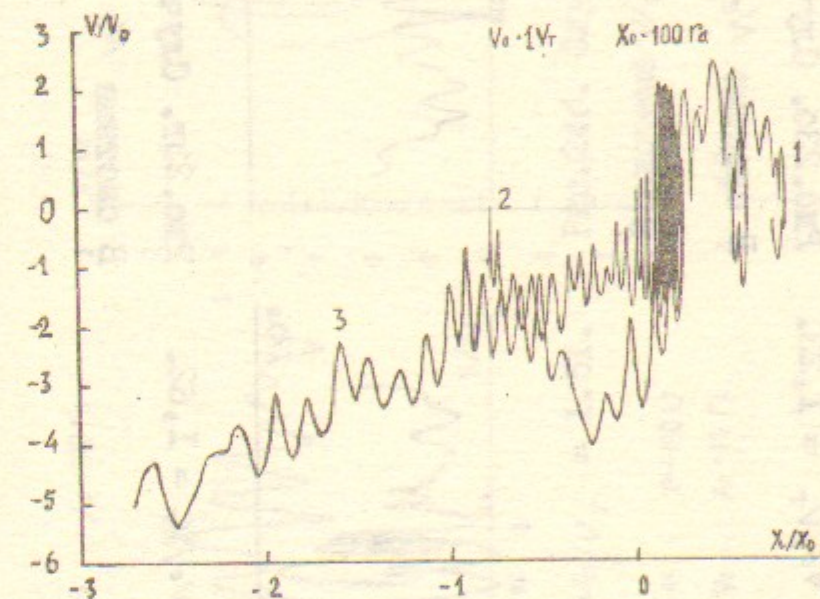


Рис.22б. Случай 3-1.
Группа 1.

$N = 1$; $V_0/V_T = 0$
 $N = 2$; $V_0/V_T = 0,032$.
 $N = 3$; $V_0/V_T = 0,064$

В лабор. системе.

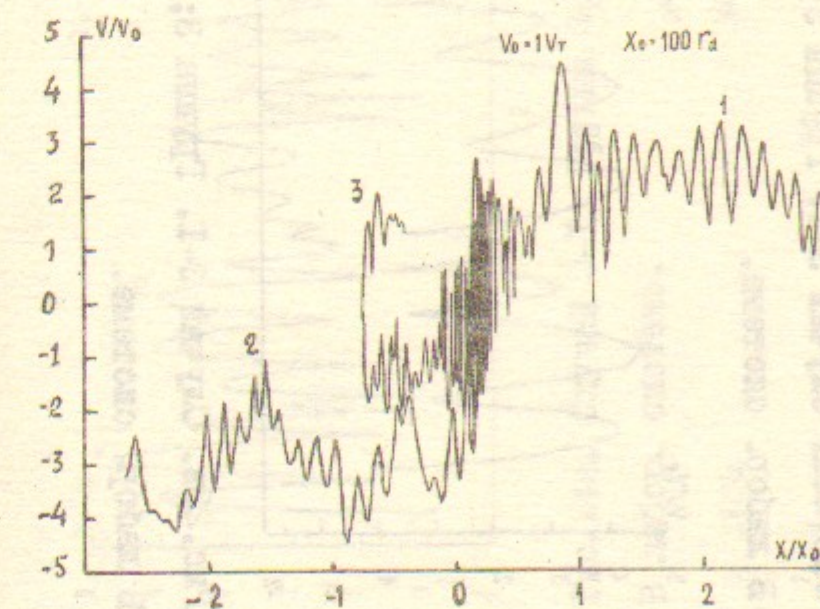


Рис.22в. Случай 3-1.
Группа 2.

$N = 1$; $V_0/V_T = 0,54$
 $N = 2$; $V_0/V_T = 0,64$
 $N = 3$; $V_0/V_T = 0,72$.

В лабор. системе.

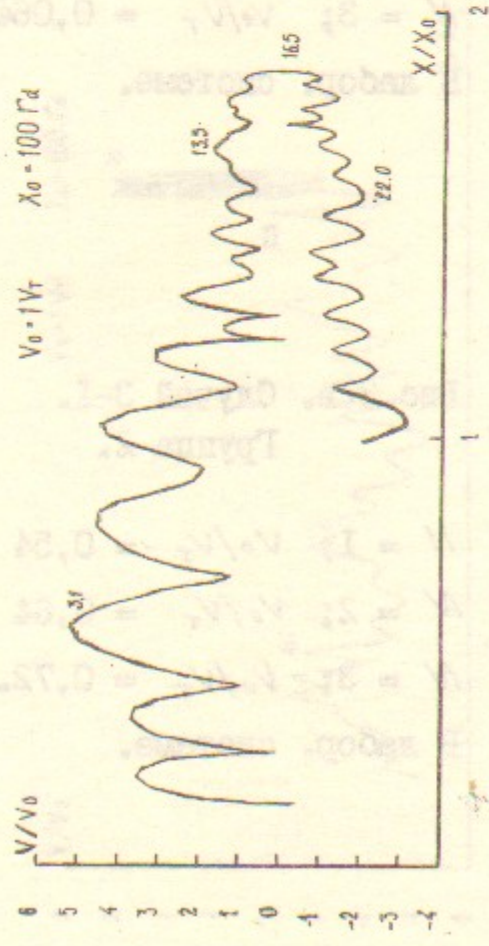


Рис. 23а. Случай 3-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,23$.
В лабор. системе.

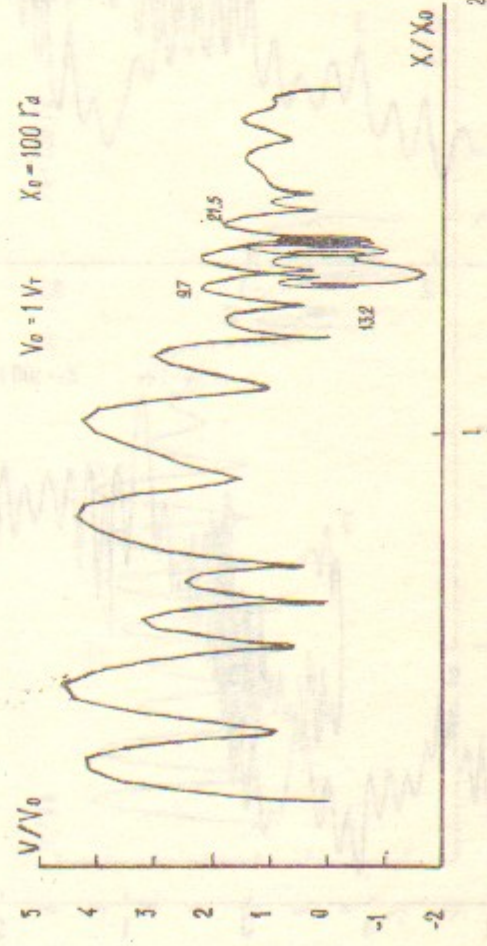


Рис. 23в. Случай 3-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,62$.
В лабор. системе.

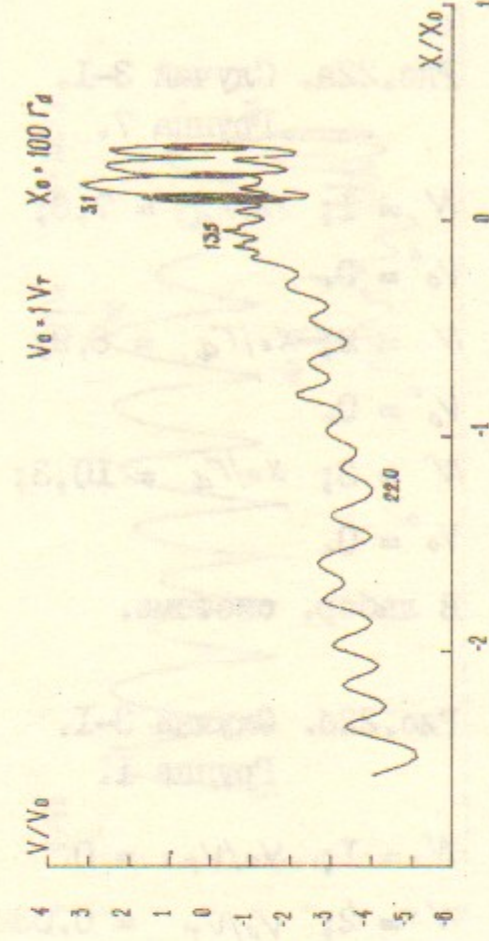


Рис. 23б. Случай 3-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,23$.
В системе $N_e = 15$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,03$.

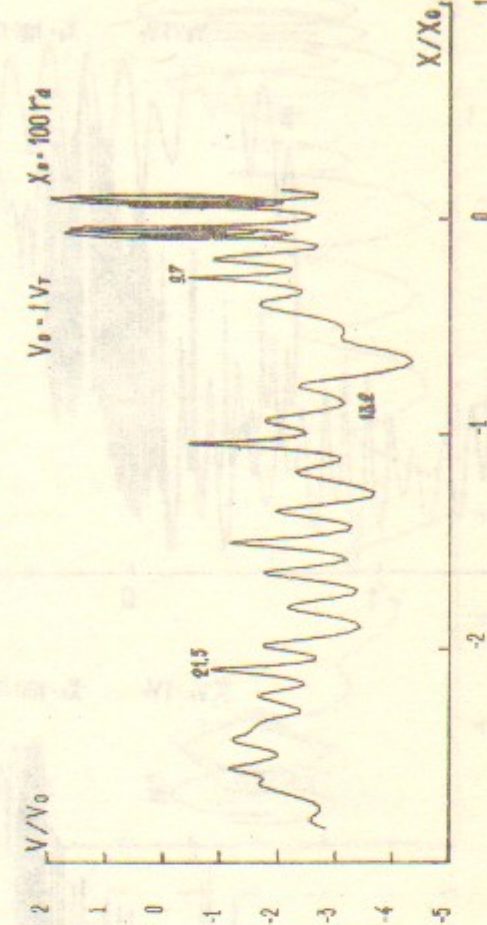


Рис. 23г. Случай 3-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,62$.
В системе $N_e = 8$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,65$.

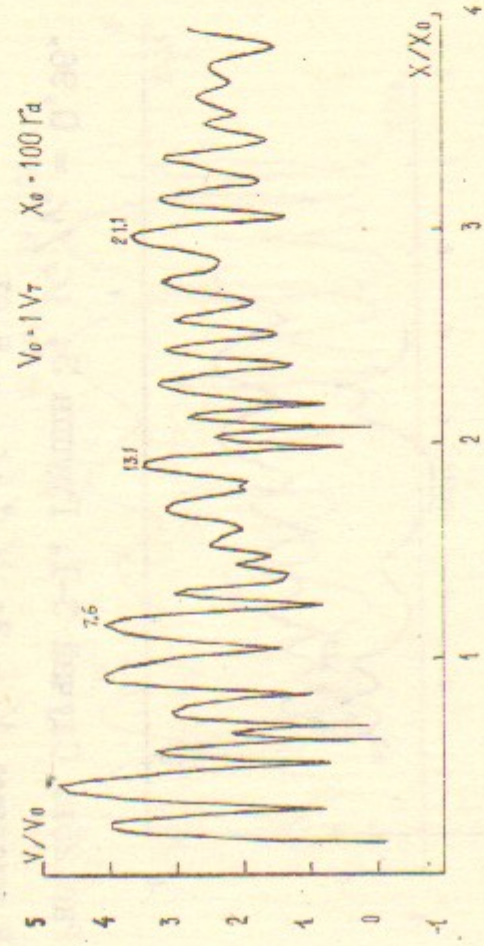


Рис. 24а. Случай 3-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,51$.
В лабор. системе.

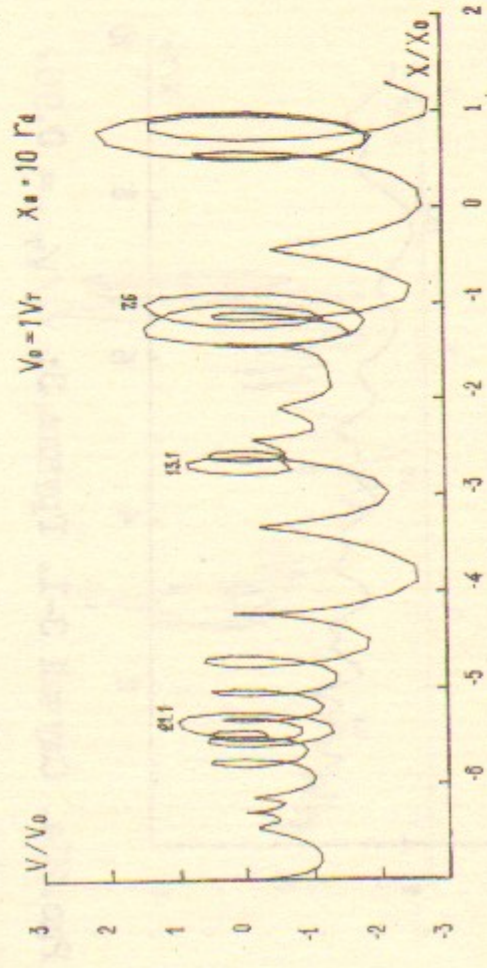


Рис. 24в. Случай 3-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,51$.
В системе $N_e = 8$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,65$.

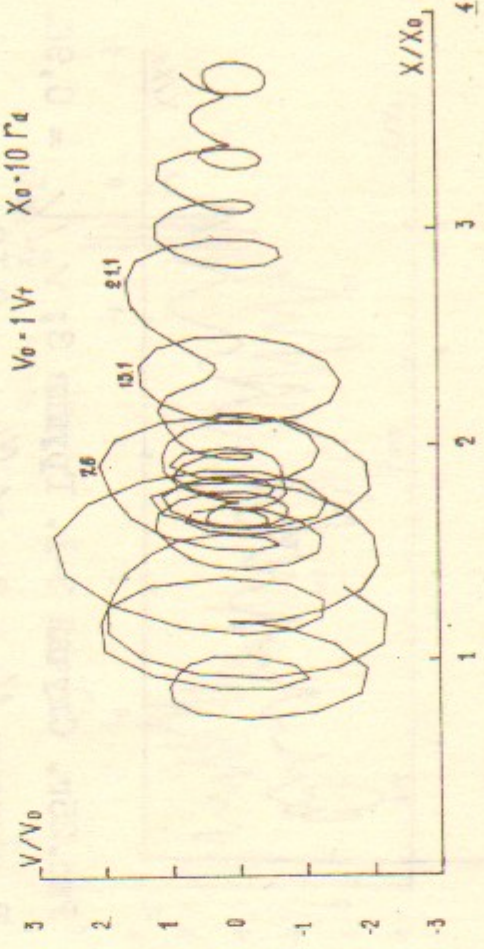


Рис. 24б. Случай 3-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,51$.
В системе $N_e = 15$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,03$.

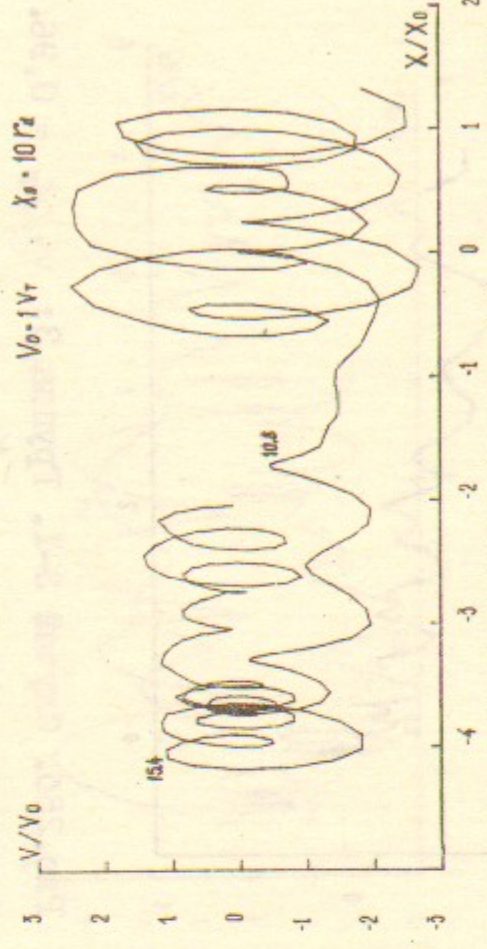


Рис. 24г. Случай 3-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,85$.
В системе $N_e = 8$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,65$.

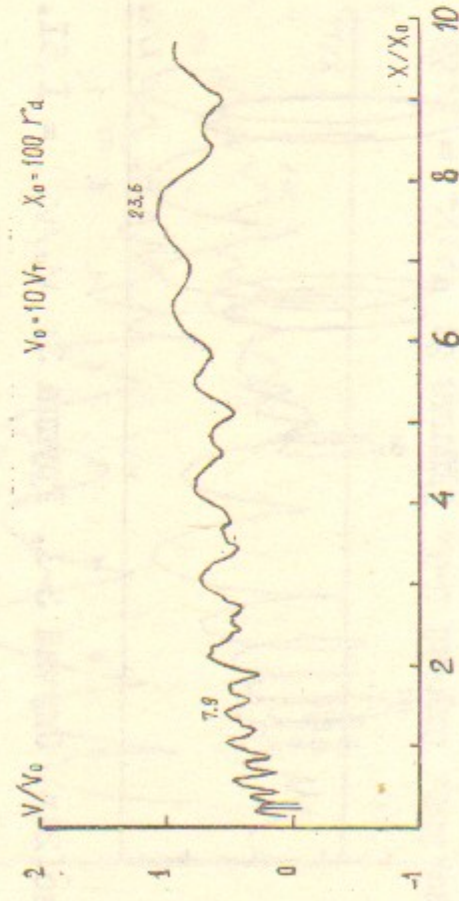


Рис.25а. Случай 3-1. Група 3; $V_0/V_T = 0,96$.
 В лабор. системе.

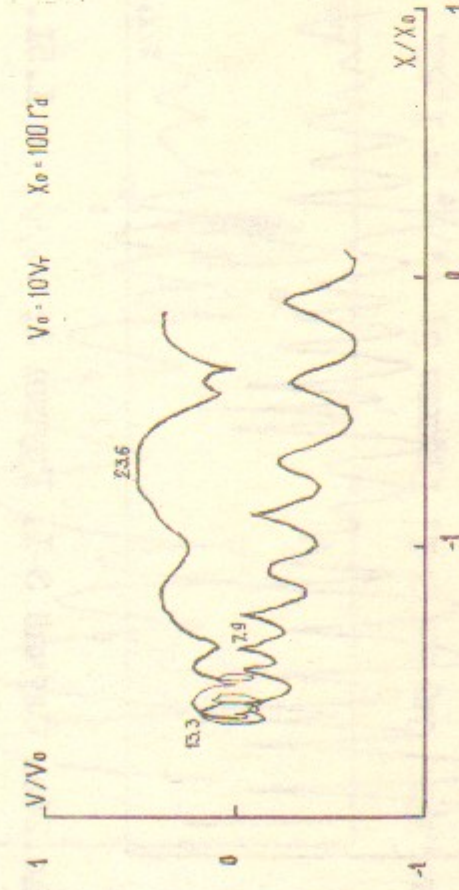


Рис.25в. Случай 3-1. Група 3; $V_0/V_T = 0,96$.
 В системе $N_e = 3$; $V_{\phi}^N/V_T = 5,6I$.

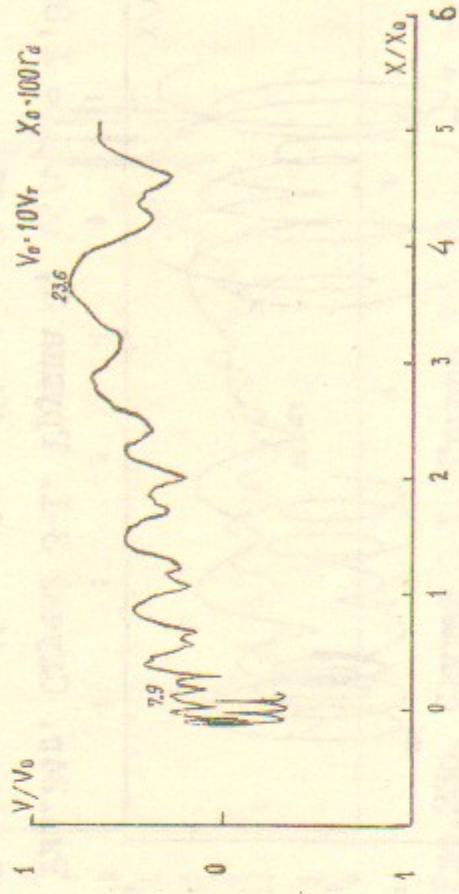


Рис.25б. Случай 3-1. Група 3; $V_0/V_T = 0,96$.
 В системе $N_e = 8$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,65$.

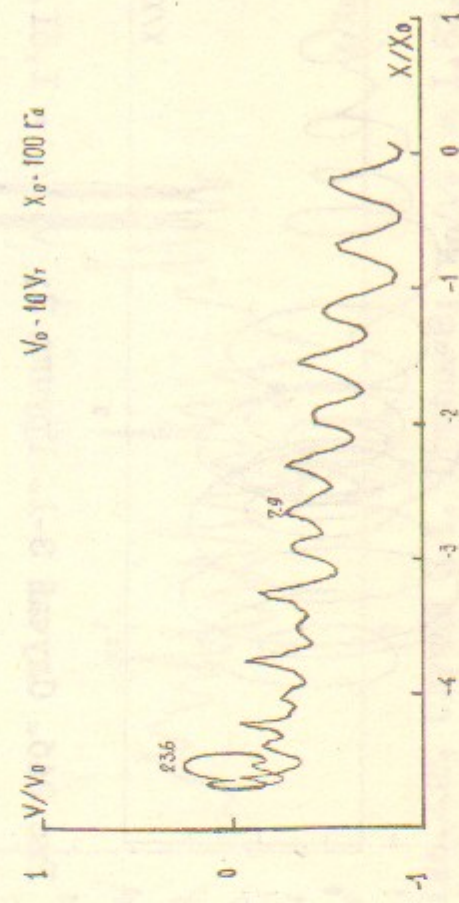


Рис.25г. Случай 3-1. Група 3; $V_0/V_T = 0,96$.
 В системе $N_e = 2$; $V_{\phi}^N/V_T = 8,18$.

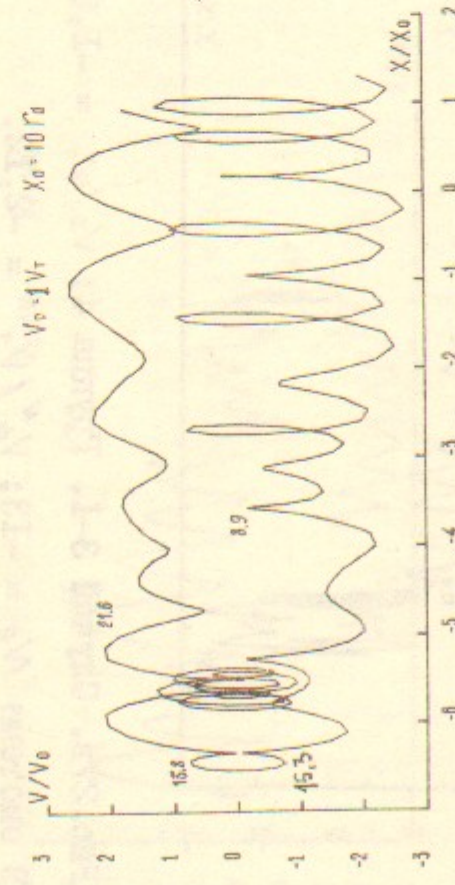


Рис.26а. Случай 3-1. Група 4; $V_0/V_T = -0,96$.
 В лабор. системе.

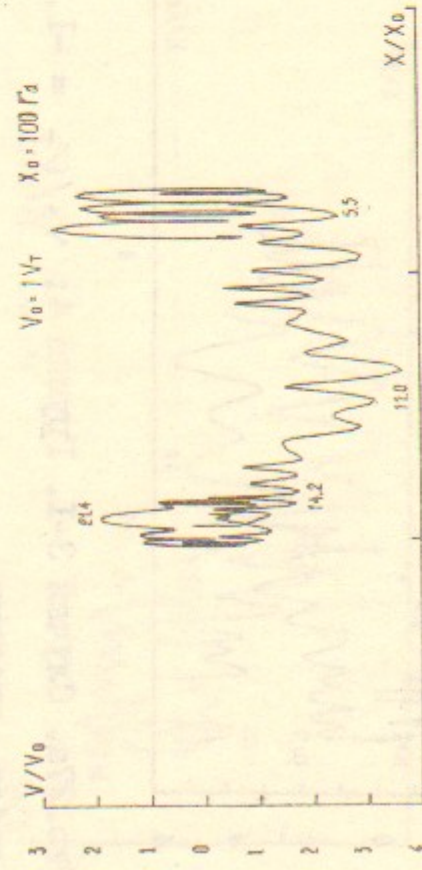


Рис.26в. Случай 3-1. Група 4; $V_0/V_T = -1,40$.
 В системе $N_e = -13$; $V_{\phi}^N/V_T = -2,12$,

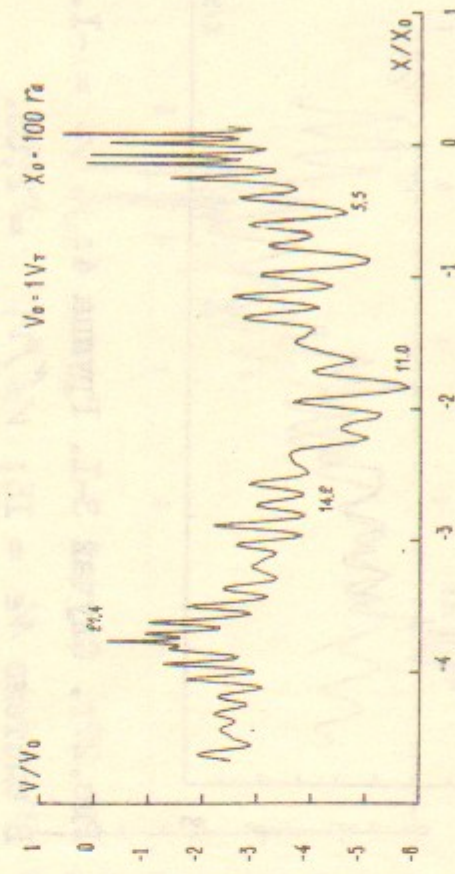


Рис.26б. Случай 3-1. Група 4; $V_0/V_T = -1,40$.
 В лабор. системе.

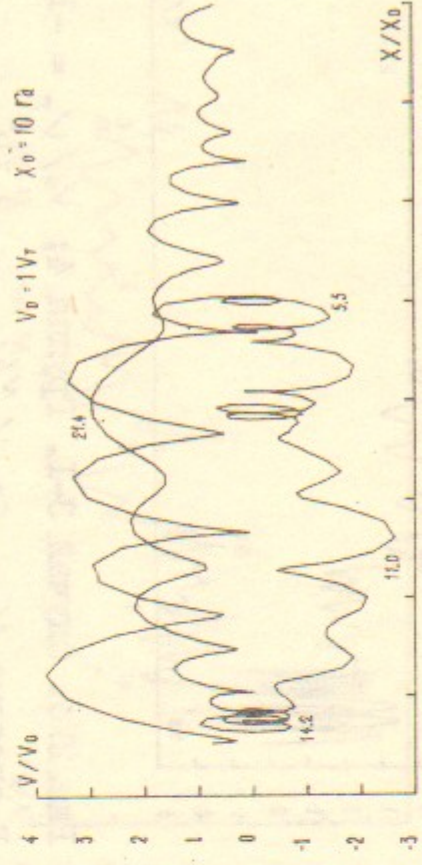
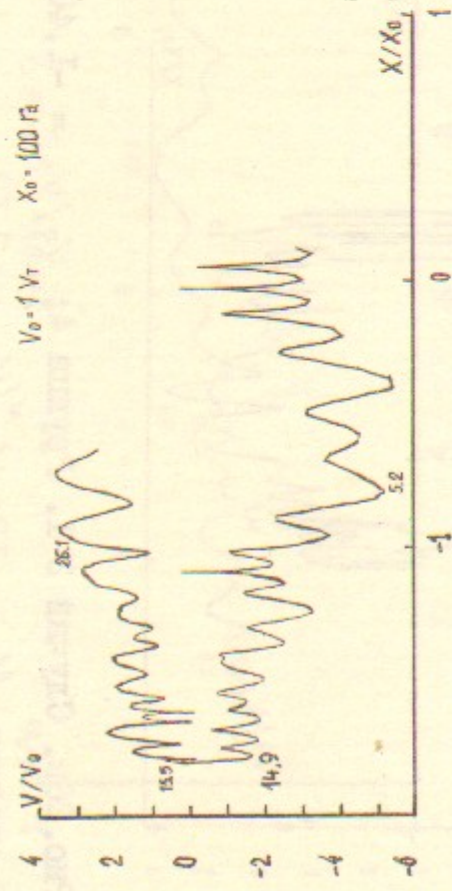


Рис.26г. Случай 3-1. Група 4; $V_0/V_T = -1,40$.
 В системе $N_e = -6$; $V_{\phi}^N/V_T = -3,18$.



62
Рис.27а. Случай 3-1. Груша 4; $V_0/V_T = -1,87$.
В лабор. системе.

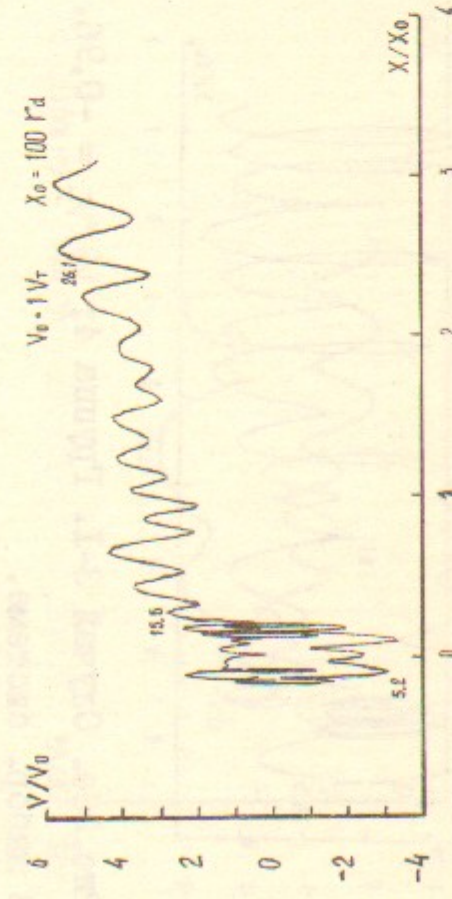


Рис.27в. Случай 3-1. Груша 4; $V_0/V_T = -1,87$.
В системе $N_e = -13$; $V_\phi^N/V_T = -2,12$.

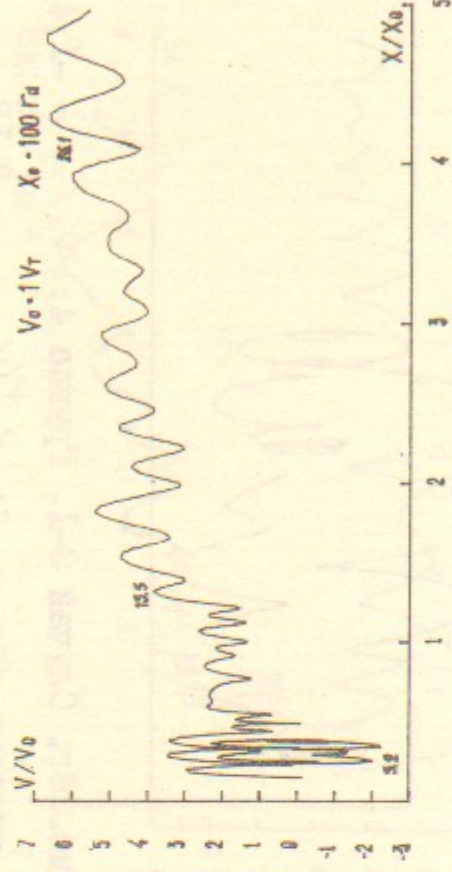


Рис.27б. Случай 3-1. Груша 4; $V_0/V_T = -1,87$.
В системе $N_e = -6$; $V_\phi^N/V_T = -3,18$.

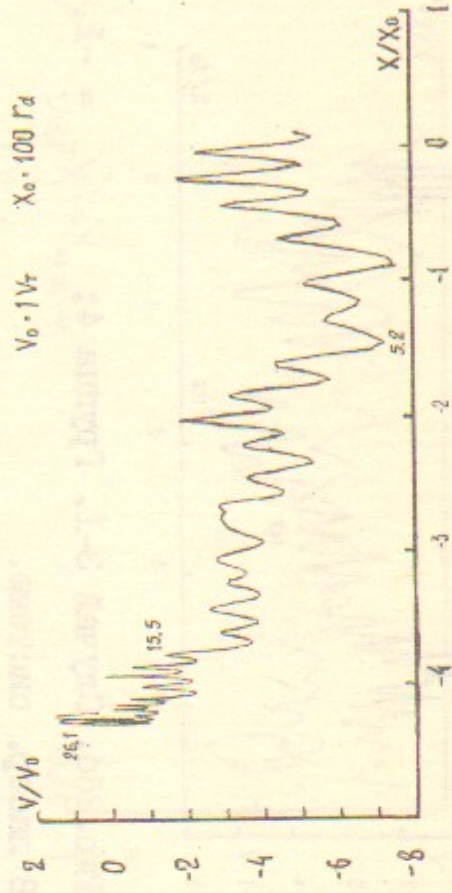
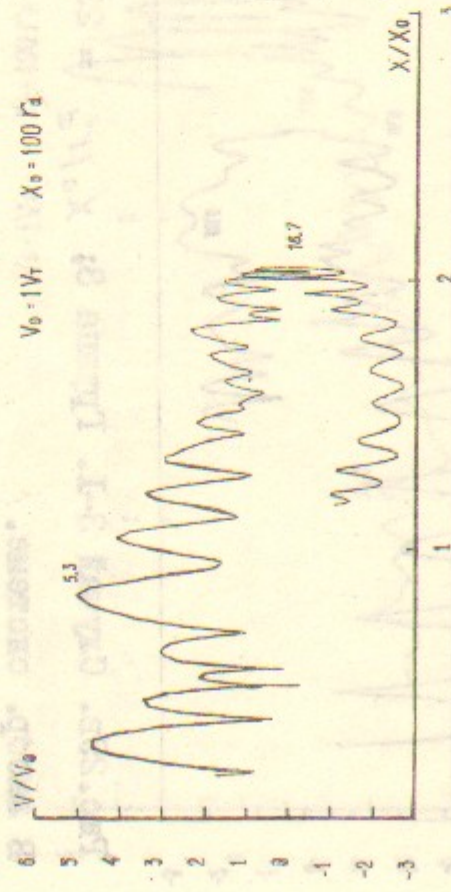


Рис.27г. Случай 3-1. Груша 4; $V_0/V_T = -1,87$.
В системе $N_e = 15$; $V_\phi^N/V_T = 2,03$.



63
Рис.28а. Случай 3-1. Груша 5; $V_0/V_T = 2,77$.
В лабор. системе.

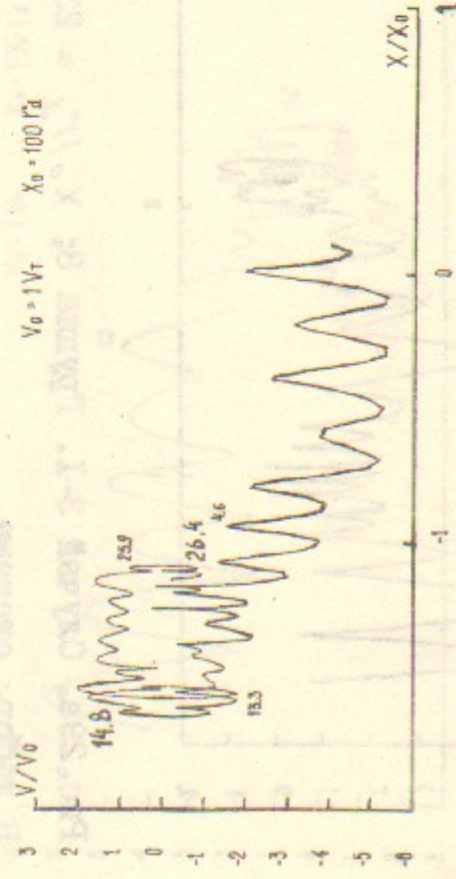


Рис.28в. Случай 3-1. Груша 6; $V_0/V_T = -2,99$.
В лабор. системе.

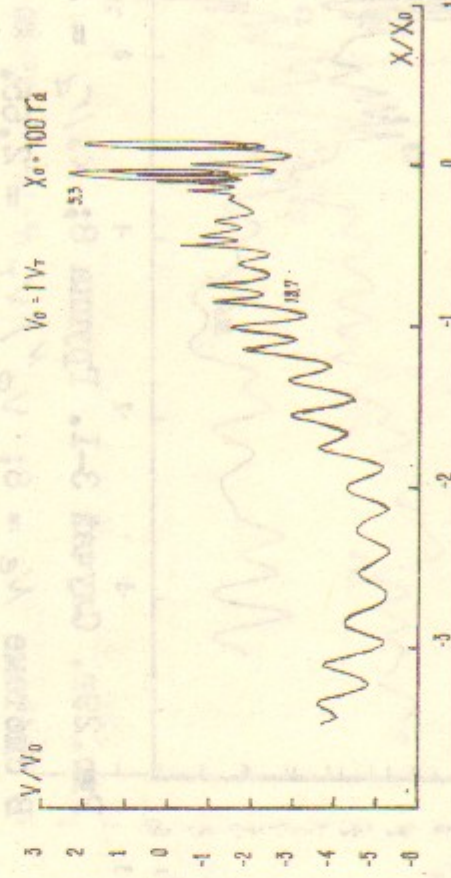


Рис.28б. Случай 3-1. Груша 5; $V_0/V_T = 2,77$.
В системе $N_e = 8$; $V_\phi^N/V_T = 2,65$.

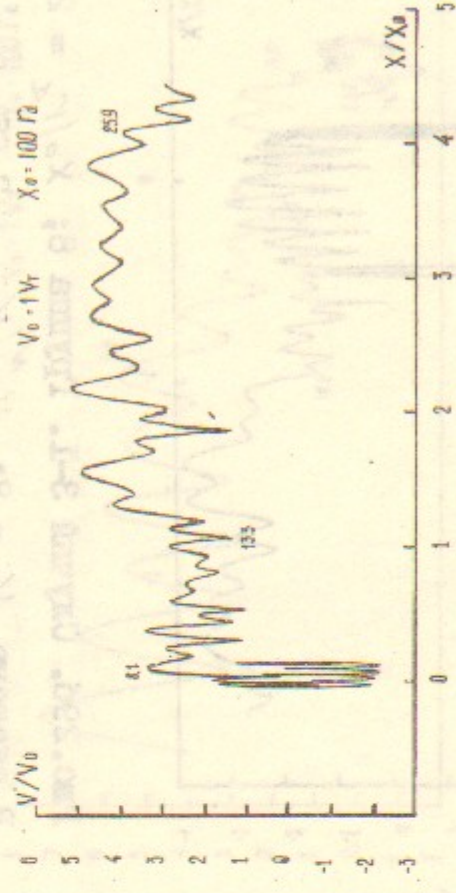
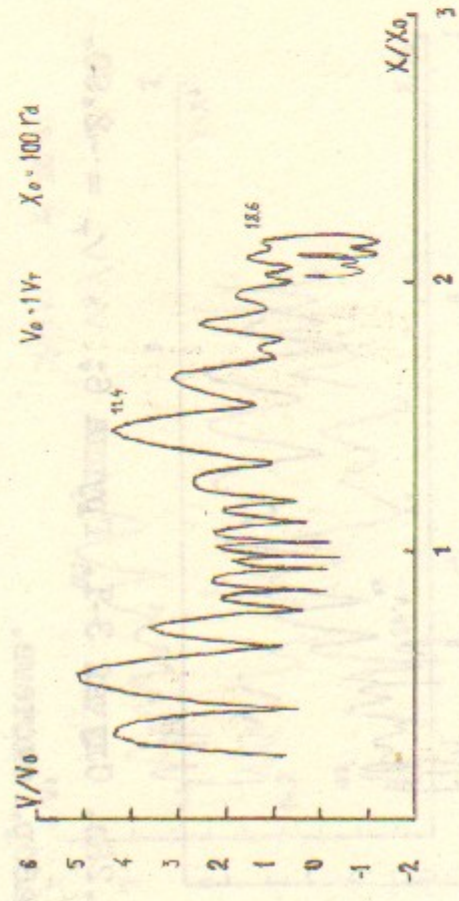


Рис.28г. Случай 3-1. Груша 6; $V_0/V_T = -2,99$.
В системе $N_e = -6$; $V_\phi^N/V_T = -3,18$.



64 **Рис.29а.** Случай 3-1. Груша 8; $X_0/r_d = 23,3$.
В лабор. системе.

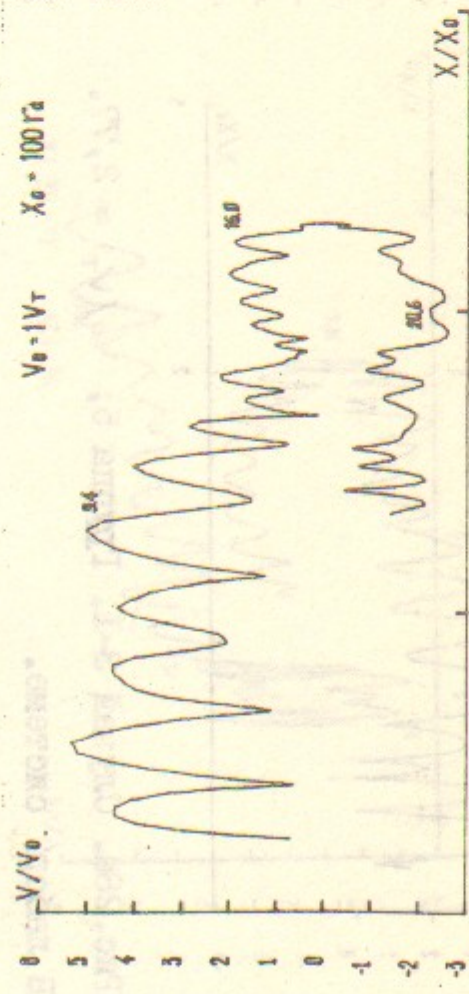


Рис.29в. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/r_d = 23,7$.
В лабор. системе.

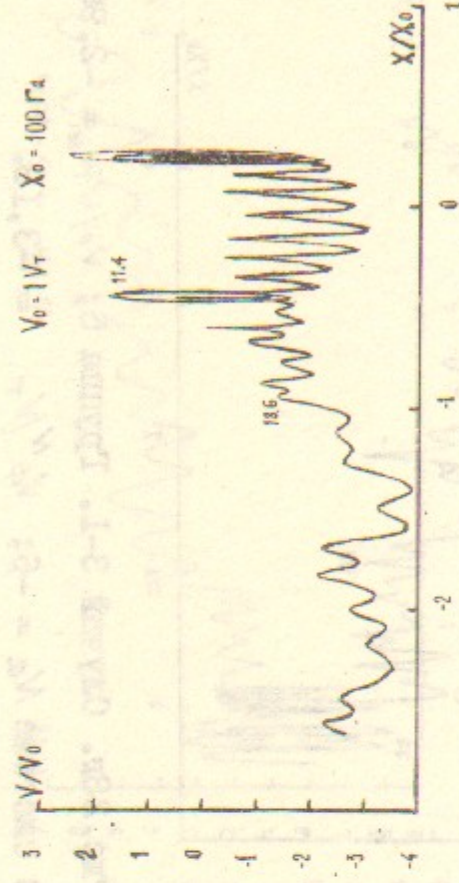


Рис.29б. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/r_d = 23,3$.
В системе $N_e = 8$; $V_\phi^N/V_T = 2,65$.

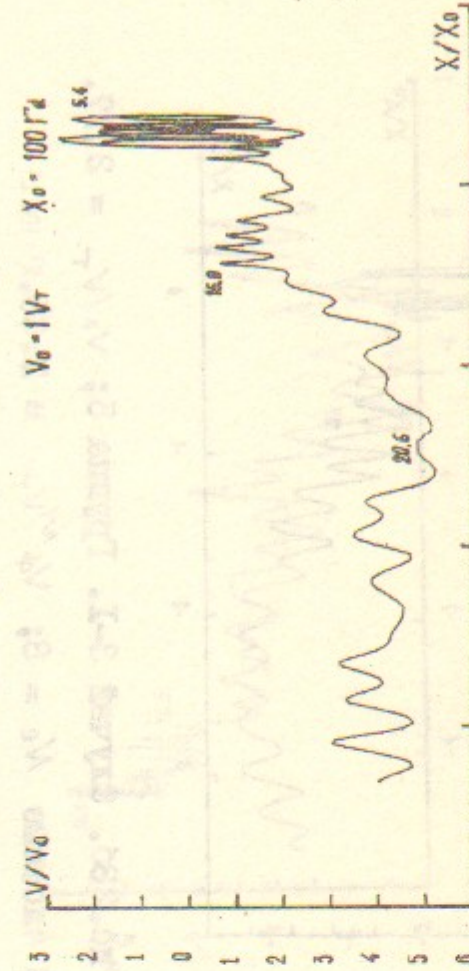
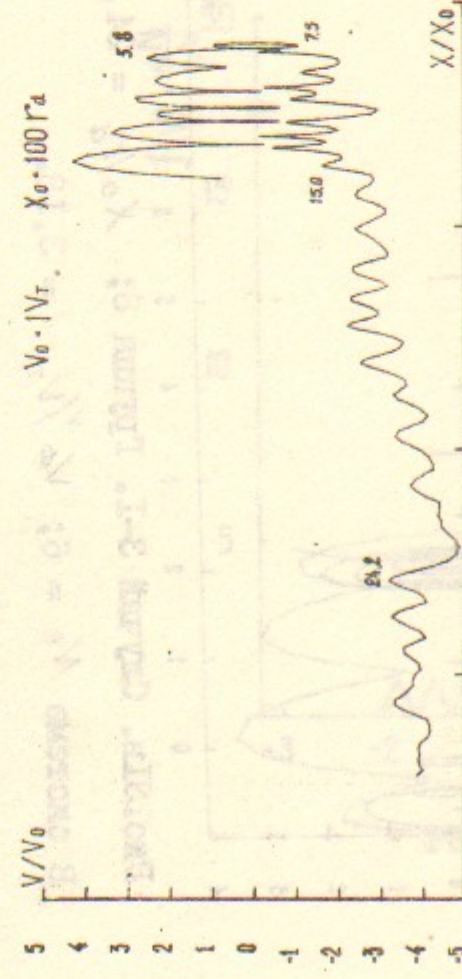


Рис.29г. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/r_d = 23,7$.
В системе $N_e = 8$; $V_\phi^N/V_T = 2,65$.



85 **Рис.30а.** Случай 3-1. Груша 8; $X_0/r_d = 21$.
В лабор. системе.

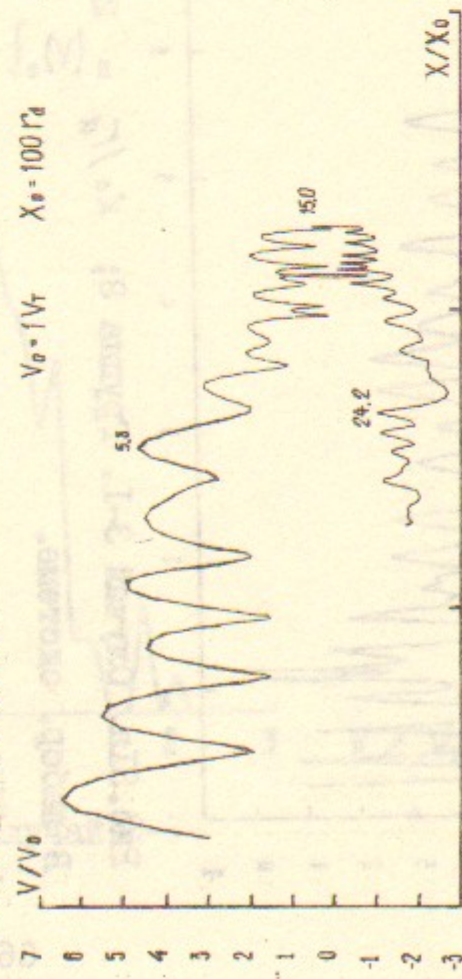


Рис.30в. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/r_d = 21$.
В системе $N_e = -13$; $V_\phi^N/V_T = -2,12$.

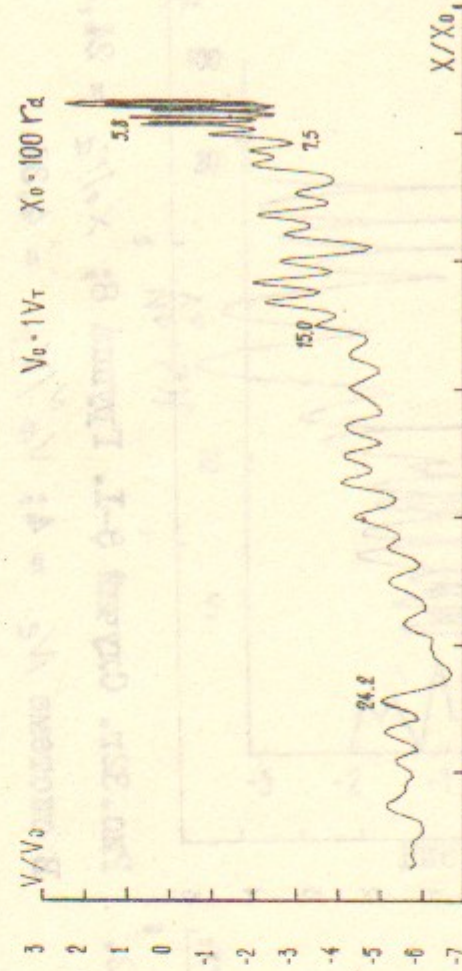


Рис.30б. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/r_d = 21$.
В системе $N_e = 22$; $V_\phi^N/V_T = 1,88$.

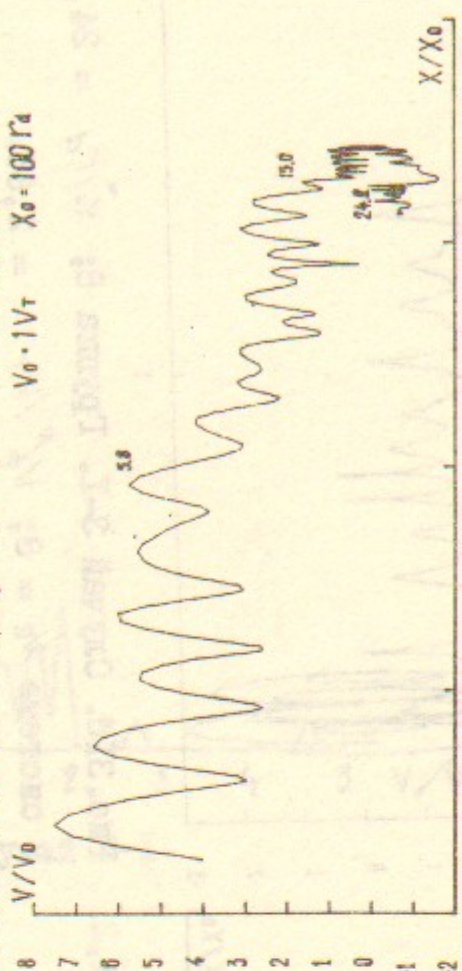


Рис.30г. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/r_d = 21$.
В системе $N_e = -6$; $V_\phi^N/V_T = -3,18$.

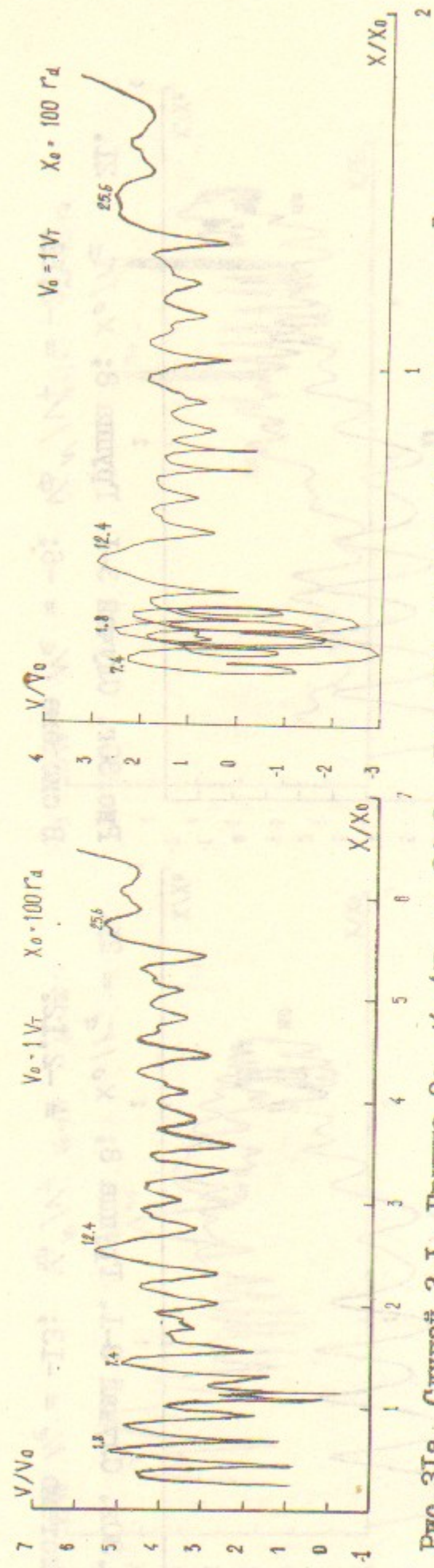


Рис. 31а. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/\Gamma_d = 24,2$.

В лабор. системе.

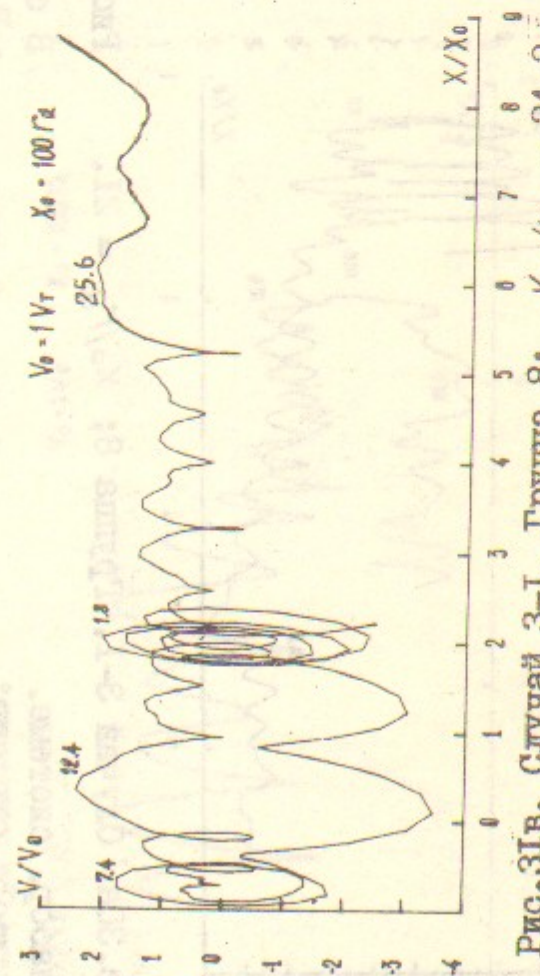


Рис. 31б. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/\Gamma_d = 24,2$.

В системе $N_e = 6$; $V_\phi/V_T = 3,18$.

В системе $N_e = 8$; $V_\phi/V_T = 2,65$.

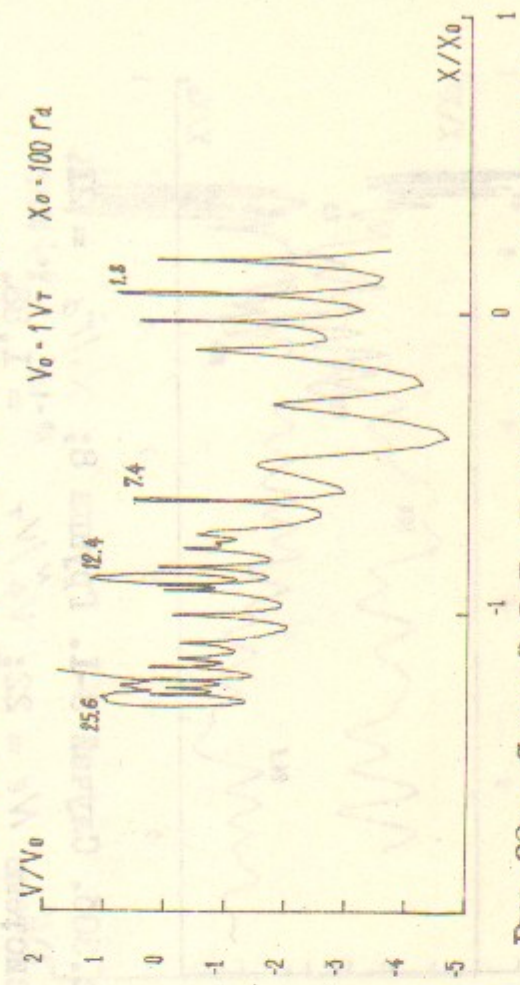


Рис. 32г. Случай 3-1. Груша 8; $X_0/\Gamma_d = 24,2$.

В системе $N_e = 4$; $V_\phi/V_T = 4,36$.

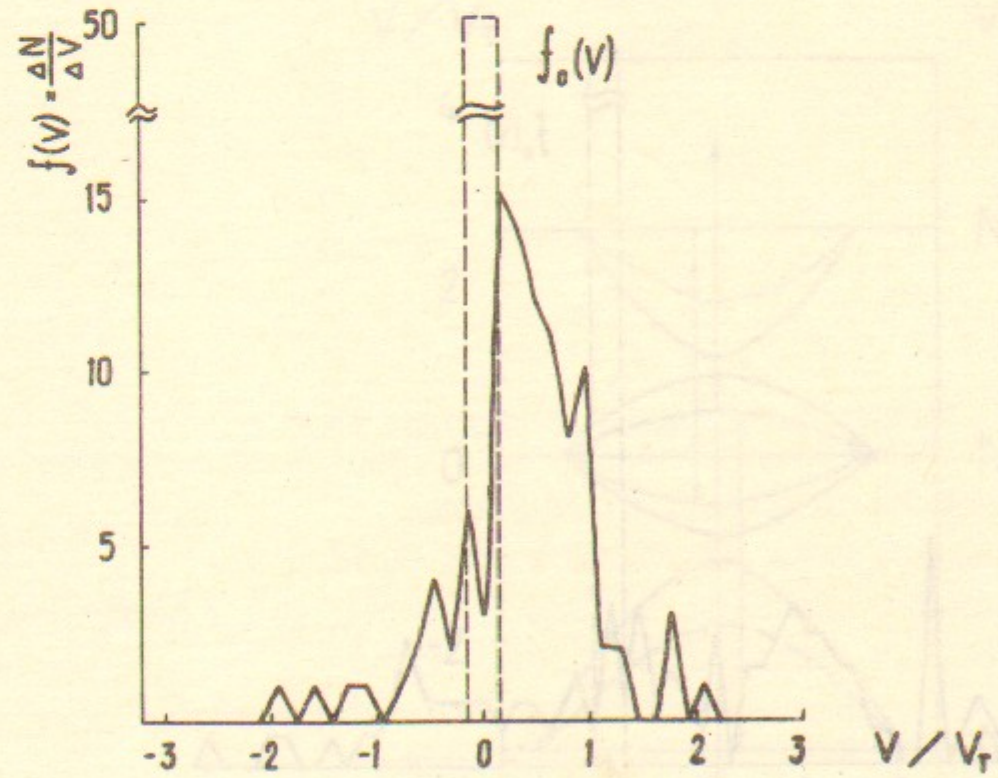


Рис. 32а. Случай 2-1.

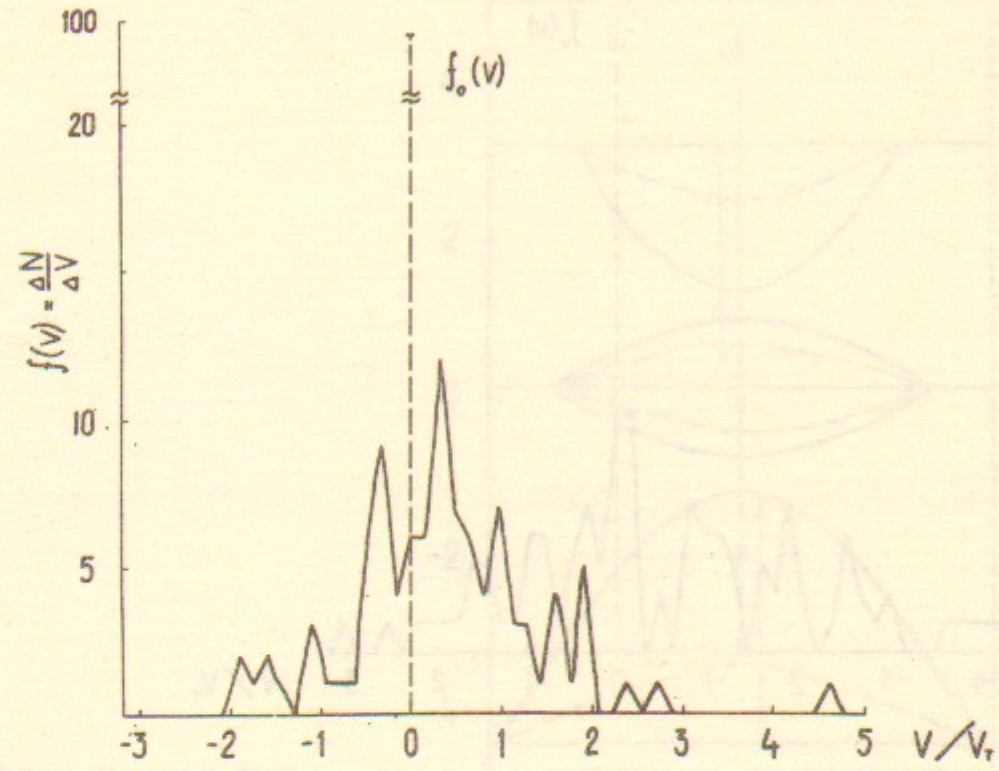


Рис. 32б. Случай 2-1.

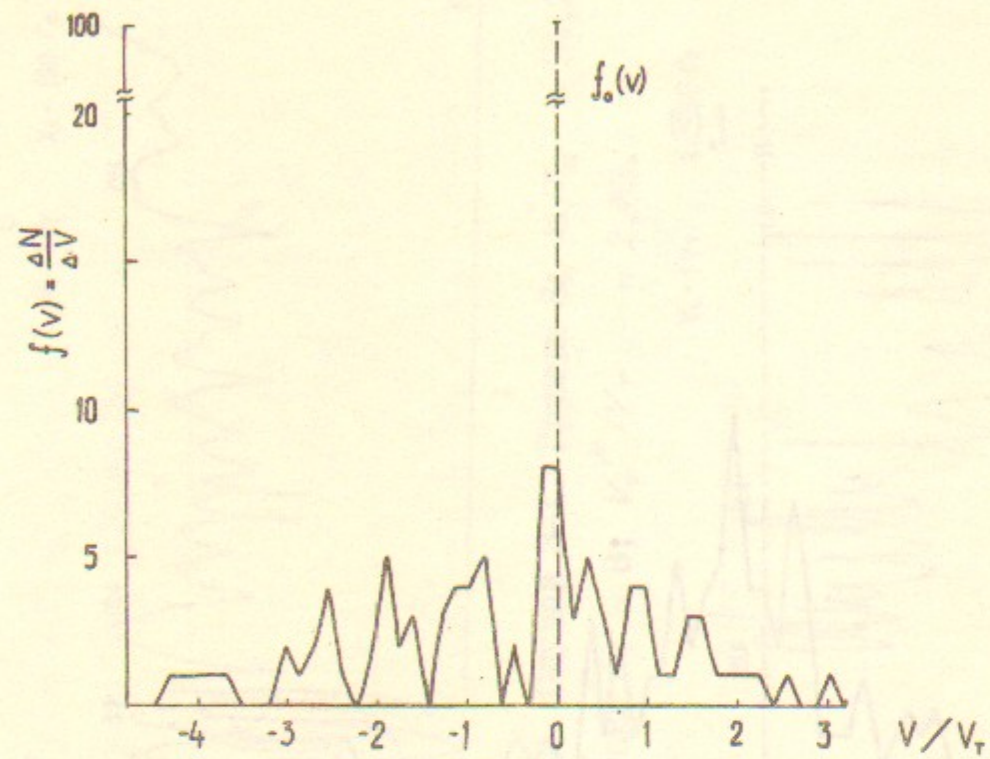


Рис. 32в. Случай 3-1.

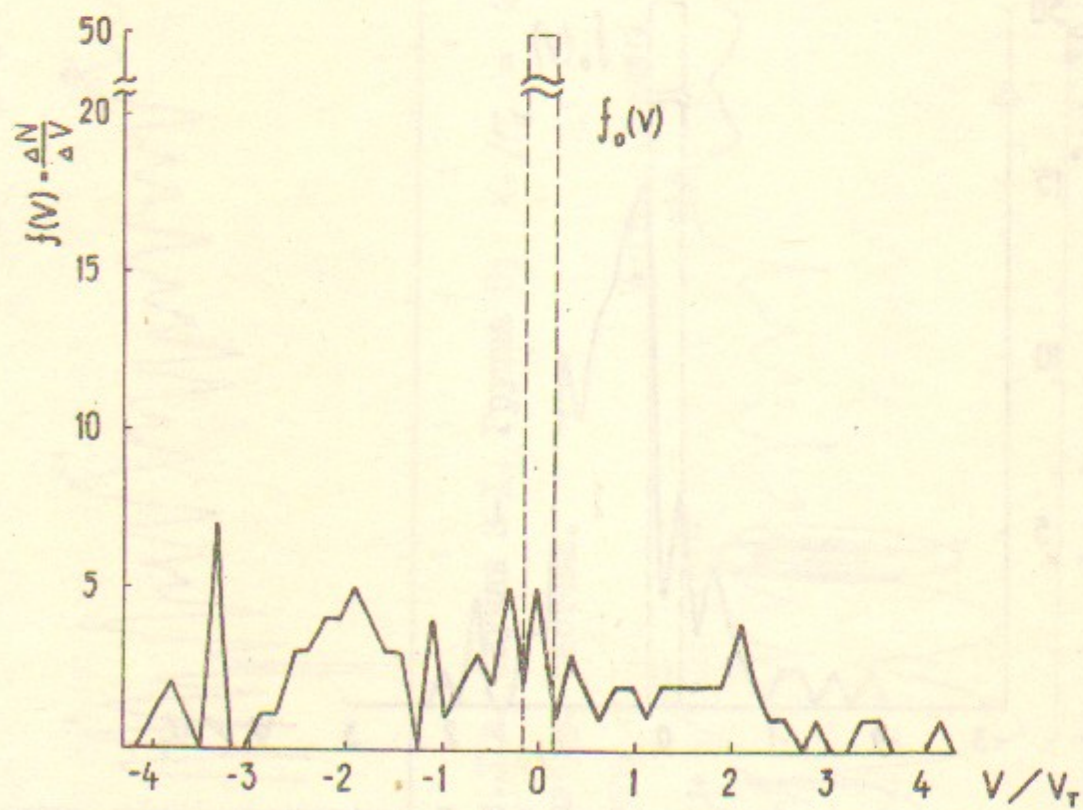


Рис. 32г. Случай 3-1.

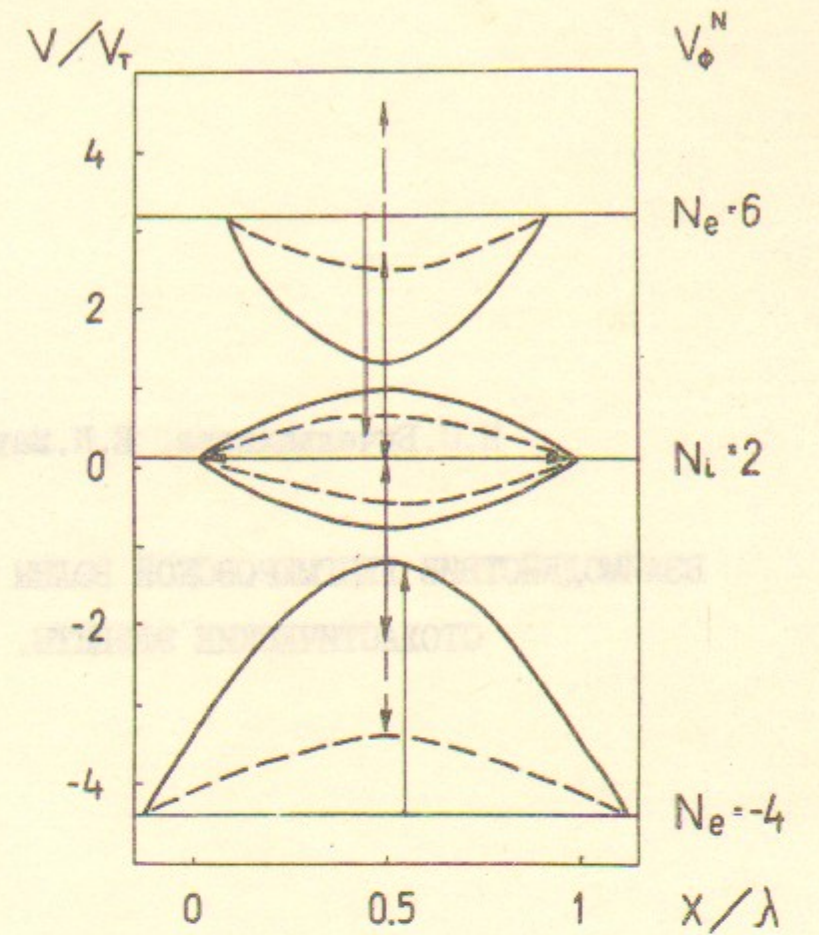


Рис. 33а. Случай 2-1.

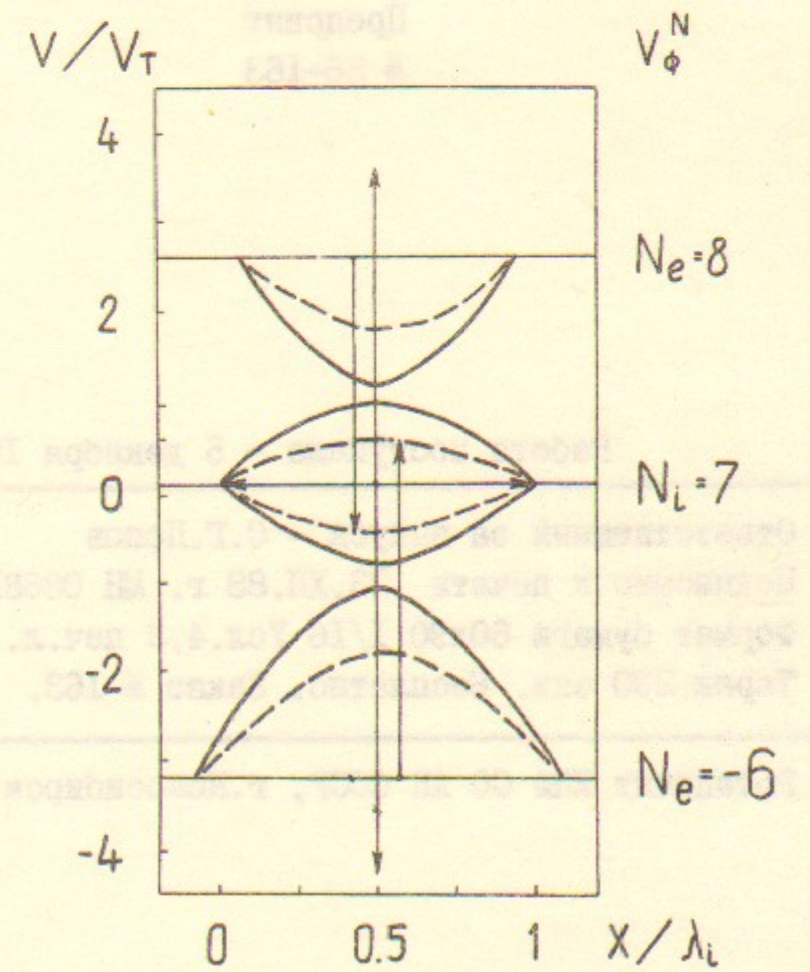
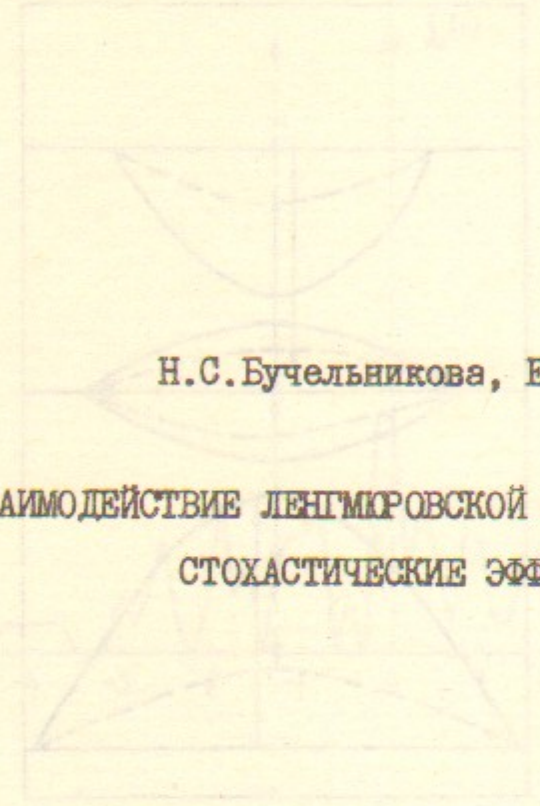


Рис. 33б. Случай 3-1.



Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ВОЛНЫ С ИОННО-ЗВУКОВОЙ.

СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. II.

Препринт
№ 88-163



Работа поступила - 5 декабря 1988 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 23.XII.88 г. МН 08681

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.4,3 печ.л., 3,0 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 163.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90