

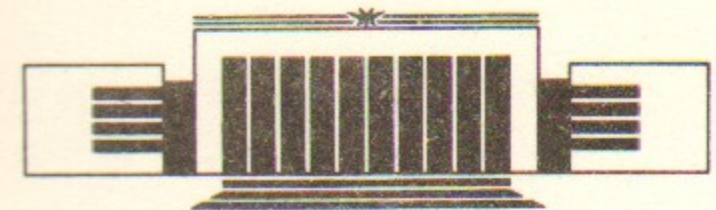


26
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

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

ПРЕПРИНТ 89-36



НОВОСИБИРСК

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

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 ($E_0^2/8\pi nT = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $v_\phi/v_T = 16$; $N_e = 1$) с ионно-звуковой (случай 4-1: $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 10$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 10$; случай 3-2: $\tilde{n}/n_0 = 0,67$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $N_i = 7$). В случае 4-1 ионно-звуковая волна сильно-нелинейная, в случае 3-2 она опрокидывается и устанавливается волна меньшей амплитуды.

Конверсия ленгмюровской волны на ионно-звуковой приводит к генерации гармоник $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3, \dots$. В случае 4-1 из-за сильного затухания гармоник конверсии значительная часть энергии остается в волне $N_e = 1$, что приводит к развитию модуляционной неустойчивости. Затухание поля определяется захватом электронов основными ($\beta = 1$) гармониками конверсии 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 $N_i - (N_e - \beta N_i)$, а в случае 3-2 также сильной стохастической неустойчивостью в районе $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$. В случае 4-1 существенна также сильная стохастическая неустойчивость в районе областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости.

Развитие этих стохастических неустойчивостей приводит к нагреву основной массы электронов. В случае 3-2 практически вся энергия поглощается нагревом. В случае 4-1 нагревом поглощается основная часть энергии гармоник конверсии ($\sim 0,4$ энергии начальной волны). Остальная часть энергии ($\sim 0,6W_w^0$) поглощается "дальними" хвостами при развитии сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости.

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

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 ($E_0^2/8\pi nT = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $V_{ph}/V_T = 16$; $N_e = 1$) and ion-sound wave (case 4-1: $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 10$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 10$; case 3-2: $\tilde{n}/n_0 = 0,67$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $N_i = 7$). In the case 4-1 the ion-sound wave is nonlinear, in the case 3-2 it breaks.

The conversion of the Langmuir wave on the ion-sound wave leads to the excitation of Langmuir wave modes $N = N_e \pm \beta N_i$

$\beta = 1, 2, 3, \dots$. In the case 4-1 due to the strong damping of the conversion modes an essential part of the energy remains in the initial wave $N_e = 1$. This leads to the evolution of the modulational instability.

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 $N_i - (N_e - \beta N_i)$ and in the case 3-2 in the trapping regions $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$ is also essential. In the case 4-1 the large scale stochasticity in the trapping regions of the modulational instability modes is essential.

The evolution of the large scale stochasticity $N_i - (N_e + \beta N_i)$, $N_e - (N_e - \beta N_i)$, $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$ leads to the heating of the main part of the electrons. In the case 3-2 practically all the energy is absorbed by the heating. In the case 4-1 the main part of the conversion modes energy is absorbed by the heating ($\sim 0,4$ of the initial wave energy W_w^0). The energy $\sim 0,6 W_w^0$ is absorbed by the "long" tails of the distribution function due to the large scale stochasticity in the trapping regions of the modulational instability modes.

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

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

Настоящая работа является продолжением и составной частью работы I, II /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 $E_0^2/8\pi nT = 1,6$; $\lambda_e/r_d = 100$; $V_{ph}^N/V_T = 16$; $N = \lambda_e/\lambda_i = 1$ с ионно-звуковой волной с параметрами $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 50-20-14,3$; $N_i = \lambda_e/\lambda_i = 2-5-7$ (случаи I-I (I), 2-I (II), 3-I (II)). Было показано, что стохастические эффекты проявляются в развитии стохастической неустойчивости движения электронов - развитии стохастических слоев в районе областей захвата ионно-звуковой волны и гармоник конверсии $N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, \dots$. Стохастический слой основных гармоник конверсии ($\beta = 1, 2$) занимает практически всю область захвата гармоники. Стохастический слой ионно-звуковой волны в случае I-I сосредоточен вблизи сепаратрисы, в случае 2-I занимает почти всю, а в случае 3-I - всю область захвата. Стохастические слои гармоник конверсии и ионно-звуковой волны в случае I-I не пересекаются, в случае 2-I начинают пересекаться, в случае 3-I сильно перекрываются. В результате в случаях 2-I и 3-I развивается сильная стохастическая неустойчивость в районе областей захвата ионно-звуковой волны и прямой $N_e + N_i$ или обратной $N_e - N_i$ гармоники конверсии, что приводит к нагреву электронов плазмы. В случае I-I нагрева практически нет, в случае 2-I нагрев значительно меньше, чем в случае 3-I /2/. В работе /1/ показано, что во всех случаях затухание ленгмюровских волн обусловлено захватом электронов гармониками конверсии и ионно-звуковой волной и развитием стохастической (или сильной стохастической) неустойчивости в районе их областей захвата. В зависимости от начальных параметров ионно-звуковой волны и, соответственно, от параметров гармоник конверсии стохастическая неустойчивость приводит к образованию "ближних" хвостов функции распределения

по скоростям или (и) к нагреву электронов.

В работе /1/ показано, что в развитии стохастической неустойчивости могут играть роль эффекты ионной нелинейности (двойные электрические слои и т.п.). В настоящей работе рассматриваются случаи 4-1 и 3-2, когда задается сильно-нелинейная ионно-звуковая волна: случай 4-1 $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 10$; $N_i = 10$; случай 3-2 $\tilde{n}/n_0 = 0,67$; $\lambda_i/r_d = 14,3$; $N_i = 7$. В случае 4-1 ионно-звуковая волна является сильно-нелинейной, в случае 3-2 - волна опрокидывается /3/.

Случай 4-1 относится к серии уже рассмотренных случаев 1-1 - 3-1. В этой серии изменяется длина волны ионно-звуковой волны. В случае 4-1 задается самая коротковолновая волна. Помимо нелинейности этой волны этот случай интересен тем, что гармоники конверсии имеют малую фазовую скорость $|V_\phi^N/V_T| \leq 2,4-2,6$. Можно было бы ожидать, что в этом случае определяющую роль будет играть затухание Ландау. Однако, оказывается, что и здесь главную роль в затухании играют стохастические эффекты. Гармоники конверсии уже при малой амплитуде достигают границы захвата электронов /4/, в результате сильного затухания их максимальная амплитуда тоже мала. В результате исходная ленгмювская волна передает в гармоники конверсии только часть энергии, развивается модуляционная неустойчивость волны $N_e = 1$ и оставшаяся энергия поглощается при развитии сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости, что приводит к образованию "дальних" хвостов функции распределения /5,6/. В районе областей захвата ионно-звуковой волны и гармоник конверсии $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$ также развивается сильная стохастическая неустойчивость, которая приводит к нагреву плазмы. При ее развитии заметную роль играют эффекты ионной нелинейности.

Случай 3-2 относится к серии, в которой изменяется начальная амплитуда ионно-звуковой волны. Эта серия рассмотрена в работе /2/. В этой работе мы рассматриваем только случаи 3-1 и 3-2. В случае 3-2 начальная амплитуда ионно-звуковой волны велика. Это приводит к быстрой перекачке энергии ленгмювской волны в гармоники конверсии за время пока развивается опрокидывание ионно-звуковой волны. Амплитуда гармоник конверсии нарастает до большой величины, так что области захвата этих гармоник и ионно-звуковой волны пересекаются. Однако, из-за сильно-

го затухания при захвате электронов амплитуда гармоник падает и в дальнейшем стохастические неустойчивости развиваются подобно случаю 3-1. Также как в случае 3-1 основная доля энергии в этом случае идет на нагрев электронов.

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

Рассмотрим развитие неустойчивости ленгмювской волны в случаях 4-1 и 3-2 (ранее они рассматривались в работе /2/: случай 4-1 в работе /2/ обозначен как случай 3-2; случай 3-2 - как случай 2-4). 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 $N_i = 10$ 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 разные моменты времени.

При развитии неустойчивости ленгмювской волны в случае 4-1 заметную роль, а в случае 3-2 основную роль играет конверсия этой волны на ионно-звуковой волне /7,8/, которая приводит к генерации гармоник ленгмювской 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.

Рассмотрим случай 4-1. В этом случае конверсия приводит к возбуждению основных гармоник - прямой волны $N_e = 11$ и обратной волны $N_e = -9$. Фазовые скорости их малы - $V_\phi^N/V_T \sim 2,26$ и $-2,48$, так что захват электронов начинается уже при малой амплитуде в $t/T_{oe} \sim 0,2-0,5$. Это приводит к затуханию (Рис.1а), так что максимальная амплитуда гармоник конверсии тоже невелика и области захвата гармоник не пересекаются с ионно-звуковой волной (Рис.2а, таблица 1). На фазовых плоскостях электронов (Рис.4а) в $t/T_{oe} \sim 1-2$ видны характерные структуры, связанные с зах-

ТАБЛИЦА 1

Параметры ионно-звуковой волны и гармоник конверсии
Случай 4-1.

β	N	$\frac{\lambda}{l_d}$	$\frac{V_\phi}{V_T}$	$\frac{V_{\beta m}^N}{V_T}$	$\frac{t_{max}}{T_{oe}}$	$\frac{V_{\phi+V_{\beta m}}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi-V_{\beta m}}^N}{V_T}$	$\frac{T_B^N}{T_{oe}}$	$\frac{t}{T_{oe}}$	$\frac{V_{\beta t}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi+V_{\beta t}}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi-V_{\beta t}}^N}{V_T}$
N_i	10	10	0,0847	0,89	0	0,98	-0,81	3,6	34	0,41	0,50	-0,33
$N_e + \beta N_i$	1	11	9,1	2,26	2,8	0,9	1,3	3,2	34,3	0,6	2,8	1,7
$N_e - \beta N_i$	1	-9	11,1	-2,48	4,5	1,0	-1,5	3,6	34,1	0,6	-1,9	-3,1
	2	-19	5,3	-1,93								
	3	-29	3,5	-1,82								

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

ТАБЛИЦА 2

Параметры ионно-звуковой волны и гармоник конверсии
Случай 3-2.

β	N	$\frac{\lambda}{l_d}$	$\frac{V_\phi}{V_T}$	$\frac{V_{\beta m}^N}{V_T}$	$\frac{t_{max}}{T_{oe}}$	$\frac{V_{\phi+V_{\beta m}}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi-V_{\beta m}}^N}{V_T}$	$\frac{T_B^N}{T_{oe}}$	$\frac{t}{T_{oe}}$	$\frac{V_{\beta t}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi+V_{\beta t}}^N}{V_T}$	$\frac{V_{\phi-V_{\beta t}}^N}{V_T}$
N_i	7	14,1	0,0915	1,64	0	1,73	-1,5	2,8	28	0,67	0,76	-0,58
$N_e + \beta N_i$	1	8	12,5	2,65	0,5	1,8	4,5	2,2	28	0,5	3,1	2,2
	2	15	6,7	2,03								
$N_e - \beta N_i$	1	-6	16,7	-3,18	0,5	2,4	-0,8	2,2	28,1	1,0	-2,2	-4,1
	2	-13	7,7	-2,12								
	3	-20	5	-1,91								

Пояснения - см. таблицу 1.

ватом электронов гармониками $N_e = 11$ и -9 . Позже ($t/T_{oe} \sim 4-12$) электроны в областях захвата этих гармоник перемешиваются. По кривым Рис.1а видна стадия более быстрого ($t/T_{oe} \sim 0,5-3$) и более медленного ($t/T_{oe} \sim 3-15$) затухания.

Из Рис.2а видно, что амплитуда основной волны при возбуждении гармоник конверсии меняется незначительно. Из Рис.2а,3а видно, что с течением времени развивается модуляционная неустойчивость волны $N_e = 1$, которая проявляется в генерации гармоник ленгмюровской волны $N_e = 2, 3, \dots$. В динамическом описании модуляционная неустойчивость проявляется в концентрации поля во впадине плотности с характерным масштабом $\Delta x/\lambda_e \lesssim 0,5$ (Рис.3а - впадина на $x/r_d \sim 90-0-30$). Новая стадия затухания поля начинается в $t/T_{oe} \sim 14-16$ (Рис.1а), когда начинается захват и ускорение электронов (Рис.4а), связанные с развитием сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости. Этот процесс подробно рассматривался ранее /6/, здесь мы не будем им заниматься. Отметим еще, что возбуждение обратных волн $N_e = (-1), (-2), (-3) \dots$ свидетельствует о вторичной конверсии при модуляционной неустойчивости /2,5/. В районе областей захвата этих гармоник также развивается сильная стохастическая неустойчивость.

Функция распределения электронов по скоростям меняется во времени, но к $t/T_{oe} \sim 25-35$ устанавливается и остается практически постоянной. Из Рис.6а видно, что функция распределения заметно отличается от начальной, причем наблюдается и нагрев электронов и образование хвостов. Температура электронов на уровне $v \sim v_T$ или $v \sim 1,7v_T$ (см. /1,2/) одинакова - $T_e/T_e^0 \sim 2,2$. Хвосты функции распределения наблюдаются в области $v > 0$ и $v < 0$. Максимальные скорости электронов $v_{max}/v_T \sim 21,8$ и $v_{min}/v_T \sim -19,7$ превышают фазовую скорость гармоник $N_e = 1$ и -1 ($v_{\phi}^{\pm}/v_T \sim \pm 16$).

Анализ энергии электронов в интервале скоростей, соответствующем уровню $f(v)/f(0) \leq 0,1$ или $> 0,1$ (см. II /1/, /2/) показывает, что хвостами функции распределения ($f(v)/f(0) > 0,1$) поглощается большая часть энергии $\delta W_t/W_w \sim 0,61$, а на нагрев ($f(v)/f(0) \leq 0,1$) идет $\delta W_h/W_w \sim 0,38$ (W_w - энергия, потерянная волной к моменту t ; $W_w^0 - 2W_E(t)$, W_w^0 - начальная энергия волны, $2W_E(t)$ - остаточное поле плюс возмущение электронов в момент t ; $W_w^0 = 3,6W_e^0$).

Остановимся еще на вопросе о ионной нелинейности. По фазовым плоскостям ионов (Рис.4б) видно укрупнение волны в $t/T_{oe} \sim 4-8$. На укрупненном фронте волны возникает скачок плотности и скачок потенциала - двойной электрический слой /9/. Фронты скорости возникают также в области $v < 0$ в $t/T_{oe} \sim 8-10$, свидетельствуя о "схлопывании" впадин плотности. Эти фронты встречаются в $t/T_{oe} \sim 16$. При этом ускоряется (захватывается ионно-звуковой волной) некоторая часть ионов. В дальнейшем процесс возникновения, сближения и встречи фронтов повторяется (Рис.4б). Одновременно развивается длинноволновое возмущение ($x/r_d \sim 90-0-30$), обусловленное действием пондеромоторной силы при развитии модуляционной неустойчивости основной волны и вторичной конверсии. После затухания поля ленгмюровских волн в $t/T_{oe} \geq 20-25$ на краях впадины плотности формируются фронты плотности и возникают двойные слои (Рис.3а, Рис.4б, $t/T_{oe} \sim 34$).

Рассмотрим развитие неустойчивости ленгмюровской волны в случае 3-2. Отличительной чертой этого случая является сильная нелинейность ионно-звуковой волны /2,3/. Уже в $t/T_{oe} \sim 1-4$ волна сильно укрупняется (Рис.5б), причем на фронте формируется скачок плотности и скачок потенциала - двойной электрический слой. В $t/T_{oe} \sim 4-8$ развивается x -опрокидывание /9/, которое приводит к захвату и ускорению значительной части ионов (Рис.5б). Развитие x -опрокидывания за $t/T_{oe} \sim 5-10$ приводит к существенному изменению и уменьшению возмущения плотности (Рис.3б) и к уменьшению амплитуды гармоники $N_e = 7$ (Рис.2б). Однако, конверсия развивается быстрее. За $t/T_{oe} \sim 2$ заметная доля энергии основной волны $N_e = 1$ перекачивается в гармоники конверсии. Амплитуда гармоник конверсии основных $N_e = 8$ и $N_e = -6$ достигает максимума уже в $t/T_{oe} \sim 0,5$, причем амплитуда такова, что области захвата гармоник конверсии пересекаются с областью захвата ионно-звуковой волны. В динамическом описании конверсия проявляется в модуляции ленгмюровской волны и концентрации поля во впадинах плотности (Рис.3б).

В /2/ было показано, что опрокидывание ионно-звуковой волны не сказывается существенно на начальной стадии конверсии до $t/T_{oe} \sim 3$. К этому времени основная часть энергии поля поглощается электронами (Рис.1б). По фазовым плоскостям электронов видно сильное возмущение скоростей и захват электронов гармоник

ками $N_e = 8$ и $N_e = (-6)$ уже в $t/T_{oe} \sim 0,5-1$ (Рис.5а). В дальнейшем в $t/T_{oe} \sim 2-10$ идет интенсивное перемешивание электронов в районе областей захвата (Рис.5а). При этом наблюдается дальнейшее более медленное уменьшение энергии поля (Рис.16).

Отметим, что модуляционная неустойчивость основной волны в этом случае не играет существенной роли, хотя и приводит к генерации гармоник $N_e = 2, 3, \dots$

Анализ функции распределения по скоростям (Рис.66) показывает, что основная доля энергии волны идет на нагрев электронов - $\delta W_e/W_e \sim 0,8$ ($W_e \approx W_e^0 = 3,6 W_e^0$). Хвосты функции распределения ($f(v)/f(0) > 0,1$) поглощают только $\delta W_e/W_e \sim 0,1$. Отметим, что в этом случае заметная доля энергии поглощается ионами - $\delta W_i/W_e \sim 0,1$. Температуры электронов на уровне $v \sim v_T$ или $v \sim 1,7 v_T$ (см. /1,2/) в этом случае несколько различаются - $T_e(v_T)/T_e^0 \sim 3,1$; $T_e(1,7 v_T)/T_e^0 \sim 3,6$. Максимальные скорости электронов в этом случае невелики - $v_{max}/v_T \sim 7,5$; $v_{min}/v_T \sim -5,9$.

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.7-16 (случай 4-1) и Рис. 17-26 (случай 3-2). На Рис.27 показаны функции распределения по скоростям групп пробных частиц. Начальные координаты пробных частиц приведены в таблице 3 (случай 4-1) и 4 (случай 3-2). Положение узлов x_1, x_2 и максимума x_m сепаратрисы ионно-звуковой волны в случаях 4-1 и 3-2 приведены в таблицах 3,4.

Рассмотрим траектории частиц в случае 4-1. 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, в каждой группе находятся частицы, захваченные в ионно-звуковую волну, несмотря на сильное возмущение их скоростей полем медленно затухающей гармоники $N_e = 1$ (Рис.76). Однако, таких частиц мало - $\Delta n/n_0 \sim 0,05-0,1$ от числа частиц в этих группах. Подавляющее большинство частиц $\Delta n/n_0 \sim 0,9-0,95$ ($\Delta n/n_0 \sim 0,92-0,96-0,96$ в группах 1-2 и 7) выходит из захвата.

Таблица 3.

Начальные координаты пробных частиц. Случай 4-1.

Узлы сепаратрис $x_1/r_d = 15$; $x_2/r_d = 25$; максимум $x_m/r_d = 20$.
 $(V_{\phi}^i + V_{\phi}^0)/V_T = 0,98$; $(V_{\phi}^i - V_{\phi}^0)/V_T = -0,81$; $V_{\phi}^i/V_T = 8,47 \cdot 10^{-2}$

Группа	1		2		3		4		5;6		7		8		9	
	100	20	2x50	20	0,5	100	20	100	2x50	20	100	100	100	100	100	100
Δn	100	20	2x50	20	0,5	100	20	100	2x50	20	100	100	100	100	100	100
x_0/r_d	100	20	2x50	20	0,5	100	20	100	2x50	20	100	100	100	100	100	100
$(x_0 - x_1)/\lambda_i$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
V_0^0	-1+0,98	4,5+2,5	4,5+2,5	4,5+2,5	4,5+2,5	6+12,9	6+12,9	6+12,9	(13,3+30)	(13,3+30)	(13,3+30)	(13,3+30)	(13,3+30)	(13,3+30)	(13,3+30)	(13,3+30)
V_0^0/V_T	-0,159+0,156	0,72+0,4	0,72+0,4	0,72+0,4	0,72+0,4	0,96+2,06	0,96+2,06	0,96+2,06	(2,12+4,77)	(2,12+4,77)	(2,12+4,77)	(2,12+4,77)	(2,12+4,77)	(2,12+4,77)	(2,12+4,77)	(2,12+4,77)
$V_0^0 - V_{\phi}^i$	-1,532+0,448	3,97+1,97	3,97+1,97	3,97+1,97	3,97+1,97	5,47+12,4	5,47+12,4	5,47+12,4	(12,8+29,5)	(12,8+29,5)	(12,8+29,5)	(12,8+29,5)	(12,8+29,5)	(12,8+29,5)	(12,8+29,5)	(12,8+29,5)
$V_0^0 - V_{\phi}^i / V_{\phi}^0$	-0,27+0,08	0,71+0,35	0,71+0,35	0,71+0,35	0,71+0,35	0,98+2,21	0,98+2,21	0,98+2,21	(2,29+5,26)	(2,29+5,26)	(2,29+5,26)	(2,29+5,26)	(2,29+5,26)	(2,29+5,26)	(2,29+5,26)	(2,29+5,26)
V_{ϕ}^i	-0,27+0,08	0,71+0,35	0,71+0,35	0,71+0,35	0,71+0,35	0,98+2,21	0,98+2,21	0,98+2,21	(2,48+5,45)	(2,48+5,45)	(2,48+5,45)	(2,48+5,45)	(2,48+5,45)	(2,48+5,45)	(2,48+5,45)	(2,48+5,45)

V нормировано на r_d/T_{oe} ; V_0^0 - невозмущенная начальная скорость (для групп 1-6)
 возмущенная начальная скорость $V_0^0 = V_0^0$.

ТАБЛИЦА 4

Начальные координаты пробных частиц. Случай 3-2.

Узлы сепаратрис $X_1/r_d = 7,14$; $X_2/r_d = 21,43$; максимум $X_m/r_d = 14,28$.
 $(V_{\phi}^i + V_{y_0}^i)/V_T = 1,73$; $(V_{\phi}^i - V_{y_0}^i)/V_T = -1,54$; $V_{\phi}^i/V_T = 9,15 \cdot 10^{-2}$.

Группа	1	2	3	4	5	6	7
ΔH	100	4	100	100	50	50	100
X_0/r_d	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	14,3	7,6+20,8
$(X_0 - X_1)/\lambda_i$	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,032+0,96
V_0^0	-1+0,98	4,5+2,5 -(4+1,55)	6+12,9	-(6+12,9)	13,3+30	-(13,3+30)	0
V_0^0/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
$V_0^0 - V_{\phi}^i$	-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
$V_0^0 - V_{\phi}^i$ $V_{y_0}^i$	-0,15+0,039	0,38+0,18 -(0,44+0,21)	0,53+1,2	-(0,64+1,31)	1,24+2,86	-(1,35+2,97)	-0,056

Пояснения - см. таблицу 3.

Причем из захвата выходят частицы из всего диапазона X_0 в группе 7 и V_0 в группах 1 и 2, даже из самого центра области захвата (Рис.7-10). Из-за большого возмущения скорости частиц полем $N_e = 1$ некоторые из них (Рис.7а,9а,10а) сразу становятся пролетными, однако большинство сначала захватывается ионно-звуковой волной и выходит из захвата позже (Рис.7в,г, 8а,г, 9г, 10г).

Дальнейшая судьба частиц, вышедших из захвата различна. Некоторые из них остаются пролетными с $v > 0$ (Рис.7в,8а) или $v < 0$ (Рис.7г,8г), некоторые вновь захватываются ионно-звуковой волной (Рис.8б), снова выходят из захвата и т.д. (Рис.7а, 8в). Некоторая часть частиц, выйдя из захвата ионно-звуковой волной, попадают в захват высокими ($\beta > 1$) или основными ($\beta = 1$) гармониками конверсии $N = N_e \pm \beta N_i$. Так частицы Рис.9а-в из группы 2 и Рис.9г из группы 7 сначала становятся пролетными с $v > 0$, затем попадают в захват и странствуют по областям захвата гармоник конверсии $N_e = 2I$ и II (для частицы Рис.9г приведена только траектория в лабораторной системе, траектории в системе волны $N_e = 2I$ или II похожи на Рис.9б,в). Частицы Рис.10а-в из группы 2 и Рис.10г из группы 7 сначала становятся пролетными с $v < 0$, затем попадают в захват и странствуют по областям захвата гармоник конверсии - обратных волн $N_e = (-19)$ и (-9) (для частицы Рис.10г траектории в системе волны $N_e = (-19)$ или (-9) похожи на Рис.10б,в).

Траектории частиц с близкими начальными координатами оказываются различными и расходятся на фазовой плоскости подобно тому, что наблюдалось в работах I,II /I/. Такой характер траекторий указывает на стохастический характер движения частиц (см. /I,6/). Таким образом, можно утверждать, что и в случае 4-I в районе области захвата ионно-звуковой волны образуется стохастический слой. Этот слой 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 всю область захвата.

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 4-I в этой неустойчивости участвует заметное число частиц. Действительно, из групп I, 2 и 7 в область $V/V_T > 2$ переходит к $t/T_{oe} \sim 30$ 7-I4-6 частиц соответственно, т.е. 27 частиц ($\Delta n/n_0 \sim 0,1$), в область $V/V_T > | -2 | - I-5-5$ частиц соответственно, т.е. II частиц ($\Delta n/n_0 \sim 0,04$).

Проследивая движение групп частиц I, 2, 7 на фазовой плоскости электронов (фазовые плоскости выводились через $I-2 T_{oe}$), можно видеть, что обычно в какой-то момент в районе узла сепаратрисы из захвата выходит группа в несколько частиц. Позже эта группа "растаскивается" по фазовой плоскости, так как некоторые частицы остаются в стохастическом слое ионно-звуковой волны, но имеют разные траектории, а некоторые попадают в стохастический слой гармоник конверсии и тоже расходятся. Выход из захвата в группах 2 и 7 начинается в $t/T_{oe} \sim 2-4$ и усиливается в $t/T_{oe} \sim 10-12$. В группе I выход из захвата начинается в $t/T_{oe} \sim 12$. Отметим, что именно в это время $t/T_{oe} \sim 8-12$ наблюдается сильное укрупнение ионно-звуковой волны (Рис. 4б) и формирование двойных электрических слоев.

С течением времени частицы групп I, 2 и 7 расходятся по фазовой плоскости, довольно равномерно заполняя некоторую область фазового пространства. Границы этой области заметно отличаются от границ области захвата ионно-звуковой волны $(V_{\phi}^i + V_{3\phi}^i)/V_T \sim 1$; $(V_{\phi}^i - V_{3\phi}^i)/V_T \sim -0,8$. Это хорошо видно по функциям распределения $f(V)$ пробных частиц групп 7 (Рис. 27а) и I (Рис. 27б). Видно, что частицы распределились в интервале скоростей $V/V_T \sim (-2) - (+2)$. Такой вид функции распределения свидетельствует о нагреве пробных частиц, что подтверждает нагрев электронов (Рис. 6а).

Отметим, что некоторые частицы в группах I, 2 и 7 ускоряются до больших скоростей $V/V_T \sim 4$, а отдельные частицы из группы 2 даже принимают участие в сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости и ускоряются до $V/V_T \sim 8$. Траектория одной из таких частиц показана на Рис. IIа-г. Эта частица сразу выходит из захвата ионно-звуковой волны, становится пролетной, затем захватывается гармоникой конверсии $N_e = II$ (Рис. IIб) и ускоряется, переходя из захвата в захват гармониками $N_e = 5$ (Рис. IIв), 4, 3 и, наконец $N_e = 2$ (Рис. IIг).

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. Заметное число частиц из этих групп попадает в стохастический слой ионно-звуковой волны. Действительно в $t/T_{oe} \sim 30$ 37 и 3 частицы из групп 3 и 5 имеют скорости $V < V_{\phi}^i$, а 27 и 0 частиц из групп 4 и 6 имеют скорости $V > V_{\phi}^i$. Характерные траектории такого типа частиц из групп 3 и 4 приведены на Рис. I2а-г. В группах 3, 5 и 4, 6 существуют граничные начальные скорости частиц V_{cp} такие, что частицы с $|V_0| > |V_{cp}|$ всегда остаются пролетными относительно ионно-звуковой волны. Некоторая часть частиц с $|V_0| < |V_{cp}|$ имеет траектории типа Рис. I2, т.е. попадает в стохастический слой ионно-звуковой волны. Таким образом, граничные V_0 в группах 3, 5 и 4, 6 могут рассматриваться как верхняя и нижняя границы стохастического слоя. При определении границ слоя 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 $V > V_{\phi}^i$. На Рис. 28а показана область захвата ионно-звуковой волны и стрелки, показывающие верхнюю и нижнюю границы ее стохастического слоя на $X_0 = X_m$. Внутренних границ, как было показано выше, у этого слоя нет. Приведены границы $V_{cp}/V_T \sim (+2)$ и (-2) , ограничивающие область V_0 , из которой в стохастический слой попадает значительное число частиц (внутренние стрелки) и $V_{cp}/V_T \sim (+4)$ и (-4) , ограничивающие области (пунктир), из которых в слой попадает несколько частиц (~ 3). Отметим, что в области $V/V_T \sim \pm(2-4)$ попадает заметное число частиц из групп I, 2, 7, так что эти области также можно отнести к стохастическому слою ионно-звуковой волны. Границы этого слоя (верхний и нижний предел) приведены в таблице 5. Как нижний предел нижней границы использована минимальная скорость $V_{min}/V_T = -3,77$ частиц из групп I, 2, 7 в $t/T_{oe} \sim 30$. Для того, чтобы условно разделить слой на верхний и нижний внутренние границы взяты одинаковыми и равными V_{ϕ}^i .

Анализ траекторий частиц из групп 3-8 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, а иногда переходят в стохастический слой ионно-звуковой волны. Траектории частиц с близкими начальными координатами различа-

ТАБЛИЦА 5

Границы и ширина стохастических слоев
Случай 4-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	2,04	2,0	4,7		-0,24	2,2
	3,58 ^x	3,5	8,5			
<u>Внутренняя</u> Внутренняя / электроны/ <u>Нижняя граница</u> Внешняя	0,085				-2,48 ^{xxx}	3,8
	-1,98	2,1	5,0	-0,45	2,7	4,8
<u>Внутренняя</u> Внутренняя / электроны/	-3,77 ^{xx}	3,9	9,4			
	0,085			2,26 ^{xxx}		

V_{cp} - граница стохастического слоя; Δ - ширина стохастического слоя; $V_{\Delta t}^N = 2\sqrt{\epsilon_0 N / \mu_0}$ в $t/T_{oe} \sim 30$.

x - в интервале $V_0/V_T \sim (2,04-3,58)$ переходят в $V < V_{\phi}^i$ 3 частицы.

xx - по V_{mi} в группах 1,2,7.

xxx - по фазовой плоскости электронов.

ются и расходятся на фазовой плоскости.

Характерные траектории частиц из групп 8 ($V_0/V_T = 2$, разные X_0) и 9 ($V_0/V_T = -2$, разные X_0) приведены на Рис.13-16. Мы не приводим здесь аналогичные траектории частиц из групп 3-6, так как они практически не отличаются от приведенных. Характерные траектории частиц из групп 3,4, переходящих в стохастический слой ионно-звуковой волны, приведены на Рис.12а-г. Некоторые частицы из групп 3,5,8 остаются в стохастическом слое основной гармонике конверсии $N_e = II$ (Рис.13г), а частицы из групп 4,6,9 - в слое $N_e = -9$ (Рис.14г). Некоторые частицы странствуют по областям захвата гармоник $N_e = II$ и $N_e = 2I$, $\beta = 2$ (Рис.15а,б) или $N_e = -9$ и $N_e = -19$, $\beta = 2$ (Рис.15в,г). Есть частицы, которые после таких странствий попадают в стохастический слой ионно-звуковой волны. Например, в этот слой попадает частица из группы 8 (Рис.13а-в) после странствий по областям захвата гармоник $N_e = II$ и $2I$ и частица из группы 9 (Рис.14а-в) после странствий по областям захвата гармоник $N_e = (-9)$ и (-19) . Траектории такого типа указывают на сильную стохастическую неустойчивость в районе областей захвата гармоник $N_e = II$ или $N_e = -9$ и ионно-звуковой волны. Как мы отмечали выше, в этой неустойчивости участвует заметное число частиц из групп 3 и 4. Участвует в ней и заметное число частиц из групп 8 и 9. Действительно, в $t/T_{oe} \sim 30$ 16 частиц из группы 8 имеют скорости $V < V_{\phi}^i$, а 3I частица, из группы 9 имеет скорости $V > V_{\phi}^i$.

По поведению групп пробных частиц на фазовой плоскости видно, что эта неустойчивость проявляется для групп 3,4 в $t/T_{oe} >$

14-20, когда становится существенным укрупнение ионно-звуковой волны, а для групп 8,9 в $t/T_{oe} > 20-25$, когда становятся существенными эффекты ионной нелинейности, связанные с модуляционной неустойчивостью, - фронты (и двойные слои) на $X/r_d \sim 90-100$ и 20-30 (см. Рис.3а,4б).

Некоторые частицы из групп 3,5,8 переходят из стохастического слоя гармоник конверсии $N_e = II$ в слои гармоник модуляционной неустойчивости и странствуют по областям захвата этих гармоник. Некоторые частицы из групп 4,6,9 переходят из слоя гармоник конверсии $N_e = -9$ в слои гармоник вторичной конверсии. Так частица из группы 8 Рис.16а-г странствует по областям захвата гармоник $N_e = II$, 5 и 4, набирая энергию. Заметное чис-

до частиц из групп 3,5,8 имеет траектории подобные частице из группы 2 Рис.11а-г и ускоряется до больших скоростей. Траектории такого типа свидетельствуют о развитии сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости или вторичной конверсии. В случае 4-I эти неустойчивости играют существенную роль, приводя к образованию хвостов $V > 0$ и $V < 0$ функции распределения (Рис.6а) и к поглощению заметной доли энергии ленгмюровских волн ($\delta W_e / W_w \sim 0,6$).

Существует 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 свидетельствуют о сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата волн ($N_e + \beta N_i$) - $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Однако, в случае 4-I 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 и из группы 8 в область слоя гармоник $N_e - \beta N_i$ ($v/v_T > 1-2$) переходит всего по 2 частицы, и из группы 4 и из группы 9 в область слоя гармоник $N_e + \beta N_i$ ($v/v_T > 2$) - тоже по 2 частицы. В группах 5 и 6 таких переходов нет.

Стохастический слой гармоник конверсии $N_e = II$ и $N_e = -9$ будем определять подобно I, II /I/, как область начальных координат V_0 (V_0 вне конечной области захвата соответствующей гармоник), 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 4-I существенную 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_{cp} такие, что часть частиц с $|V_0| < |V_{cp}|$ попадает в $t/T_{oe} \sim 30$ в область $|V| > |V_{\phi}^N|$, т.е. в стохастический слой гармоник конверсии $N_e = II$ или $N_e = -9$. Эти V_{cp} дают нижнюю границу стохастического слоя гармоник $N_e = II$ и верхнюю границу слоя гармоник $N_e = -9$ на $X = X_m$. Эти границы показаны стрелками на Рис.28а и приведены в таблице 5. Внутренних границ у обоих слоев нет, поэтому мы полагаем эти границы равными соответствующей фазовой скорости V_{ϕ}^N . Верхнюю границу слоя гармоник $N_e = II$ и нижнюю границу слоя гармоник

$N_e = -9$ мы не пытались определить, так как их практически невозможно выделить из-за сильной стохастической неустойчивости на гармониках модуляционной неустойчивости и вторичной конверсии.

Из Рис.28а видно, что стохастический слой ионно-звуковой волны и слои гармоник конверсии пересекаются. Это подтверждает вывод о сильной стохастической неустойчивости на волнах $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$.

Анализируя траектории и движение пробных частиц на фазовой плоскости, можно сделать вывод, что в случае 4-I основную роль играет сильная стохастическая неустойчивость на волнах $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$, которая приводит к нагреву основной части электронов ($\delta W_h / W_w \sim 0,38$) и сильная стохастическая неустойчивость на гармониках модуляционной неустойчивости ($V_{\phi}^N > 0$) и вторичной конверсии ($V_{\phi}^N < 0$), которая приводит к образованию хвостов функции распределения ($\delta W_e / W_w \sim 0,6I$). Сравнительно малая доля энергии, которая идет на нагрев в случае 4-I (в случае 3-I при том же механизме нагрева $\delta W_h / W_w \sim 0,93$), обусловлена тем, что из основной волны $N_e = I$ в гармоник конверсии $N_e + \beta N_i$ передается только часть энергии (в случае 3-I практически вся энергия). Именно эта часть энергии в результате сильной стохастической неустойчивости на волнах $N_i - (N_e + \beta N_i)$ и $N_i - (N_e - \beta N_i)$ идет на нагрев электронов. Часть энергии, оставшаяся в $N_e = I$, в результате модуляционной неустойчивости и сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости и вторичной конверсии, поглощается хвостами.

Основные механизмы, которые приводят к стохастической неустойчивости движения электронов мы рассматривали в работах I и II /I/. К образованию стохастического слоя ионно-звуковой волны может привести возмущение поля волны полем основной волны $N_e = I$, полем гармоник конверсии, эффекты, связанные с ионной нелинейностью (образование двойных электрических слоев, затухание волны при захвате ионов и т.п.). К образованию стохастических слоев гармоник конверсии может привести модуляция амплитуды гармоник конверсии при движении захваченных ею электронов, возмущение полем основной волны $N_e = I$, возмущение полем высоких $\beta > 1$ гармоник конверсии, возмущение полем второй основной гармоник конверсии.

Все эти эффекты могут играть и в рассматриваемом случае 4-1. Мы уже отмечали, что в этом случае особенно существенно возмущение полем основной волны $N_e = 1$, так как она затухает гораздо медленнее, чем в случаях 1-1 - 3-1. Возмущение поля ионно-звуковой волны полем гармоник конверсии, по-видимому, играет меньшую роль, так как их амплитуды малы. Зато большую роль играют эффекты ионной нелинейности - в случае 4-1 довольно рано ($t/\tau_{oe} \sim 8-10$) проявляется собственная нелинейность (укручение) ионно-звуковой волны. Кроме того, играет роль затухание ионно-звуковой волны из-за ускорения (захвата) ионов. Новым в этом случае являются эффекты ионной нелинейности, связанные с возмущением плотности, обусловленным модуляционной неустойчивостью. По поведению групп пробных частиц на фазовой плоскости видно, что на фронтах этого возмущения в $t/\tau_{oe} > 20-25$ происходит отражение и рассеяние частиц.

При образовании стохастических слоев гармоник конверсии заведомо существенны модуляция амплитуды и возмущение полем $N_e = 1$. Кроме того, в этом случае существенно возмущение полем гармоник модуляционной неустойчивости (особенно для гармоник $N_e + N_i$) и вторичной конверсии (особенно для гармоник $N_e - N_i$).

Рассмотрим траектории частиц в случае 3-2 (Рис.17-26). Как обычно, начнем с групп 1 и 7 с x_0, v_0 в области захвата (Таблица 4), из группы 2 в этом случае задавались только отдельные траектории. Своеобразие случая 3-2 с большим начальным \tilde{n}/n_0 заключается в быстром росте гармоник конверсии, что приводит к сильному возмущению скоростей электронов. По фазовым плоскостям электронов видно, что при этом группа пробных частиц 7 уже в $t/\tau_{oe} \sim 0,5-2$ разделяется - часть частиц с x_0 , близкими к центру области захвата, остается в захвате ионно-звуковой волной (Рис.17а,б), часть частиц ускоряется в $v > 0$ или $v < 0$ и попадает в захват основными гармониками конверсии $N_e = 8$ (Рис.18а,б) или $N_e = -6$ (Рис.19а,в). Частицы группы 1 вначале (до $t/\tau_{oe} \sim 6$) все захвачены (Рис.20а), хотя их скорости сильно возмущены.

Дальнейшее развитие идет более спокойно и напоминает развитие стохастических неустойчивостей в рассмотренных ранее случаях. Отличие заключается в том, что в $t/\tau_{oe} \leq 15$ частицы

групп 1 и 7 выходят из захвата довольно большими группами. Отметим, что частицы группы 1 начинают выходить из захвата в $t/\tau_{oe} \approx 6-8$, когда укручение ионно-звуковой волны велико (Рис.4б), подобно всем рассмотренным ранее случаям.

С течением времени подавляющее большинство частиц $\Delta n/n_0 \sim 0,9-0,95$ ($\Delta n/n_0 \sim 0,94-0,84$ в группах 1 и 7) выходит из захвата ионно-звуковой волной. Причем из захвата выходят частицы из всего диапазона x_0 в группе 7 и v_0 в группе 1, включая самый центр области захвата.

Дальнейшая судьба частиц, вышедших из захвата, различна. Некоторые из них остаются в стохастическом слое ионно-звуковой волны (Рис.17а,20г), многие попадают в стохастические слои гармоник конверсии $N_e = 8$ или $N_e = -6$. Так частица Рис.17б-г попадает в захват сначала гармоникой $N_e = -13, \beta = 2$, затем основной гармоникой $N_e = -6$ и выходит из захвата, набрав большую скорость $v/v_T \sim -4$. Частица Рис.20а-в странствует по областям захвата $N_e = 15, \beta = 2$ и $N_e = 8$.

Частицы из групп 1,2,7 с самого начала попавшие в захват гармониками конверсии часто остаются в пределах их стохастического слоя, странствуя по областям захвата гармоник с разными β . Так частица Рис.19а-г странствует по областям захвата гармоник $N_e = (-20), \beta = 3; (-13)$ и (-6) . Некоторую роль играют высокие гармоники модуляционной неустойчивости или вторичной конверсии. Так частица Рис.18а-г из захвата гармоникой $N_e = 8$ переходит в сферу влияния гармоник модуляционной неустойчивости и странствует по областям захвата гармоник $N_e = 6$ и 5 . Отметим, что более длинноволновые гармоники модуляционной неустойчивости $N_e < 5$ в случае 3-2 в развитии стохастических эффектов не участвуют.

Некоторая часть частиц, попавших в захват $N_e = 8$ или $N_e = -6$ позже возвращается в стохастический слой ионно-звуковой волны, а отдельные частицы после этого переходят в слой гармоник конверсии $N_e = -6$ или $N_e = 8$ соответственно. Примером может служить траектория частицы из группы 2 Рис.21а-г, с самого начала попавшая в слой $N_e = 8$ и 15 , а затем через слой $N_e = 7$ прошедшая в слой $N_e = -13$. Отметим, что переход траектории из области $v > 0$ в область $v < 0$ в $t/\tau_{oe} \sim 7-8$ имеет вид скачка скорости, характерный для отражения в двойном электрическом слое (см. I,II /1/). Такой же вид имеет траектория частицы Рис.

24в из группы 4. Это показывает, что эффекты ионной нелинейности играют существенную роль.

Стохастический характер движения частиц проявляется в том, что траектории частиц с близкими начальными координатами оказываются различными и расходятся на фазовой плоскости. Таким образом, и в случае 3-2 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. 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 $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Отметим, что в этой неустойчивости участвует значительное число частиц. Действительно, из групп I и 7 в область $v > 2V_T$ переходит к $t/T_{oe} \sim 30$ 17 и 12 частиц соответственно, т.е. 29 частиц ($\Delta n/n_0 \sim 0,15$), в область $v > | -2V_T |$ - 14 и 17 частиц, т.е. 31 частица ($\Delta n/n_0 \sim 0,15$).

Частицы групп I и 7 с течением времени расходятся по фазовой плоскости, практически равномерно заполняя некоторую область фазового пространства. Границы этой области заметно отличаются от границ области захвата ионно-звуковой волны в $t/T_{oe} \sim 30$ (и в $t/T_{oe} = 0$) $(V_{\phi^i} + V_{3\phi^i})/V_T \sim 0,8$ (I, 7) $(V_{\phi^i} - V_{3\phi^i})/V_T \sim 0,6$ (-I, 5). Это хорошо видно по функциям распределения $f(v)$ пробных частиц групп I и 7 (Рис. 27в, г). Видно, что частицы довольно равномерно распределились в интервале $v/V_T \sim (-3) - (+3)$. Такой вид функции распределения свидетельствует о нагреве пробных частиц, что подтверждает нагрев электронов (Рис. 6б) и показывает, что нагрев электронов связан со стохастической неустойчивостью движения частиц. Отметим, что предельные скорости частиц не превышают $V_{max}/V_T \sim 4$, $V_{min}/V_T \sim -5$. Это показывает, что модуляционная неустойчивость и вторичная конверсия в этом случае в отличие от случая 4-1, не играют существенной роли.

Для определения внешних границ стохастического слоя ионно-звуковой волны рассматривались траектории частиц из групп 3, 5 и 4, 6 с V_0 вне области захвата. Заметное число частиц из этих групп (~ половина частиц из групп 3 и 4) попадает в этот слой.

Действительно, в $t/T_{oe} \sim 30$ 45 и 19 частиц из групп 3 и 5 имеют скорости $v < V_{\phi^i}$, а 49 и 0 частиц из групп 4 и 6 имеют скорости $v > V_{\phi^i}$. Характерные траектории приведены на Рис. 22а-г. Также как и в прежних случаях 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 ($V_0 < 0$), которые имеют скорость $v > V_{\phi^i}$. На Рис. 28б показана область захвата ионно-звуковой волны и стрелки, показывающие верхнюю и нижнюю границы ее стохастического слоя на $x_0 = x_m$. Внутренних границ, как было показано выше, у этого слоя нет. Стрелкой $v/V_T \sim -(1,95-4,58)$ показана область v , куда попадает значительное число частиц из групп I и 7 (31 частица с $v/V_T > |-2|$). Естественно отнести эту область к слою ионно-звуковой волны. Границы слоя приведены в Таблице 6. Для того, чтобы условно разделить слой на верхний и нижний внутренние границы взяты одинаковыми и равными V_{ϕ^i} .

Анализ движения групп частиц 3 и 4 на фазовой плоскости показывает, что на начальной стадии $t/T_{oe} \sim 0,5-1$ эти группы полностью захватываются гармониками конверсии $N_e = 8$ и -6 соответственно. В $t/T_{oe} \sim 1,5$ (группа 4) и $t/T_{oe} \sim 3$ (группа 3) заметная часть частиц из этих групп переходит в захват ионно-звуковой волной. Дальнейшее развитие напоминает развитие стохастических неустойчивостей в рассмотренных ранее случаях.

Анализ траекторий частиц из групп 3-6 показывает, что в районе областей захвата гармоник конверсии, основной $\beta = 1$ и более высоких $\beta > 1$, образуются стохастические слои. В этих районах частицы то захватываются, то выходят из захвата, а иногда переходят в стохастический слой ионно-звуковой волны. Траектории частиц с близкими начальными координатами различаются и расходятся на фазовой плоскости.

Характерные траектории частиц, оставшихся в стохастическом слое гармоник конверсии показаны на Рис. 25, 26. Частица Рис. 25а-г из группы 4 блуждает по областям захвата гармоник конверсии $N_e = -20$, $\beta = 3$; $N_e = -13$, $\beta = 2$ и $N_e = -6$. Частица Рис. 26а-г из группы 5 блуждает по областям захвата гармоник $N_e = 22$, $\beta = 3$; $N_e = 15$, $\beta = 2$ и $N_e = 8$.

Некоторые частицы после захвата гармоникой конверсии переходят в стохастический слой ионно-звуковой волны. Например, частицы Рис. 22а, б из группы 3, Рис. 22в из группы 5, Рис. 22г

ТАБЛИЦА 6

Границы и ширина стохастических слоев
Случай 3-2

	Ионно-звуковая волна		Гармоника $N_e + N_i$		Гармоника $N_e - N_i$	
	V_{φ}/V_T	Δ/V_T	V_{φ}/V_T	Δ/V_T	V_{φ}/V_T	Δ/V_T
<u>Верхняя граница</u>						
Внешняя	4,56	4,5	6,7		1,95	5,0
Внутренняя	0,092					5,2
<u>Нижняя граница</u>						
Внешняя	-1,95	2,0	3,0	-1,84	4,5	9,7
Внутренняя	-4,58 ^x	4,6	6,9			
Внутренняя / электроны	0,092			-2,65 ^{xx}		

V_{φ} - граница стохастического слоя; Δ - ширина стохастического слоя; $V_{\varphi}^N = 2 \sqrt{\frac{e\varphi}{mz}}$ в $t/\tau_{oe} \sim 30$.

x - по V_{min} в группах 1, 2, 7.

xx - по фазовой плоскости электронов.

из группы 4. Некоторые частицы, совершив один - два оборота в районе области захвата ионно-звуковой волны возвращаются или переходят в слой гармоник конверсии. Так частица Рис.23а,б из группы 3 из захвата $N_e = 8$ переходит в захват $N_i = 7$, а затем странствует по областям захвата $N_e = 15$. Частица Рис.23в,г из группы 3 из захвата $N_e = 8$ переходит в захват $N_i = 7$, а затем попадает в захват $N_e = -6$. Частицы Рис.24а,б и 24в,г из захвата $N_i = 7$ переходят в захват $N_e = 15$ (Рис.24б) или $N_e = 8$ (Рис.24г). Траектории такого типа указывают на сильную стохастическую неустойчивость в районе областей захвата ионно-звуковой волны и гармоник конверсии $(N_e + \beta N_i) - N_i$ или $(N_e - \beta N_i) - N_i$. Мы уже отмечали, что в неустойчивости такого типа участвует около половины частиц в группах 3 и 4.

Некоторые частицы (например, частицы Рис.21, 23в,г, 24в,г) участвуют в сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата волн $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$. Траектории этих частиц переходят из слоя гармоник конверсии с $V_{\varphi}^N > 0$ (< 0) через слой ионно-звуковой волны в слой гармоник конверсии с $V_{\varphi}^N < 0$ (> 0). В случае 3-2 в этой неустойчивости участвует большее число частиц, чем в случаях 3-1 и 4-1. Действительно, из группы 3 в область слоя гармоник $N_e - \beta N_i$ ($V/V_T > 1-2$) переходит 4 частицы, а из группы 4 в область слоя гармоник $N_e + \beta N_i$ ($V/V_T > 2$) переходит 14 частиц. Так что в этом случае эта неустойчивость играет некоторую роль.

Стохастический слой гармоник конверсии $N_e = 8$ и $N_e = -6$ будем определять, как область V_0 , из которой к $t/\tau_{oe} \sim 30$ частицы попадают в область $|V| > |V_{\varphi}^N|$, т.е. как и в других случаях, в слой гармоник с $\beta = 1$ будем включать слой гармоник с $\beta \geq 2$. Нижняя граница стохастического слоя гармоник $N_e = 8$ и верхняя граница слоя гармоник $N_e = -6$ показаны на Рис.28б стрелками и приведены в таблице 6. Внутренних границ у обоих слоев нет, поэтому мы полагаем эти границы равными соответствующей фазовой скорости.

Мы не определяли специально верхнюю границу слоя $N_e = 8$ и нижнюю границу слоя $N_e = -6$. Их можно определить по максимальной V_{max} и минимальной V_{min} скорости электронов в $f(v)$ (Рис.6б), если считать, что слой $N_e = 8$ включает в себя слой высоких гармоник модуляционной неустойчивости $N \geq 5$, а слой $N_e = -6$ включает слой гармоник вторичной конверсии $N_e \geq |-(3-4)|$. При этом

верхняя граница стохастического слоя гармоник $N_e = 8 - \frac{V_{max}}{V_T} \sim 7,5$; нижняя граница слоя $N_e = -6 - \frac{V_{min}}{V_T} \sim -5,9$.

Из Рис.286 видно, что стохастический слой ионно-звуковой волны и слой гармоник конверсии пересекаются. Это подтверждает вывод о сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата волн $N_i - (N_e + \beta N_i)$ или $N_i - (N_e - \beta N_i)$. Из Рис. 286 видно также, что заметным образом пересекаются слой гармоник конверсии с $V_{\phi}^N > 0$ и $V_{\phi}^N < 0$, подтверждая вывод о возможности сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата $(N_e + \beta N_i) - N_i - (N_e - \beta N_i)$. Как мы отмечали выше, последняя неустойчивость играет некоторую роль в случае 3-2.

Анализируя траектории и движение пробных частиц на фазовой плоскости можно сделать вывод, что в случае 3-2 основную роль 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 $V_{\phi}^N < 0 - N_i - (N_e - \beta N_i)$, которая приводит к нагреву основной части электронов ($\delta W_h/W_w \sim 0,8$; $T_e/T_e^0 \sim 3,2-3,6$).

Своеобразие случая 3-2 заключается в том, что уже на начальной стадии ($t/T_{oe} \sim 0,5-2$) заметное число электронов из области захвата ионно-звуковой волны попадает в области захвата гармоник конверсии в результате сильного возмущения скоростей электронов полем этих гармоник и пересечения их областей захвата (Рис.26). При этом электроны поглощают значительную часть энергии поля, амплитуда гармоник падает. Несколько дольше (до $t/T_{oe} \sim 10$) развивается κ -опрокидывание ионно-звуковой волны, которое приводит к поглощению энергии волны ионами и уменьшению ее амплитуды. В $t/T_{oe} > 10$ амплитуды ионно-звуковой волны и гармоник конверсии, в основном, устанавливаются (Рис.26) и дальнейшее развитие стохастических эффектов происходит подобно случаю 3-1 (см. П /I/).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Взаимодействие ленгмюровской волны с ионно-звуковой. Стохастические эффекты. I,II". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 88-139, № 88-163, 1988;
2. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Неустойчивость ленгмюровских волн в неоднородной плазме. IУ". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 82-53, 1982.
3. 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 ICRIG, v.5, p.738, Düsseldorf, 1983.
4. 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 ICRIG, v.2, p.284, Swansea, 1987; УИ конф. по физике низкотемпературной плазмы, т.1, стр.215, Ташкент, 1987.
5. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. Физика плазмы 7, 383, 1981.
6. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Ленгмюровские волны большой амплитуды. Стохастическая неустойчивость. I,II". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 84-149, № 84-150, 1984; Proc. XVII ICRIG, 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; Phys. Lett. 112A, 330, 1985.
7. P.K.Kaw, A.T.Lin, J.M.Dawson. Phys. Fluids 16, 1967, 1973.
8. N.S.Buchelnikova, E.P.Matochkin Physica Scripta 24, 566, 1973.
9. 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.

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 4-1; б. Случай 3-2.

Рис.2. Зависимость от времени верхней ($v_{\phi}^N + v_{\beta}^N$) и нижней ($v_{\phi}^N - v_{\beta}^N$) границы захвата основной волны $N_e = 1$, ионно-звуковой волны $N_i = 10$ или $N_i = 7$, основных гармоник конверсии и модуляционной неустойчивости.

а. Случай 4-1; б. Случай 3-2.

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. Случай 4-1; б. Случай 3-2.

Рис.4. Фазовые плоскости электронов (а) и ионов (б) в разные моменты времени. Случай 4-1.

Рис.5. Фазовые плоскости электронов (а) и ионов (б) в разные моменты времени. Случай 3-2.

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

а. Случай 4-1, $t/T_{oe} \sim 34$; б. Случай 3-2, $t/T_{oe} \sim 28$.

Пунктир — начальная функция распределения

Рис.7-26. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости.

Рис.7-16. Случай 4-1.

Рис.17-26. Случай 3-2.

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

Рис.27. Функции распределения пробных частиц по скоростям.

а. Случай 4-1, группа 7, $t/T_{oe} \sim 34$.

б. Случай 4-1, группа 1, $t/T_{oe} \sim 34$.

в. Случай 3-2, группа 7, $t/T_{oe} \sim 28$.

г. Случай 3-2, группа 1, $t/T_{oe} \sim 28$.

Рис.28. 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 4-1; б. Случай 3-2.

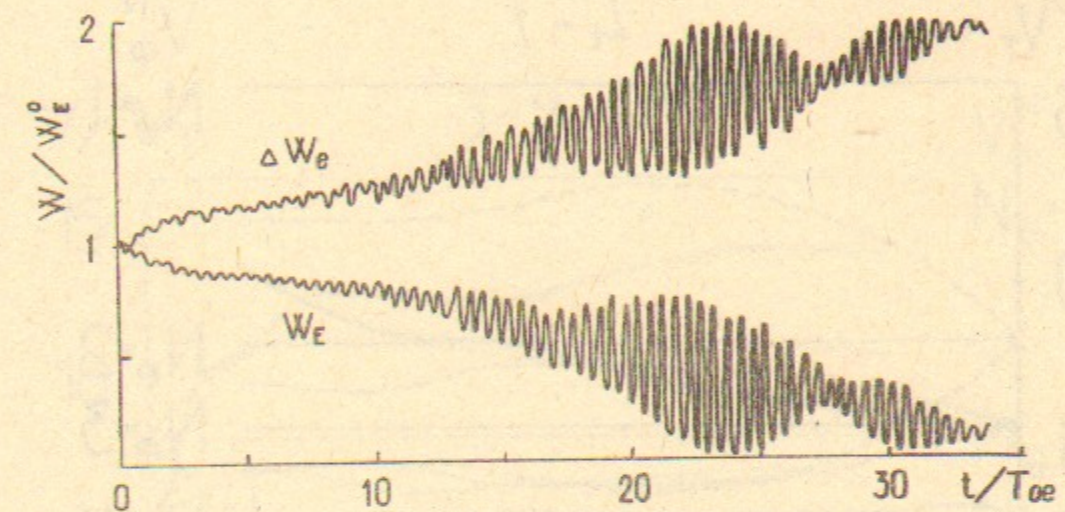


Рис. 1а. Случай 4-1

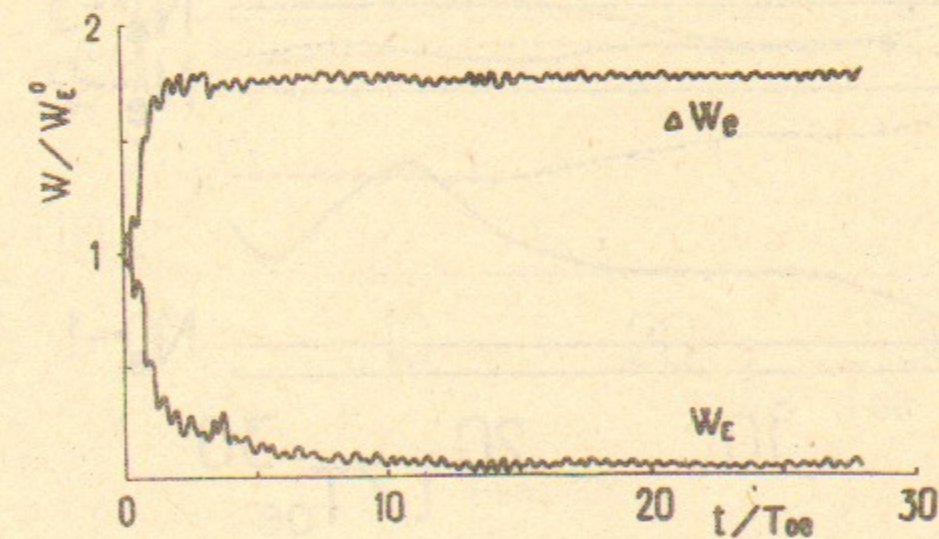


Рис. 1б. Случай 3-2

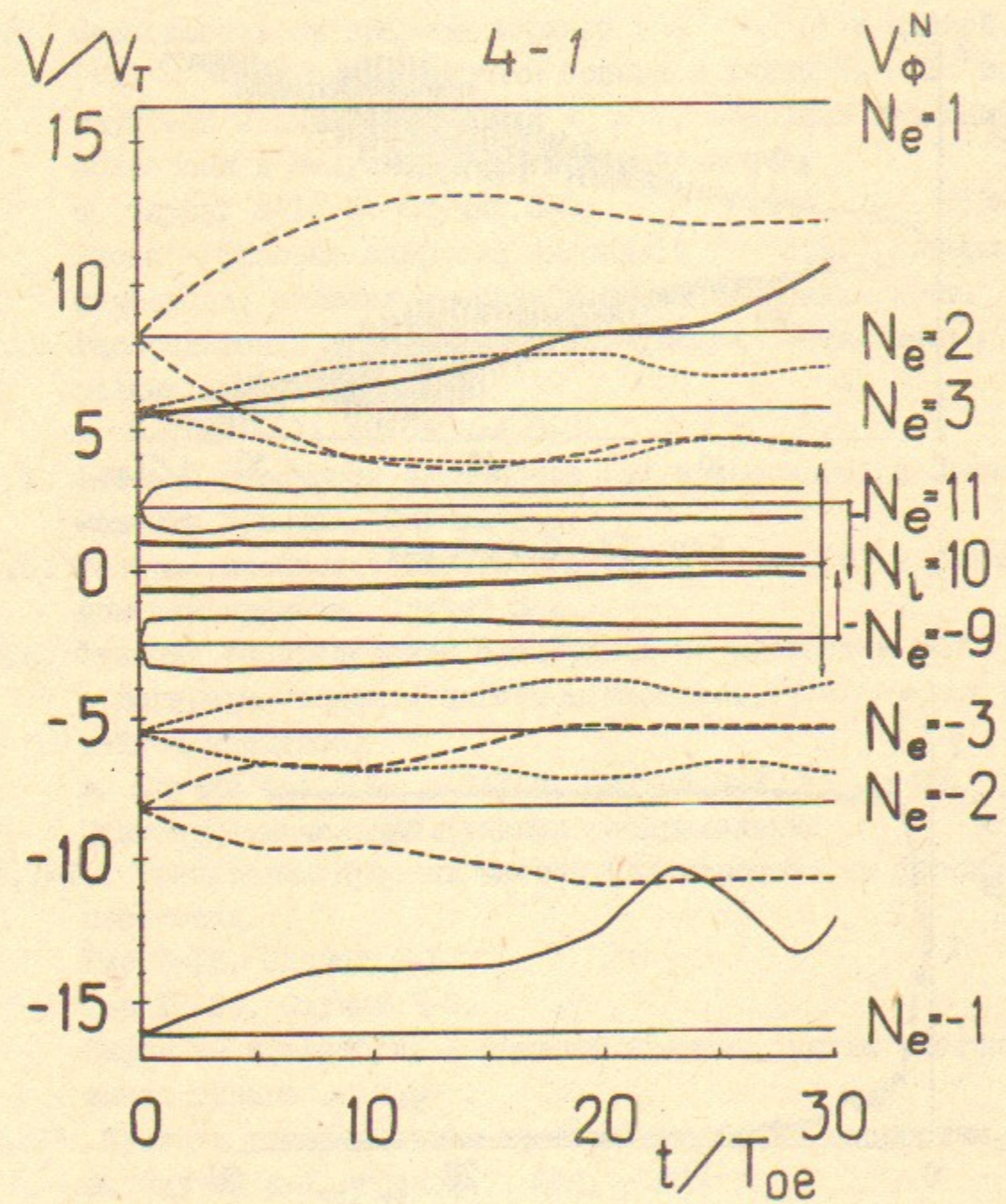


Рис. 2а

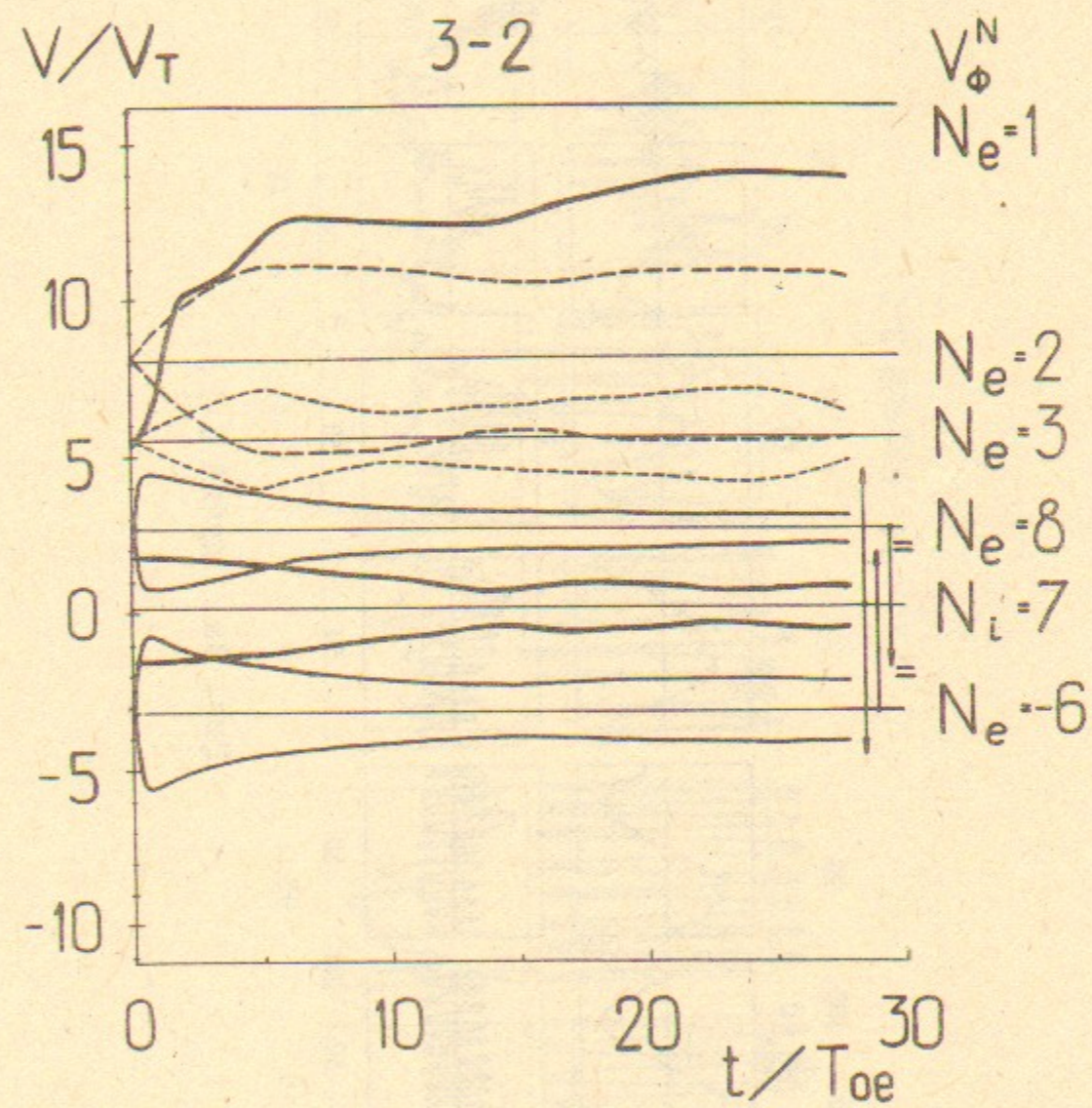


Рис. 2б

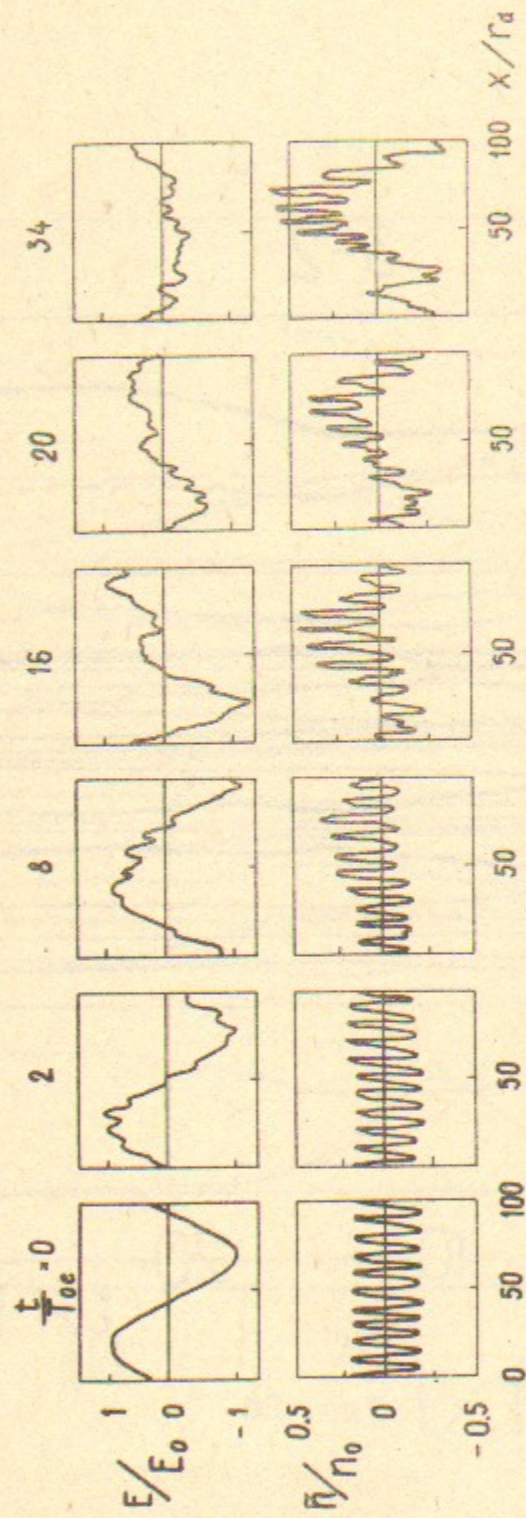


Рис. 3а. Случай 4-1.

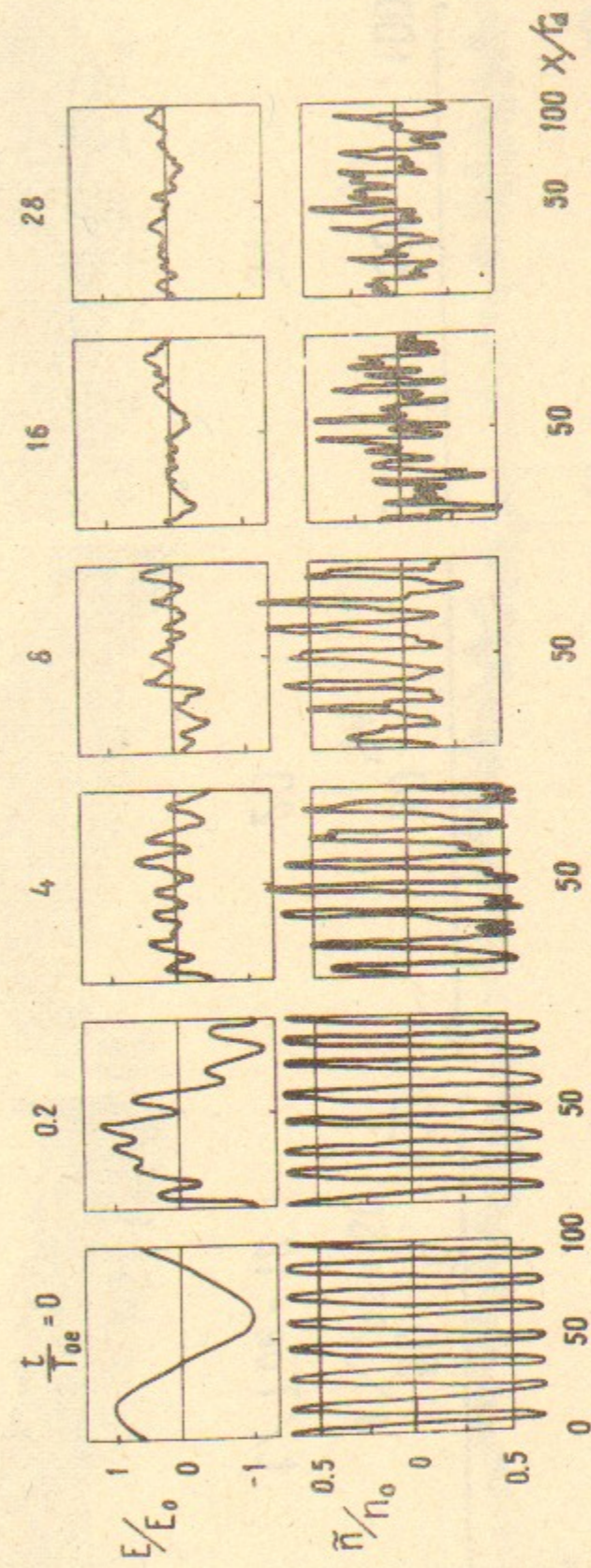


Рис. 3б. Случай 3-2.

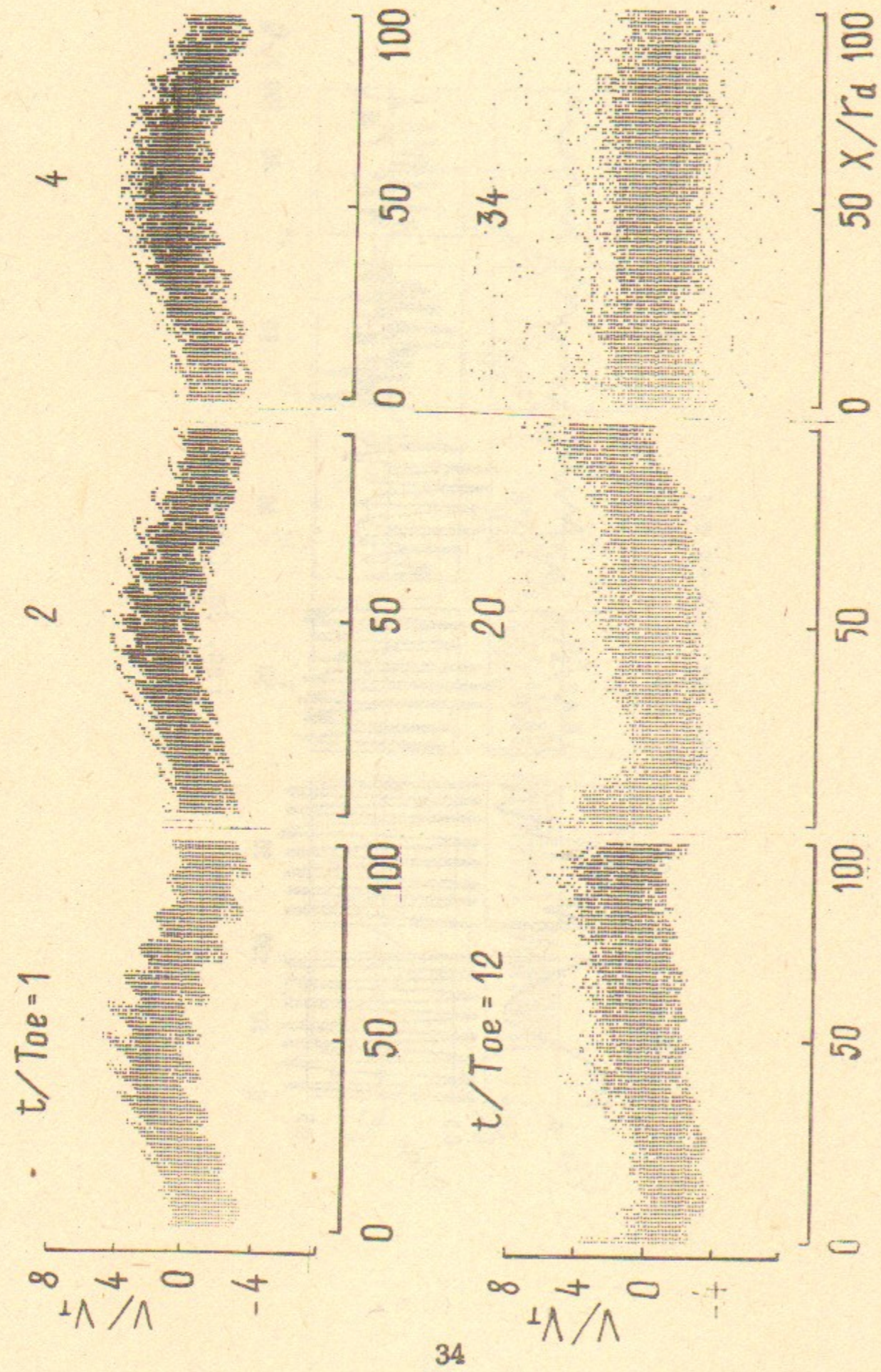


Рис. 4а. Случай 4-Г.

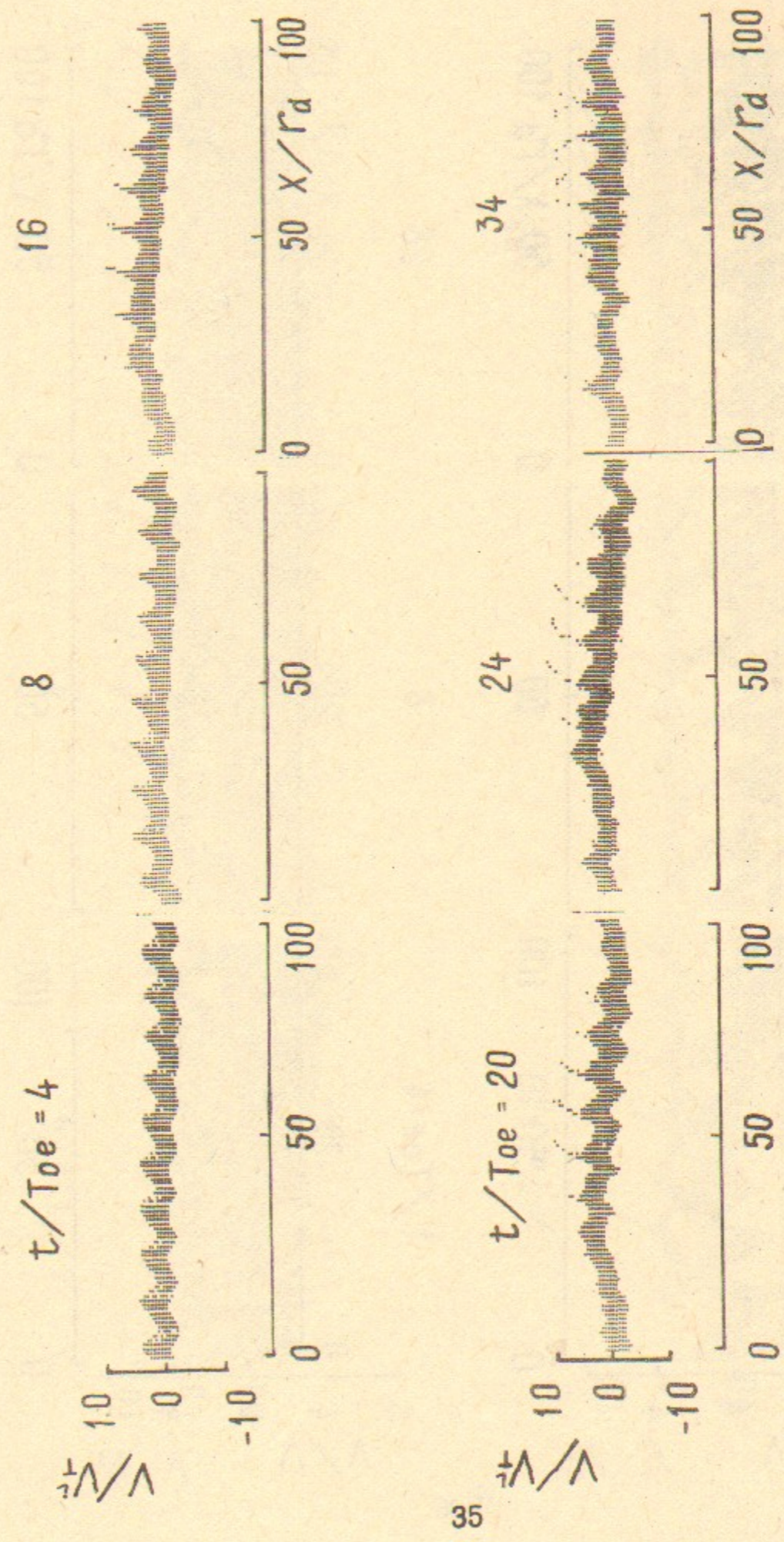
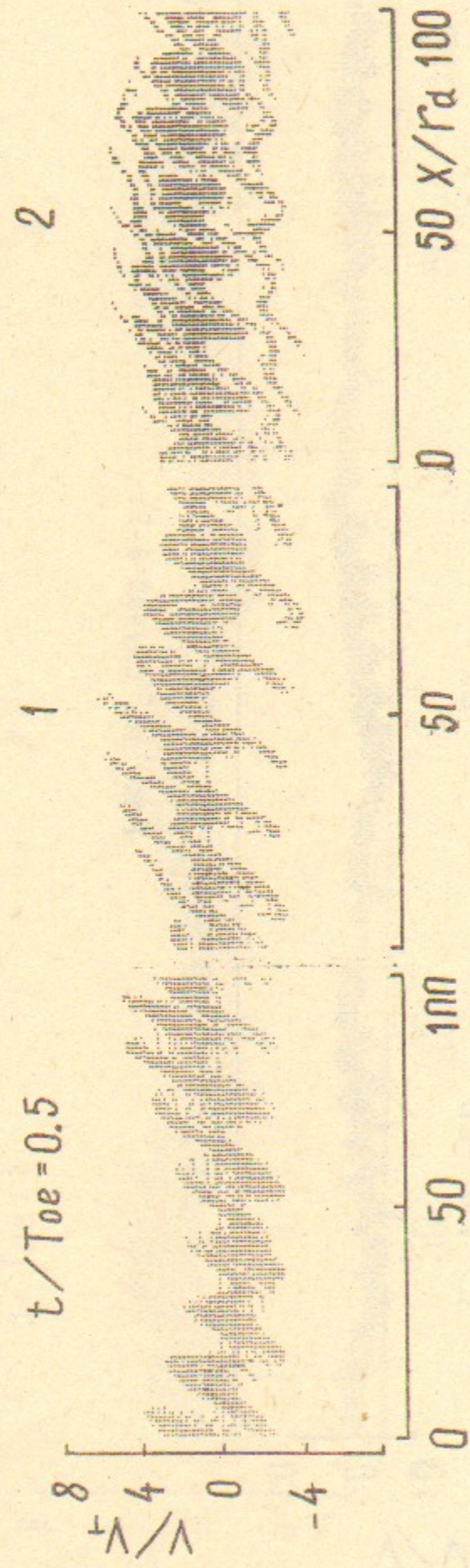


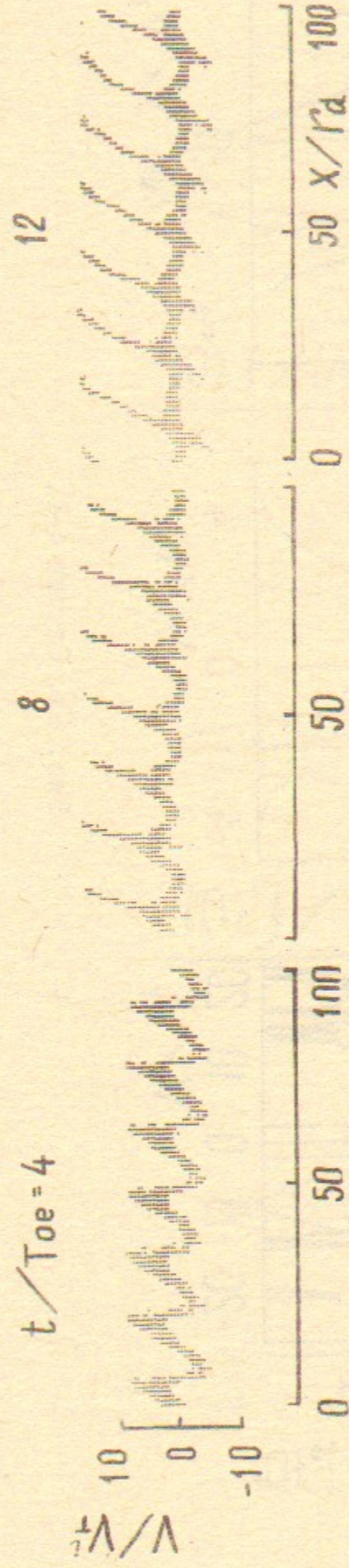
Рис. 4б. Случай 4-Г.



36



Рис. 5а. Случай 3-2.



37

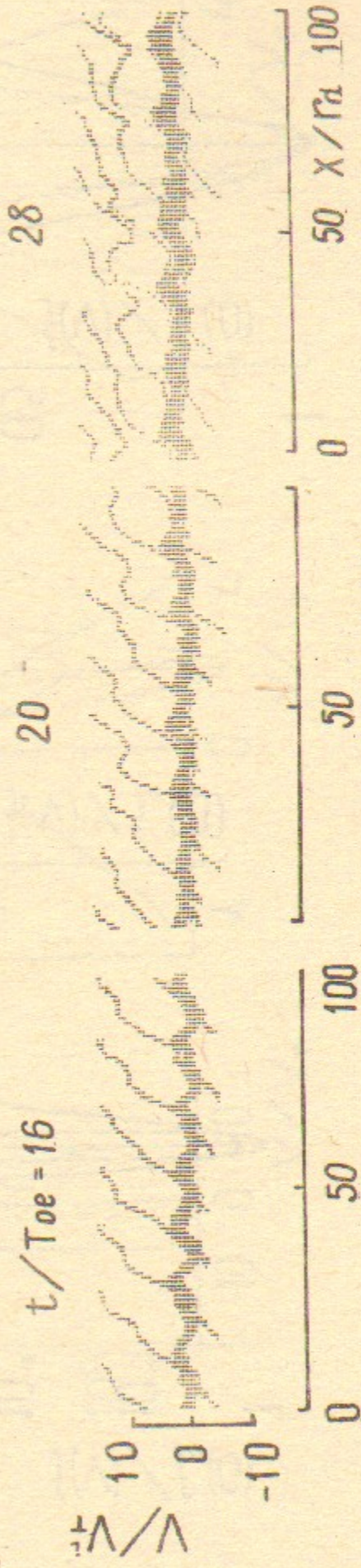


Рис. 5б. Случай 3-2.

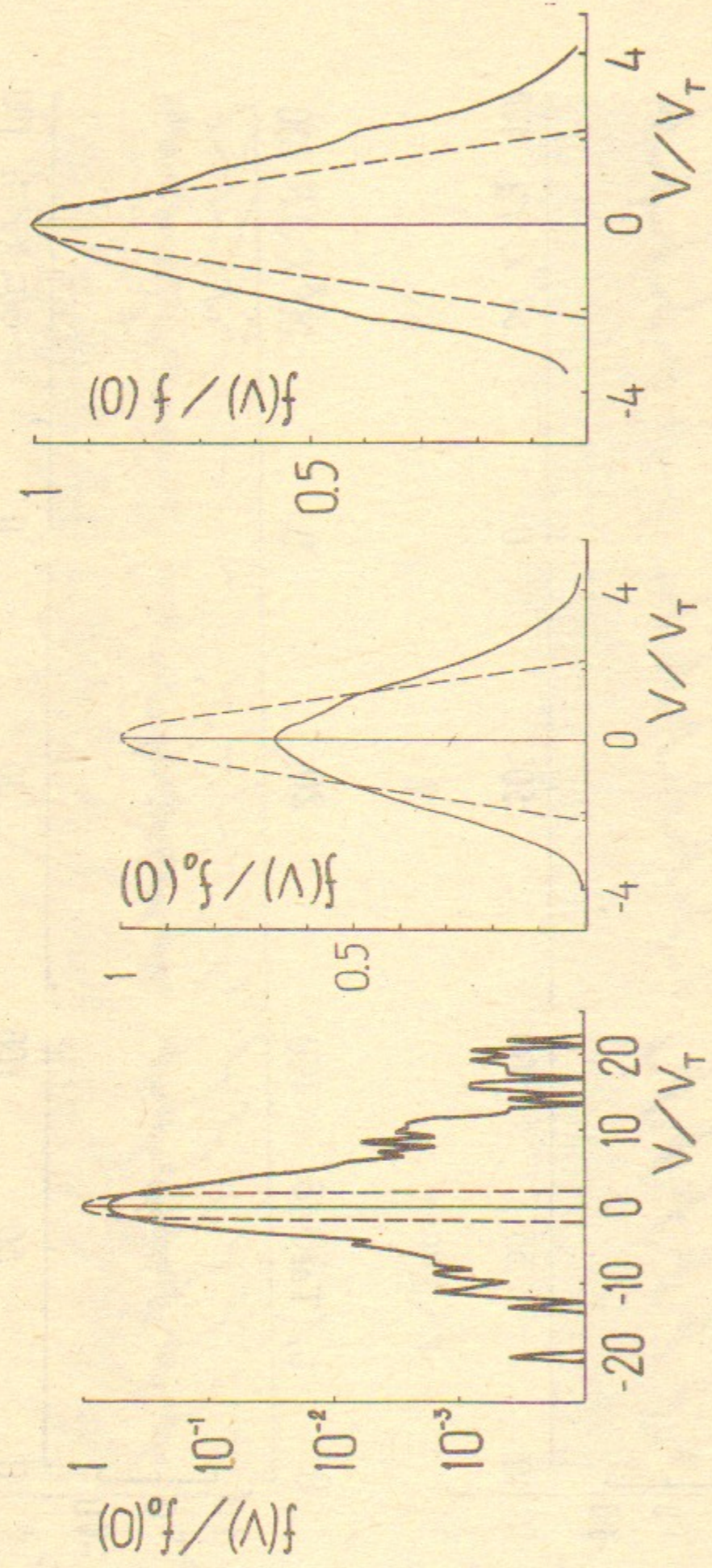


Рис. 6а. Случай 4-1.

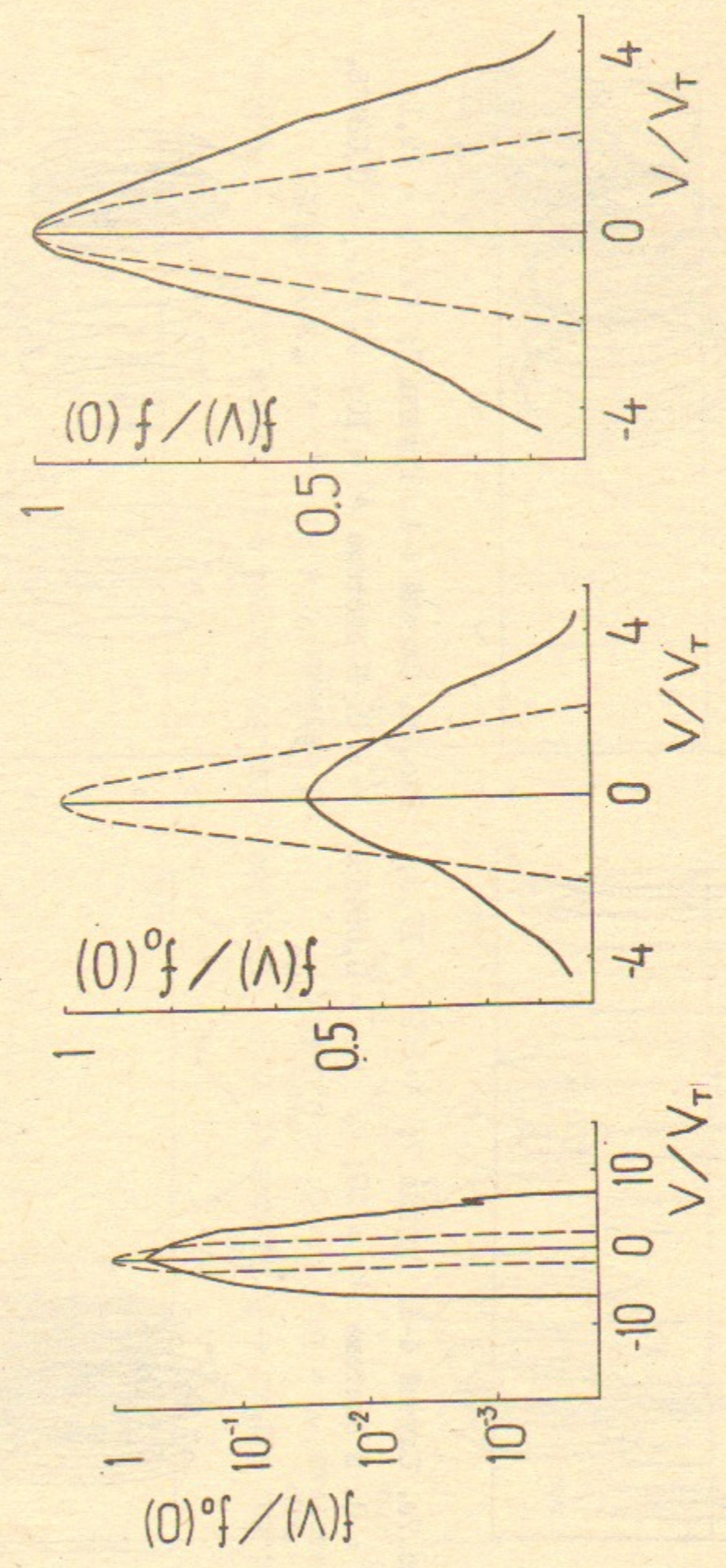


Рис. 6б. Случай 3-2.

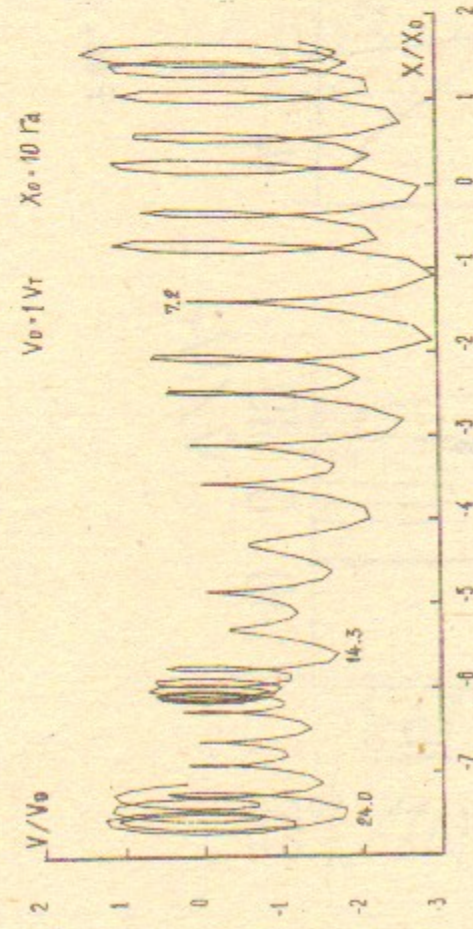


Рис. 7а. Случай 4-1. Группа 7; $X_0/\Gamma_d = 17,3$; $V_0 = 0$. В системе $N_i = 10$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,08468$.

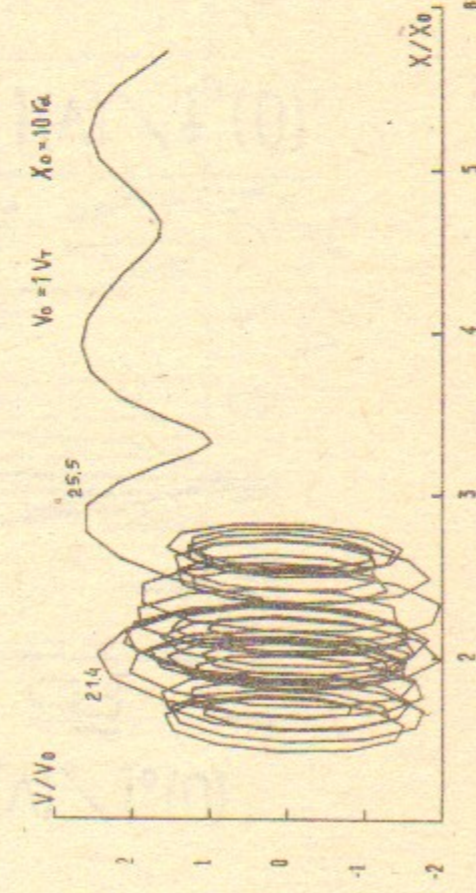


Рис. 7б. Случай 4-1. Группа 7; $X_0/\Gamma_d = 20$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_i = 10$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,08468$.

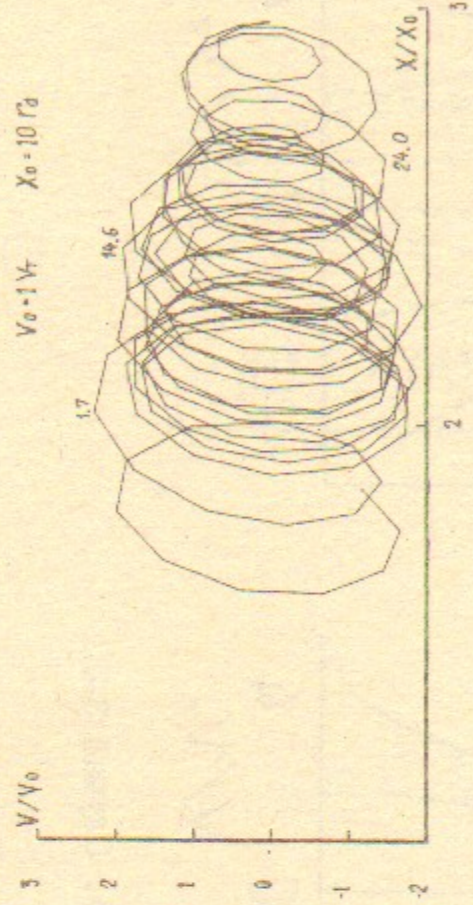


Рис. 7с. Случай 4-1. Группа 7; $X_0/\Gamma_d = 19,1$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_i = 10$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,08468$.

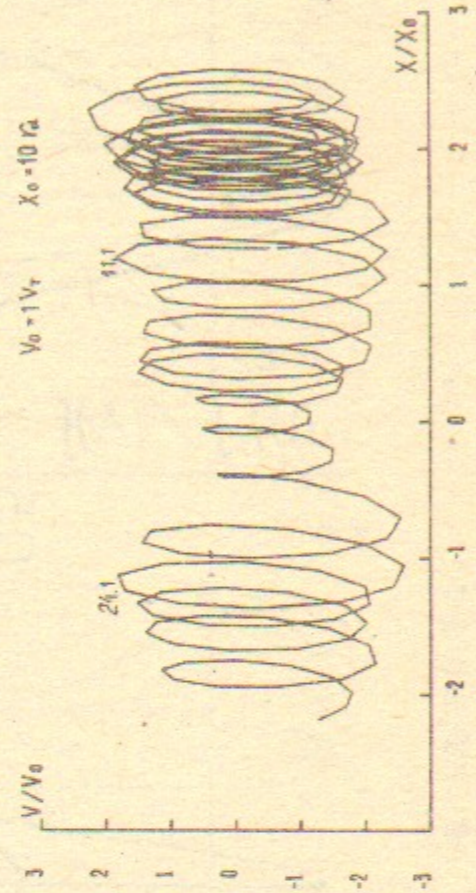


Рис. 7г. Случай 4-1. Группа 7; $X_0/\Gamma_d = 22,7$; $V_0^0 = 0$. В системе $N_i = 10$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,08468$.

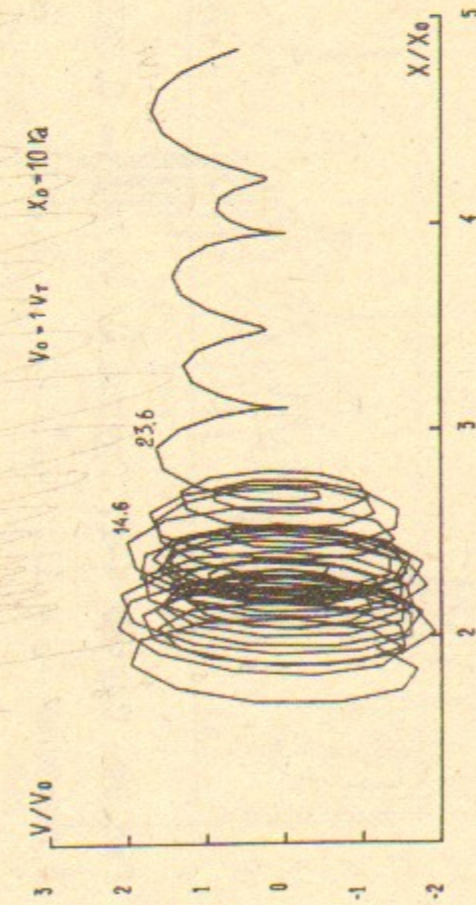


Рис. 8а. Случай 4-1. Группа 1; $V_0/V_T = -0,064$. В системе $N_i = 10$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,08468$.

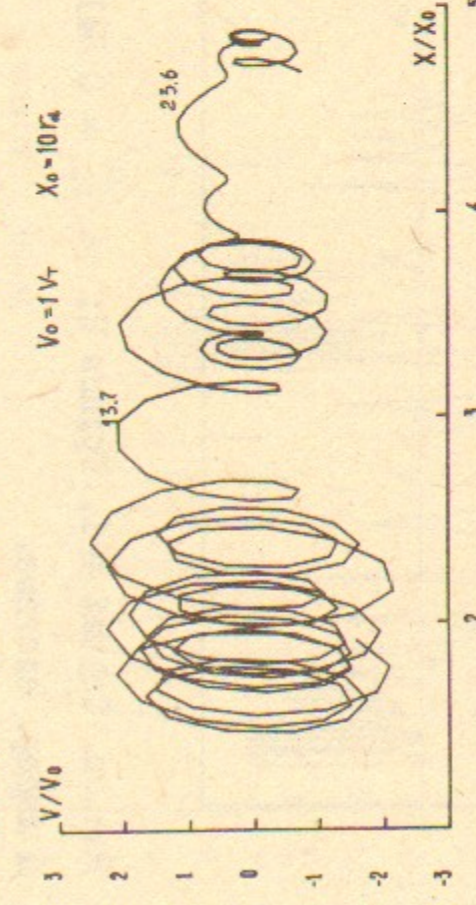


Рис. 8б. Случай 4-1. Группа 2; $V_0/V_T = -0,477$. В системе $N_i = 10$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,08468$.

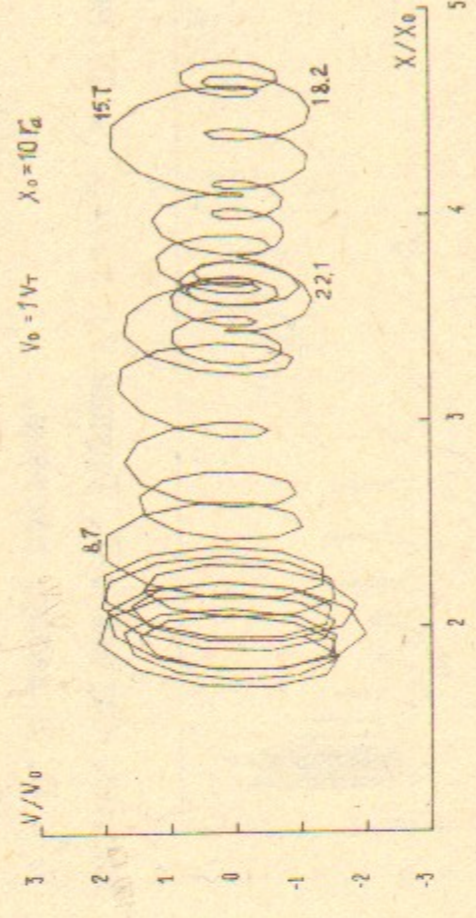


Рис. 8с. Случай 4-1. Группа 1; $V_0/V_T = -0,064$. В системе $N_i = 10$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,08468$.

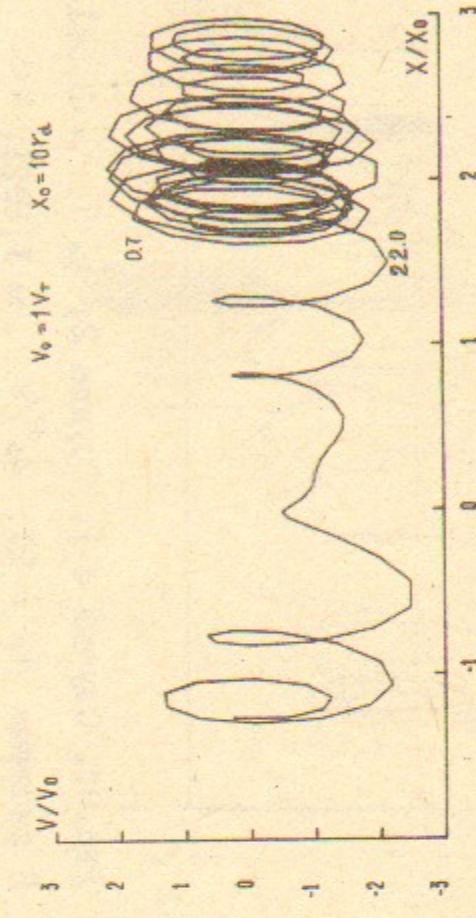


Рис. 8г. Случай 4-1. Группа 2; $V_0/V_T = -0,286$. В системе $N_i = 10$; $V_{\phi}^i/V_T = 0,08468$.

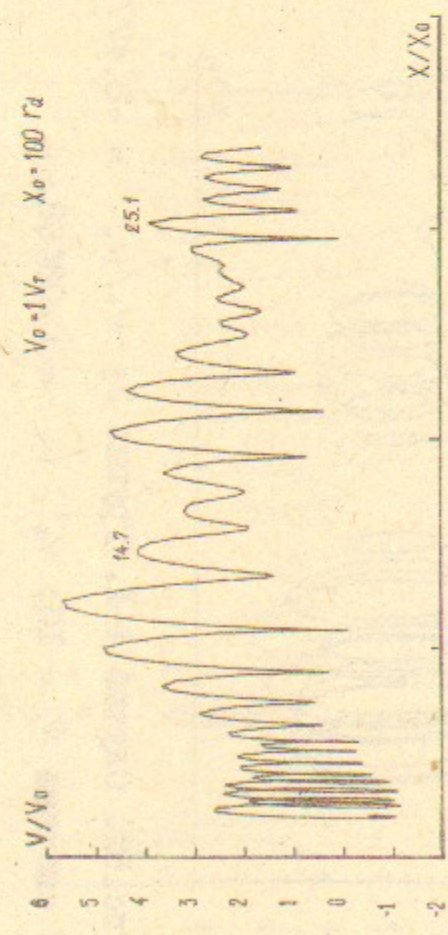


Рис. 9а. Случай 4-1. Груша 2; $V_0/V_T = 0,541$.

В лабор. системе.

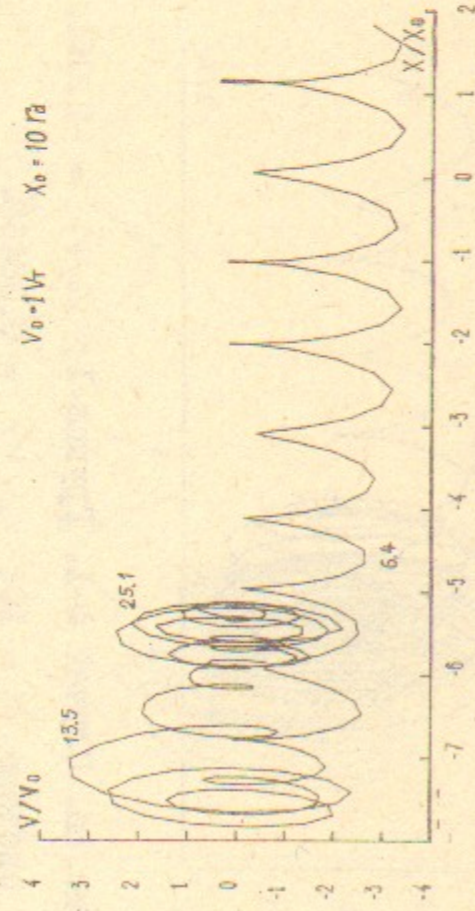


Рис. 9в. Случай 4-1. Груша 2; $V_0/V_T = 0,541$.

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

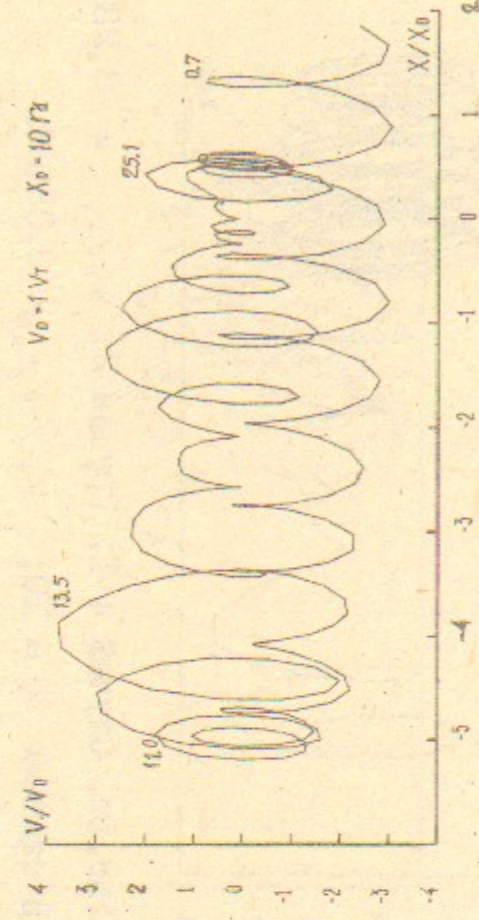


Рис. 9б. Случай 4-1. Груша 2; $V_0/V_T = 0,541$.

В системе $N_e = 2I$; $V_{\phi}^N/V_T = 1,8921$.

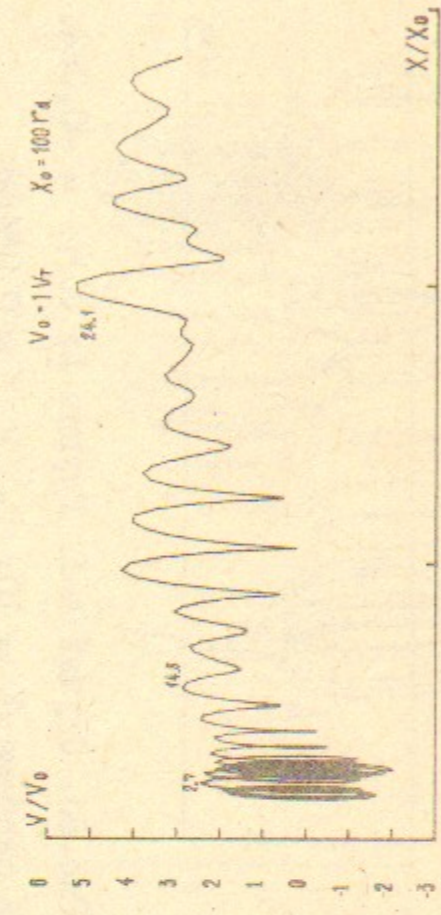


Рис. 9г. Случай 4-1. Груша 7; $X_0/r_d = 17,84$;

$V_0^0 = 0$. В лабор. системе.

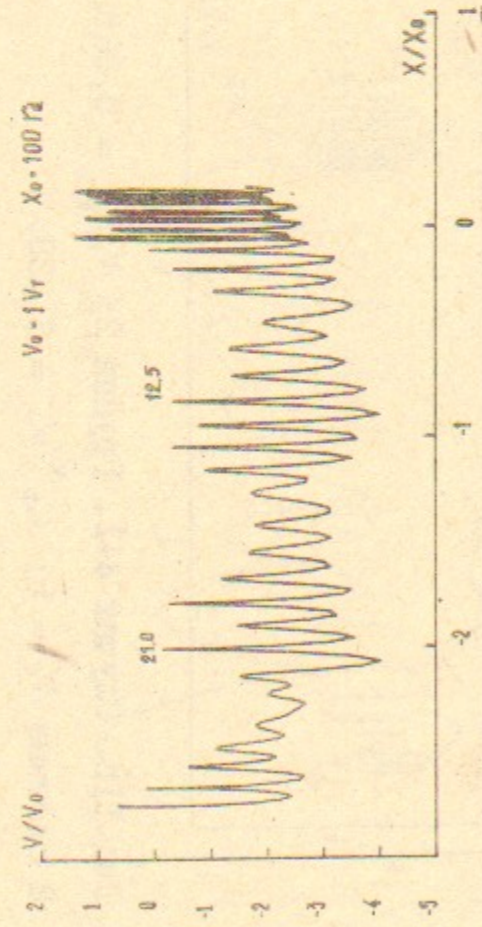


Рис. 10а. Случай 4-1. Груша 2; $V_0/V_T = -0,61$.

В лабор. системе.



Рис. 10в. Случай 4-1. Груша 2; $V_0/V_T = -0,61$.

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

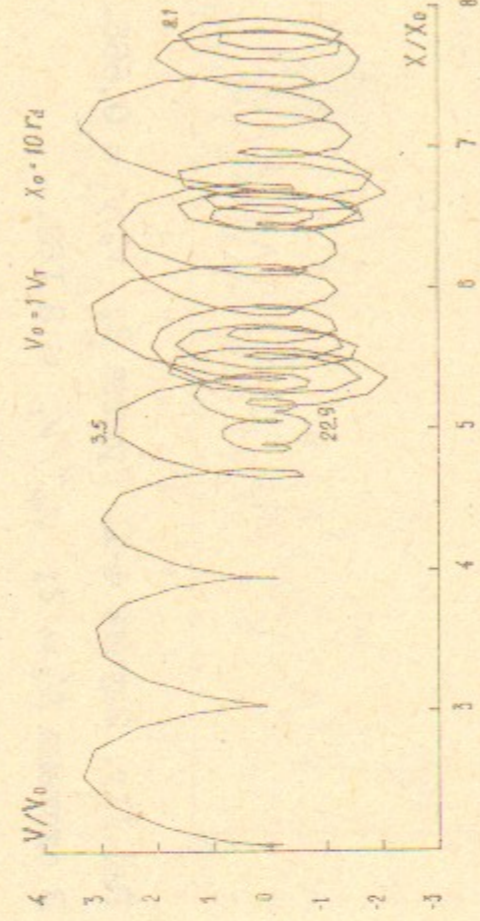


Рис. 10б. Случай 4-1. Груша 2; $V_0/V_T = -0,61$.

В системе $N_e = -19$; $V_{\phi}^N/V_T = -1,926$.

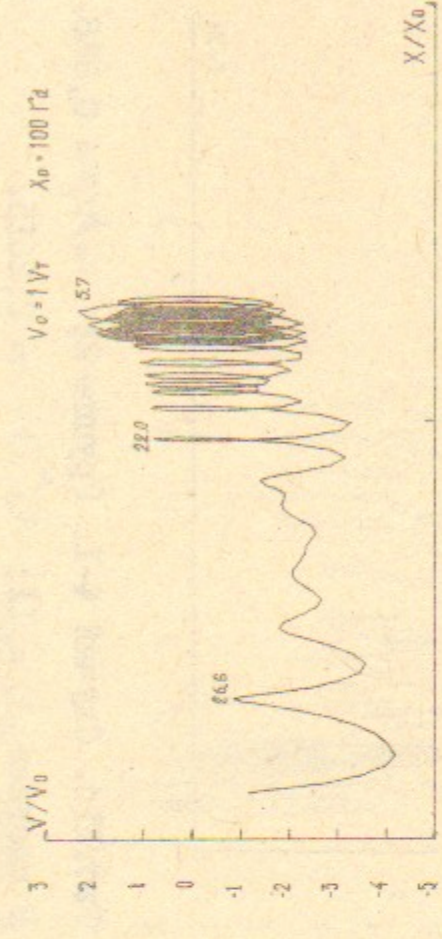


Рис. 10г. Случай 4-1. Груша 7; $X_0/r_d = 22,88$;

В лабор. системе. $V_0^0 = 0$.

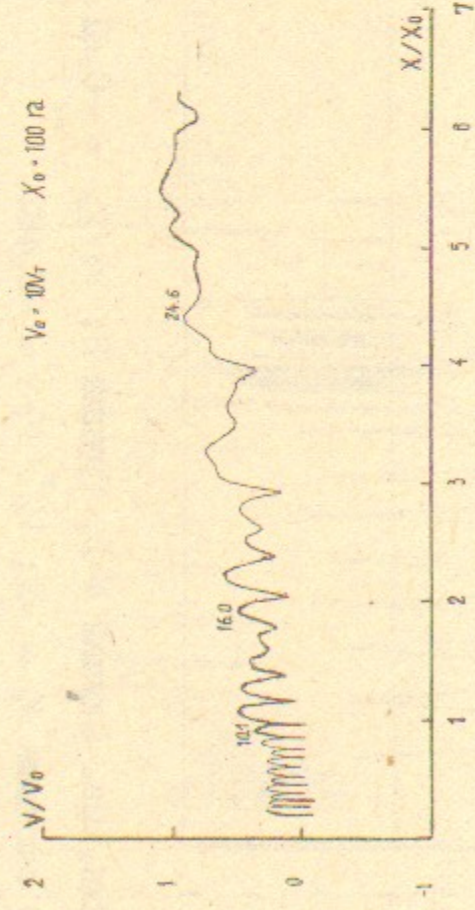


Рис.11а. Случай 4-1. Группа 2; $V_0/V_T = 0,668$.
В лабор. системе.

44

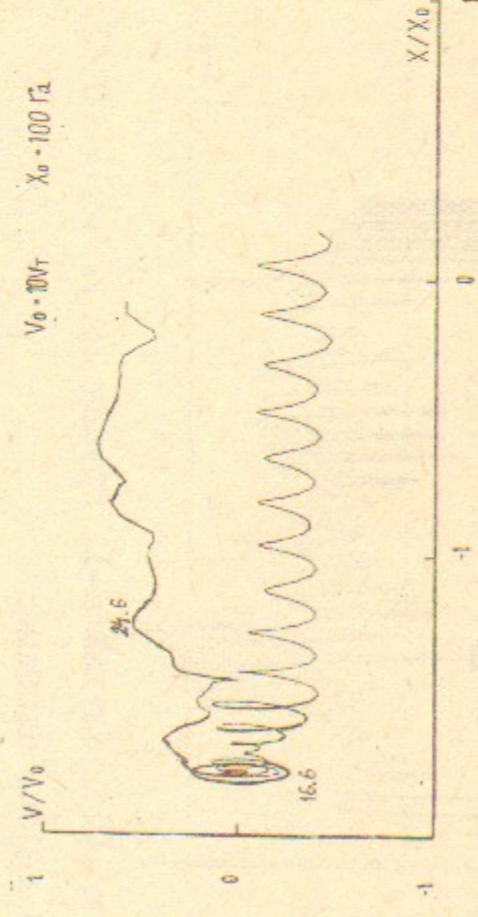


Рис.11б. Случай 4-1. Группа 2; $V_0/V_T = 0,668$.
В системе $N_e = 5$; $V_{\Phi}^N/V_T = 3,638$.

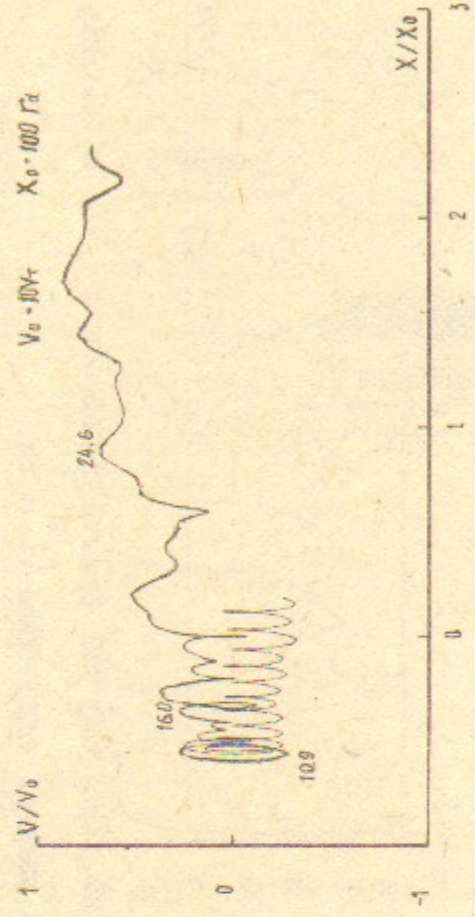


Рис.11с. Случай 4-1. Группа 2; $V_0/V_T = 0,668$.
В системе $N_e = 11$; $V_{\Phi}^N/V_T = 2,2615$.

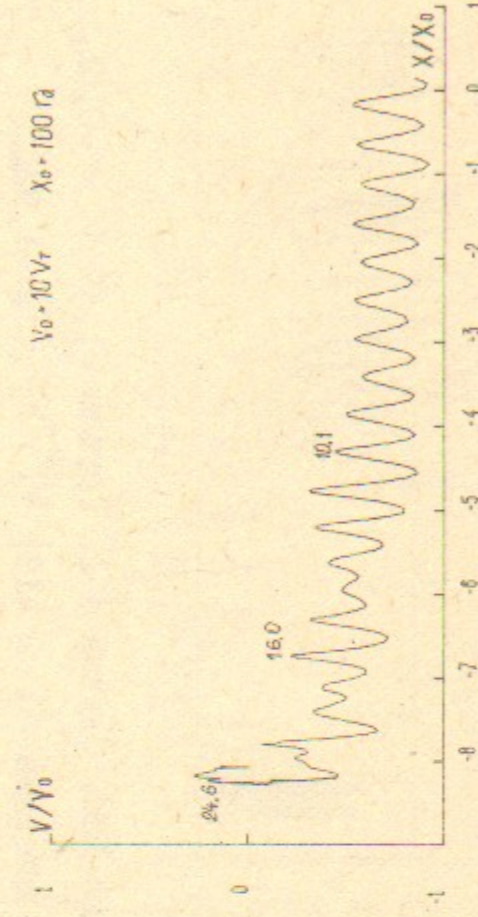


Рис.11г. Случай 4-1. Группа 2; $V_0/V_T = 0,668$.
В системе $N_e = 2$; $V_{\Phi}^N/V_T = 8,183$.

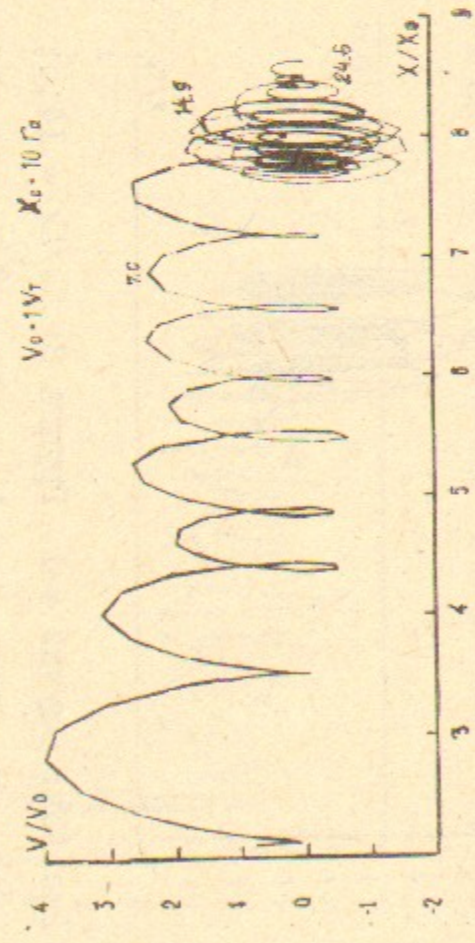


Рис.12а. Случай 4-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,85$.
В лабор. системе.

45

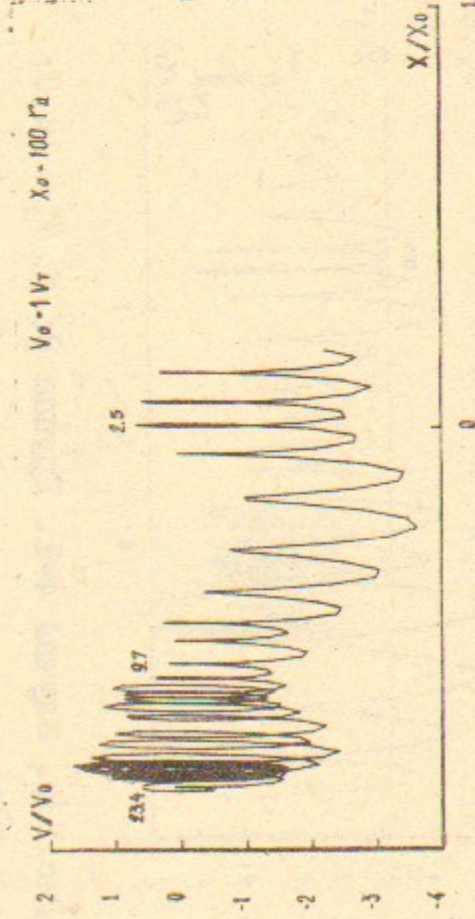


Рис.12б. Случай 4-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,29$.
В лабор. системе.

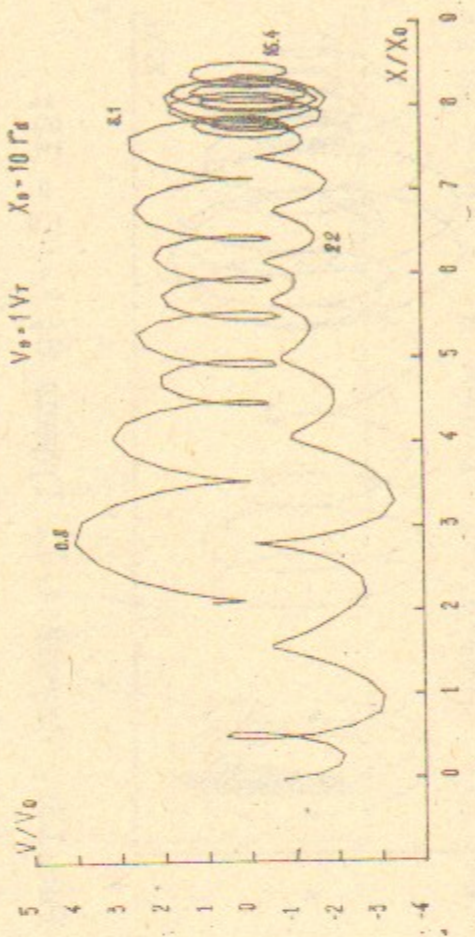


Рис.12в. Случай 4-1. Группа 3; $V_0/V_T = 1,90$.
В лабор. системе.

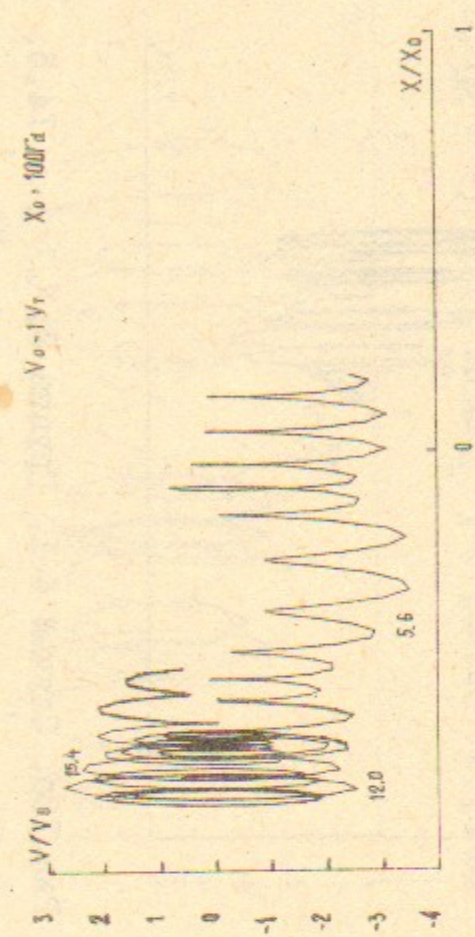


Рис.12г. Случай 4-1. Группа 4; $V_0/V_T = -1,19$.
В лабор. системе.

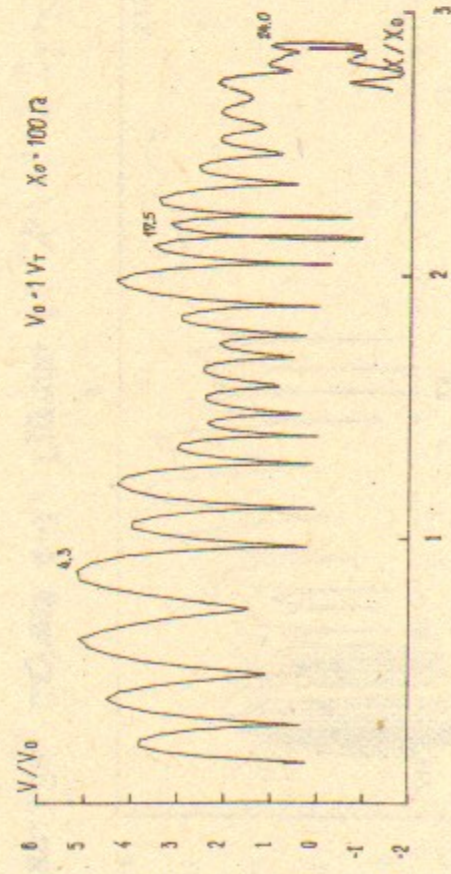


Рис. 13а. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 14,5$;
 $V_0^o = 2V_T$. В лабор. системе.

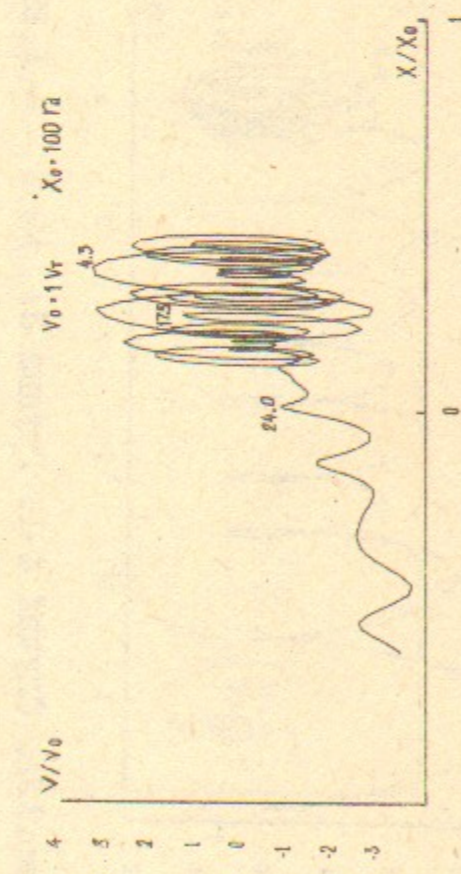


Рис. 13в. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 14,5$;
 $V_0^o = 2V_T$. В системе $N_e = 2I$; $V_{\phi}^N/V_T = 1,892I$.

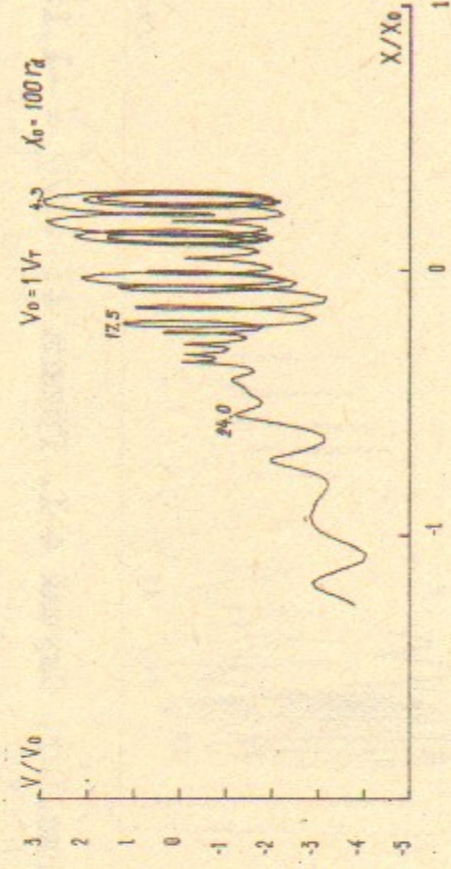


Рис. 13б. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 14,5$;
 $V_0^o = 2V_T$. В системе $N_e = II$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,2615$.

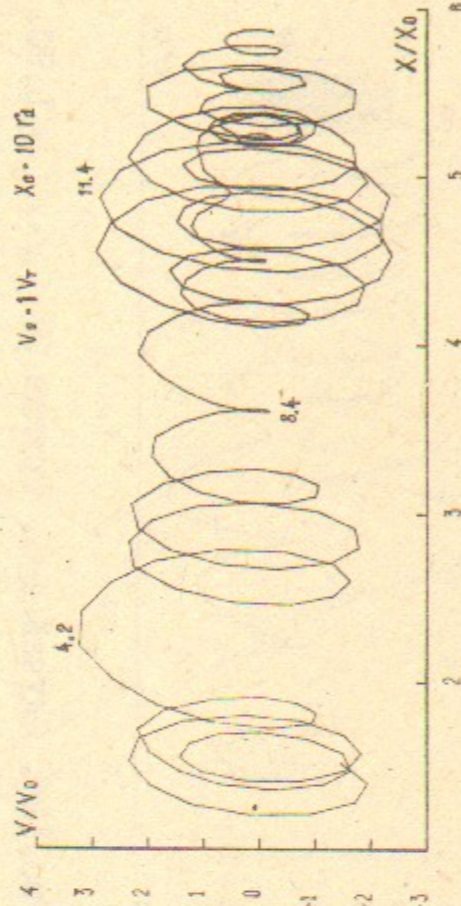


Рис. 13г. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 16$;
 $V_0^o = 2V_T$. В системе $N_e = II$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,2615$.

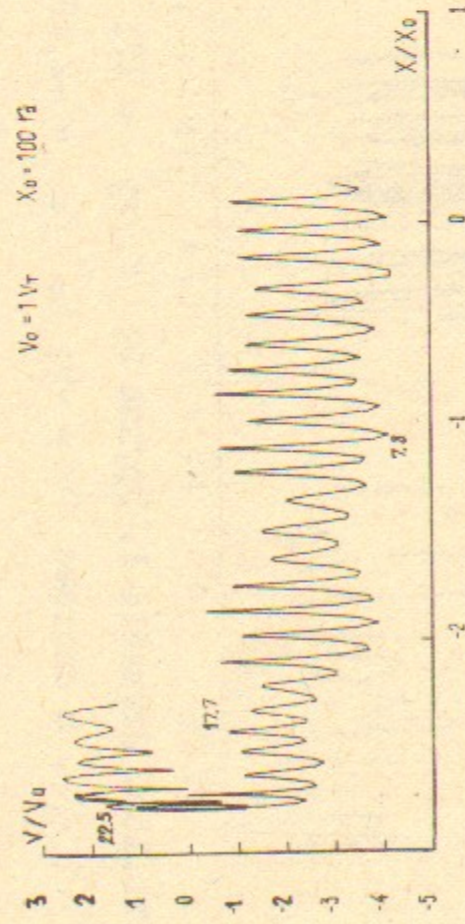


Рис. 14а. Случай 4-1. Группа 9; $X_0/r_d = 20,5$;
 $V_0^o = -2V_T$. В лабор. системе.

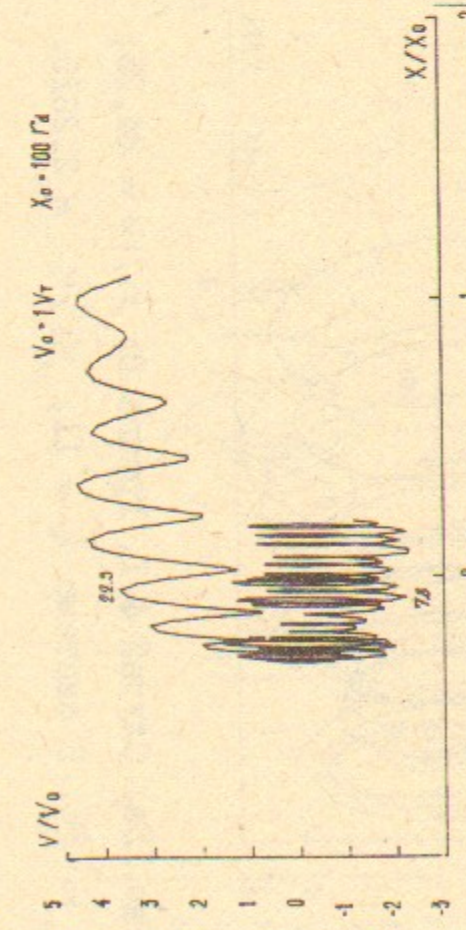


Рис. 14в. Случай 4-1. Группа 9; $X_0/r_d = 20,5$;
 $V_0^o = -2V_T$. В системе $N_e = -19$; $V_{\phi}^N/V_T = -1,926$.

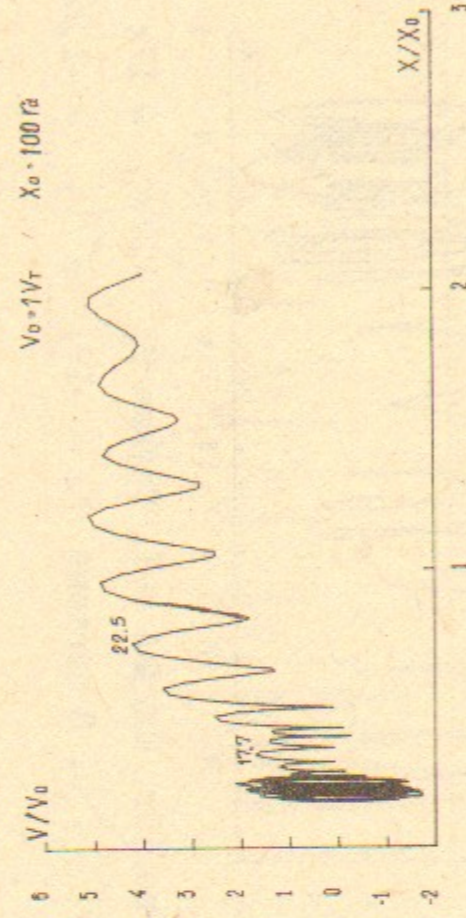


Рис. 14б. Случай 4-1. Группа 9; $X_0/r_d = 20,5$;
 $V_0^o = -2V_T$. В системе $N_e = -9$; $V_{\phi}^N/V_T = -2,482$.

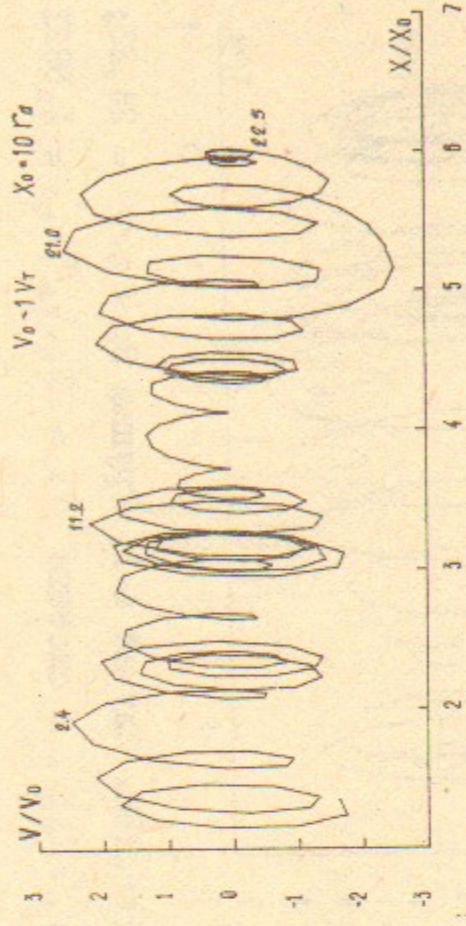


Рис. 14г. Случай 4-1. Группа 9; $X_0/r_d = 20,5$;
 $V_0^o = -2V_T$. В системе $N_e = -19$; $V_{\phi}^N/V_T = -1,926$.

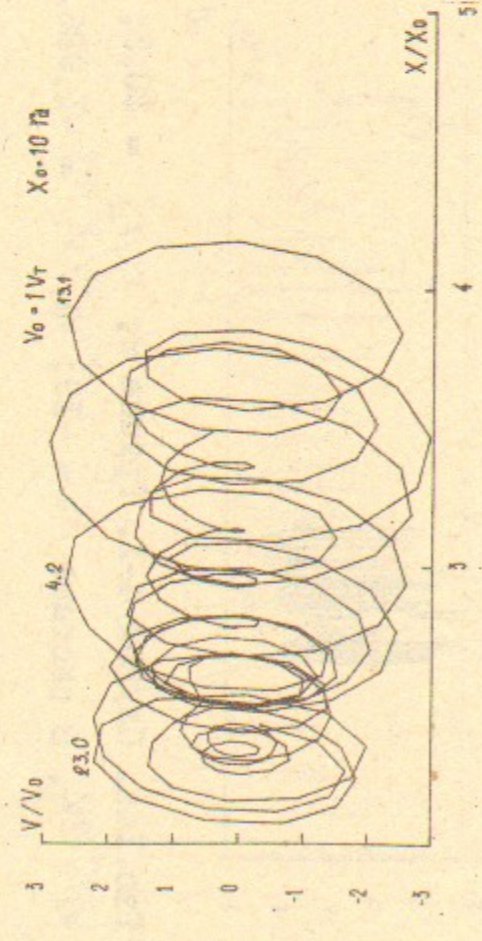


Рис. 15а. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 24,25$;
 $V_0^0 = 2V_T$. В системе $N_e = II$; $V_{\Phi}^N/V_T = 2,2615$.

48

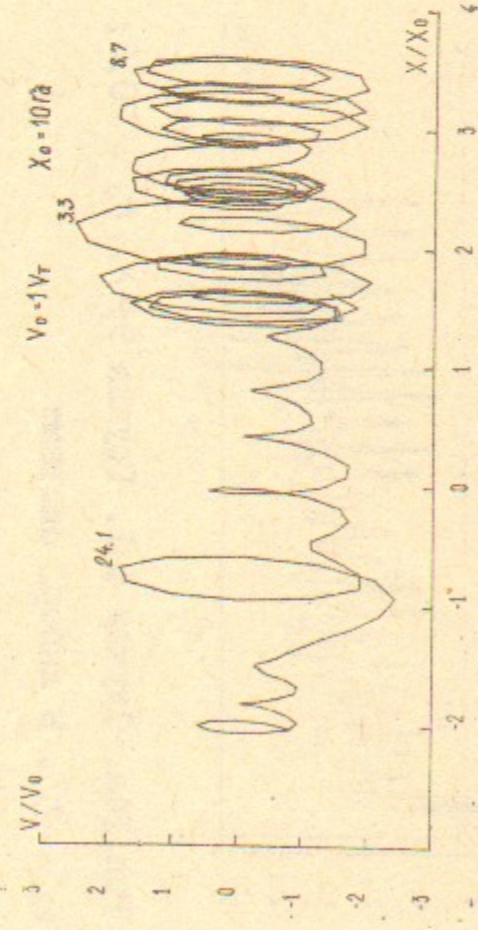


Рис. 15б. Случай 4-1. Группа 9; $X_0/r_d = 17$;
 $V_0^0 = -2V_T$. В системе $N_e = -9$; $V_{\Phi}^N/V_T = -2,482$.

В системе $N_e = -19$; $V_{\Phi}^N/V_T = -1,926$.

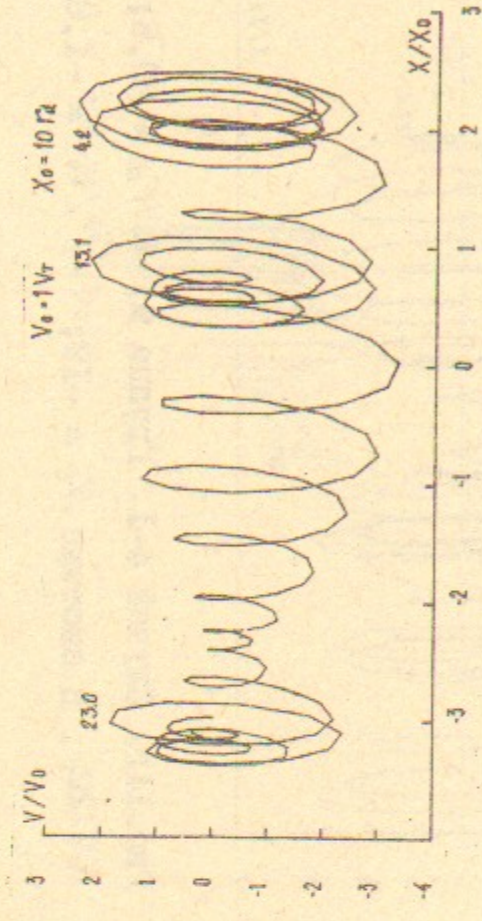


Рис. 15в. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 24,25$;
 $V_0^0 = 2V_T$. В системе $N_e = 2I$; $V_{\Phi}^N/V_T = 1,892I$.

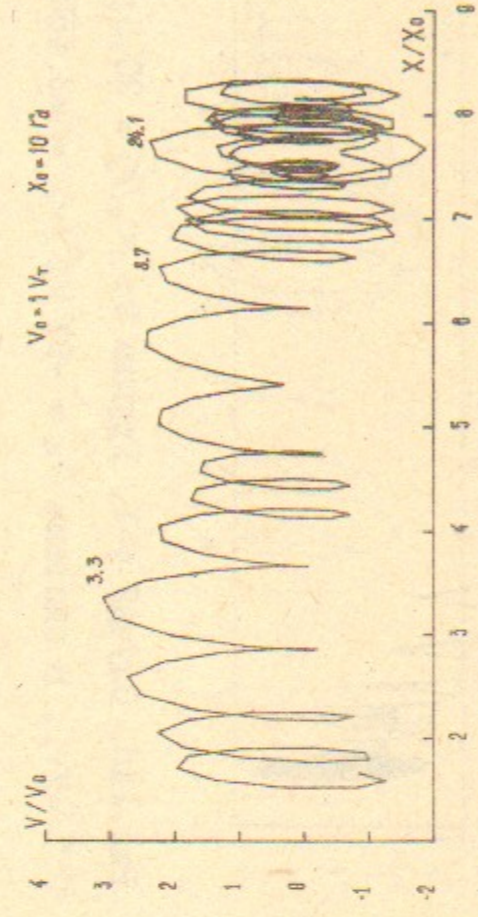


Рис. 15г. Случай 4-1. Группа 9; $X_0/r_d = 17$;
 $V_0^0 = -2V_T$. В системе $N_e = -19$; $V_{\Phi}^N/V_T = -1,926$.

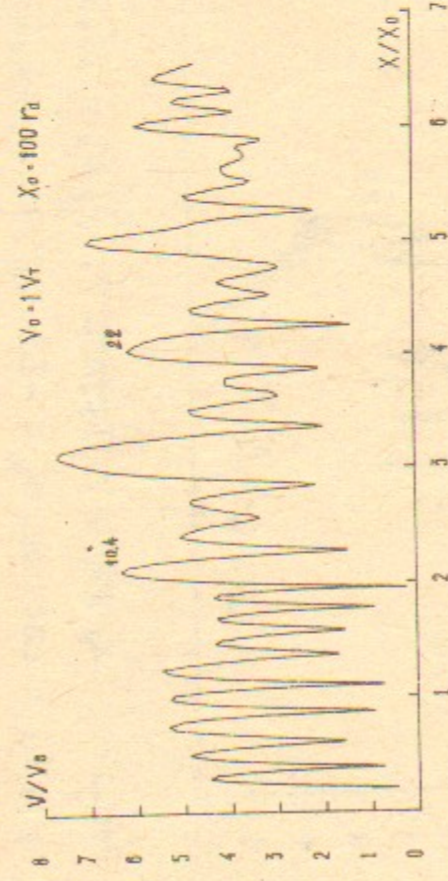


Рис. 16а. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 19$;
 $V_0^0 = 2V_T$. В лабор. системе.

49

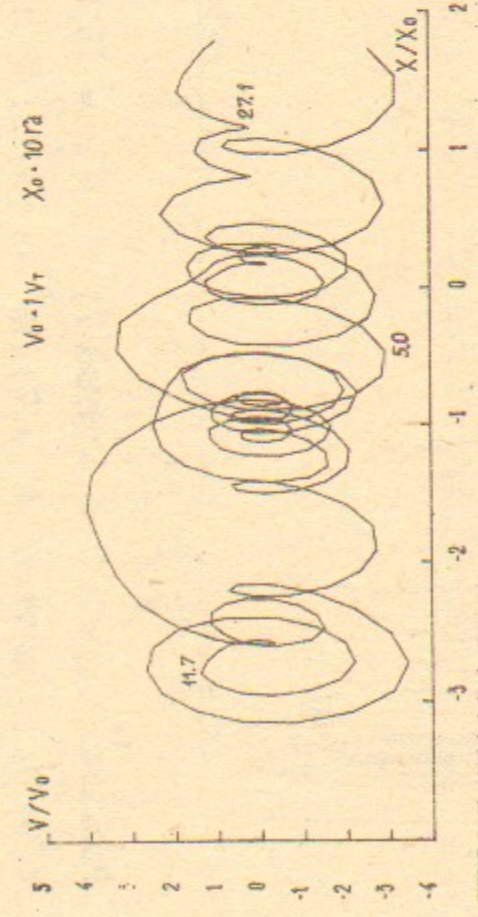


Рис. 16б. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 19$;
 $V_0^0 = 2V_T$. В системе $N_e = 5$; $V_{\Phi}^N/V_T = 3,638$.

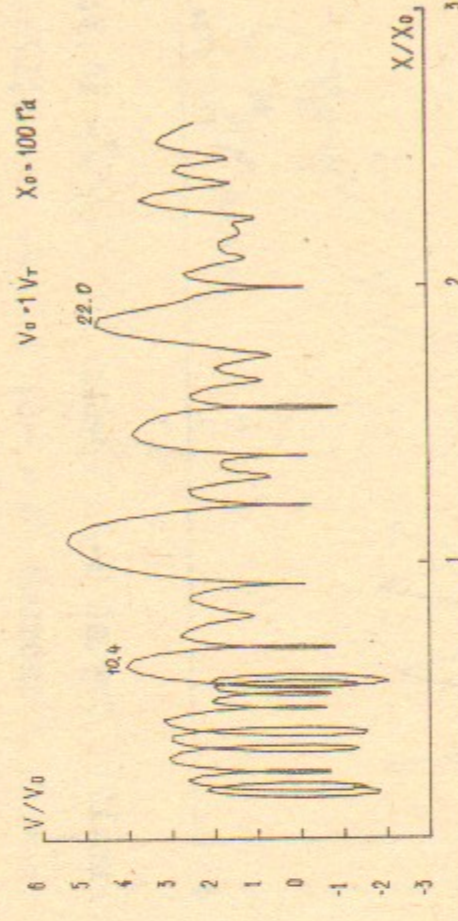


Рис. 16в. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 19$;
 $V_0^0 = 2V_T$. В системе $N_e = II$; $V_{\Phi}^N/V_T = 2,2615$.

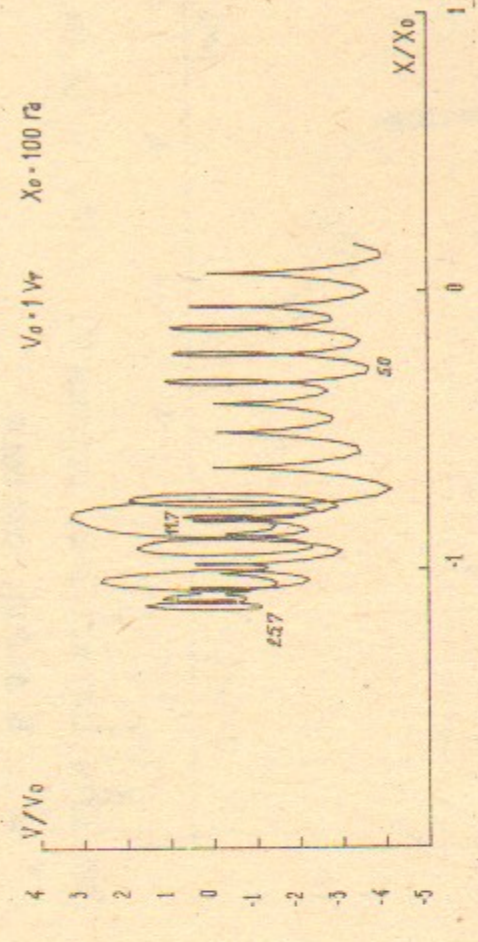


Рис. 16г. Случай 4-1. Группа 8; $X_0/r_d = 19$;
 $V_0^0 = 2V_T$. В системе $N_e = 4$; $V_{\Phi}^N/V_T = 4,358$.

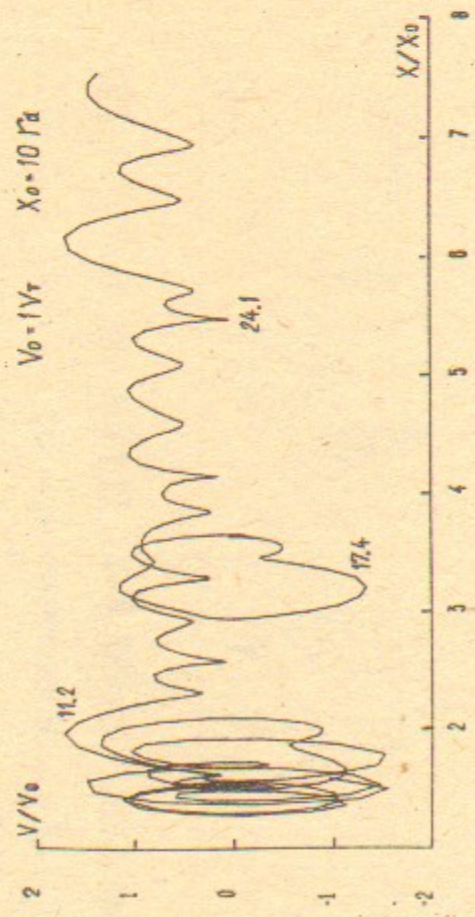


Рис. 17а. Случай 3-2. Группа 7; $X_0/r_d = 16,3$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_c = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,09153$.

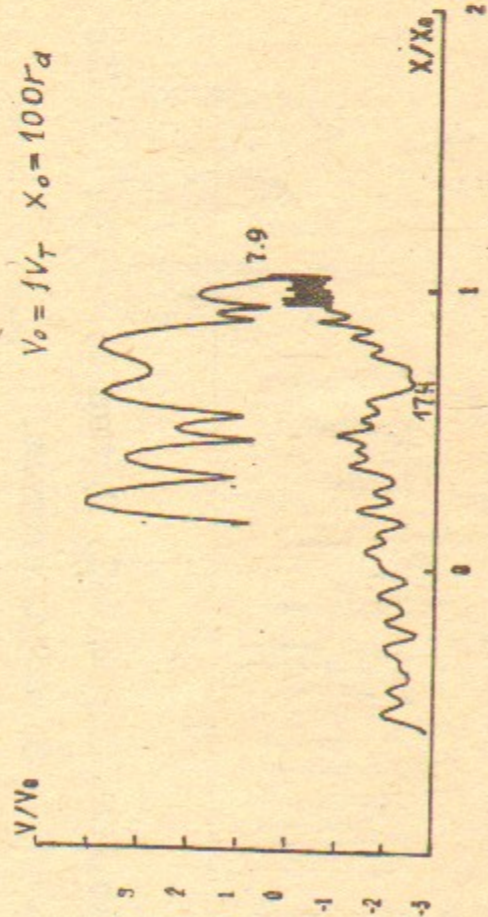


Рис. 17б. Случай 3-2. Группа 7; $X_0/r_d = 14,3$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_c = -13$; $V_\phi^N/V_T = -2,1246$.

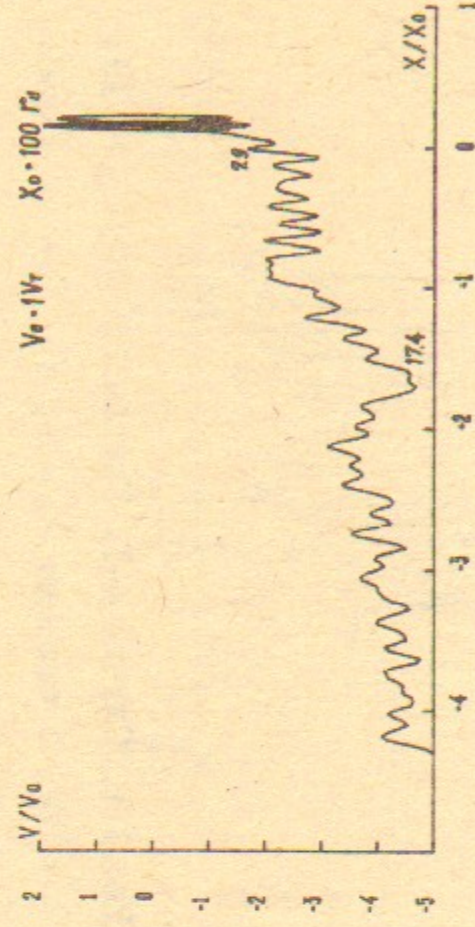


Рис. 17с. Случай 3-2. Группа 7; $X_0/r_d = 14,3$;
 $V_0^0 = 0$. В лабор. системе.

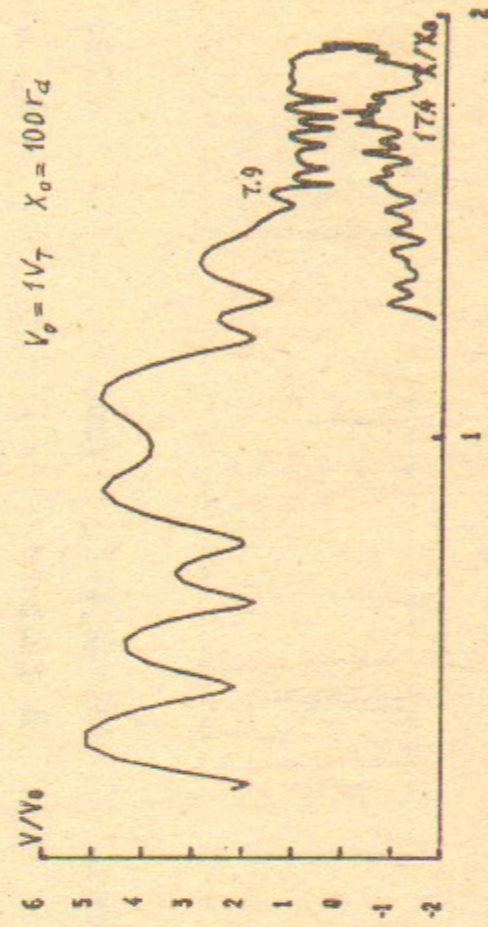


Рис. 17г. Случай 3-2. Группа 7; $X_0/r_d = 14,3$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_c = -6$; $V_\phi^N/V_T = -3,179$.

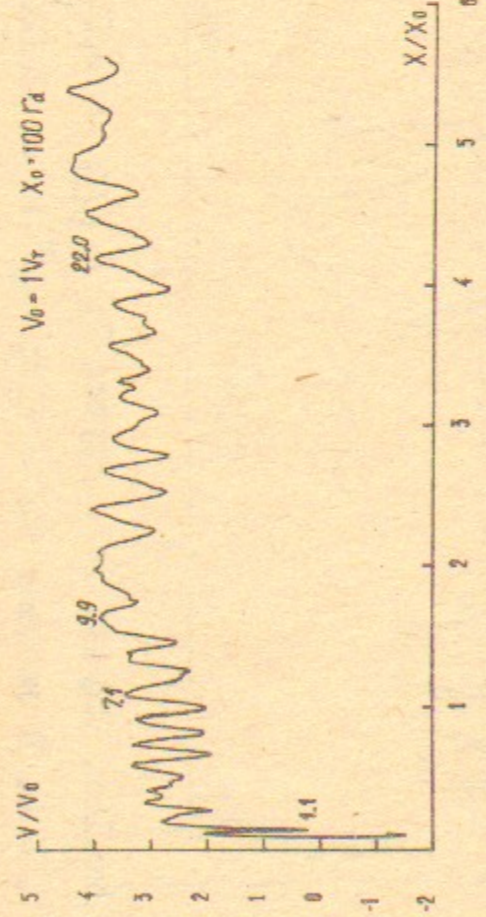


Рис. 18а. Случай 3-2. Группа 7; $X_0/r_d = 11,75$;
 $V_0^0 = 0$. В лабор. системе.

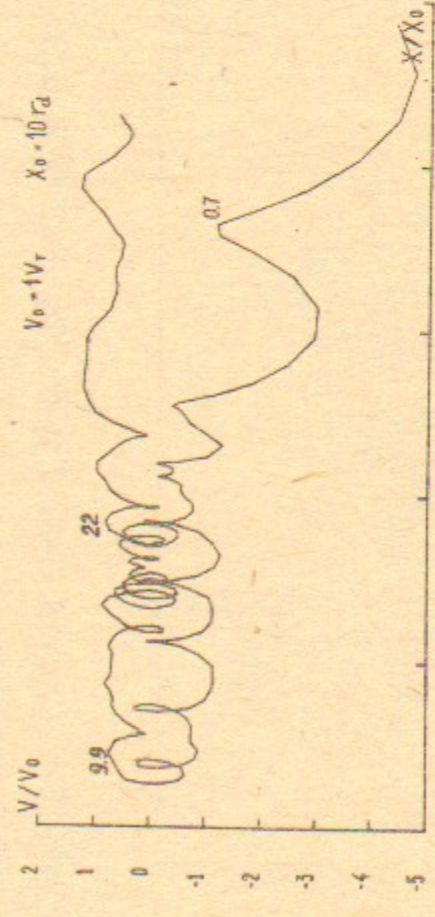


Рис. 18б. Случай 3-2. Группа 7; $X_0/r_d = 11,75$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_c = 6$; $V_\phi^N/V_T = 3,179$.

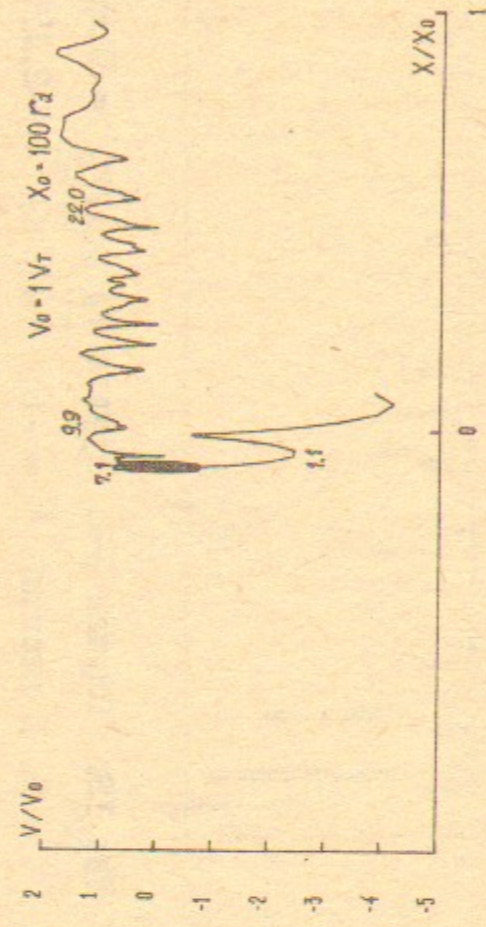


Рис. 18с. Случай 3-2. Группа 7; $X_0/r_d = 11,75$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_c = 8$; $V_\phi^N/V_T = 2,645$.

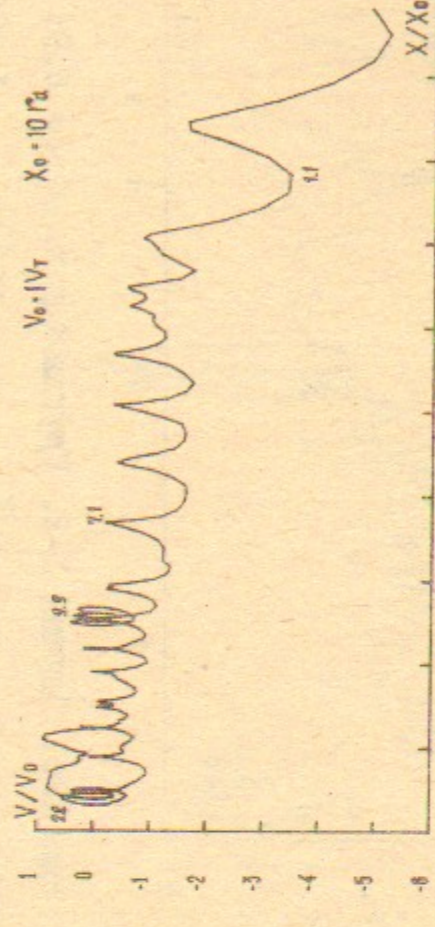


Рис. 18г. Случай 3-2. Группа 7; $X_0/r_d = 11,75$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_c = 5$; $V_\phi^N/V_T = 3,638$.

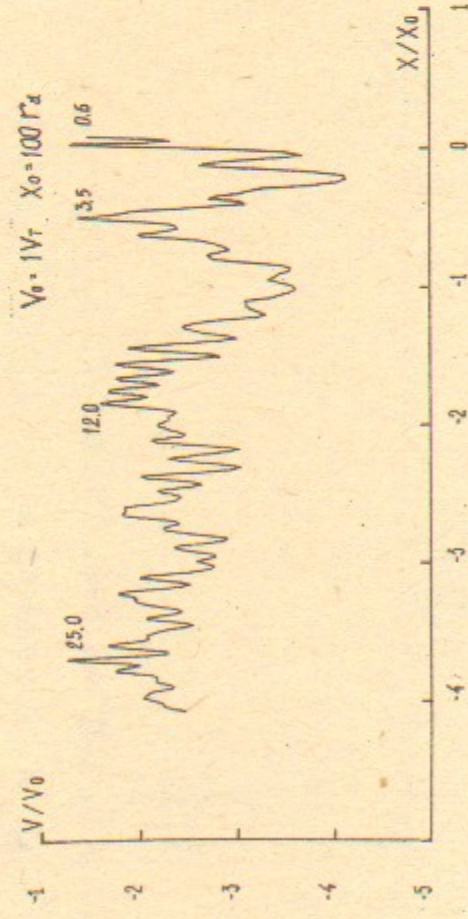


Рис.19а. Случай 3-2. Груша 7; $X_0/\Gamma_d = 8,9$;
 $V_0^0 = 0$. В лабор. системе.

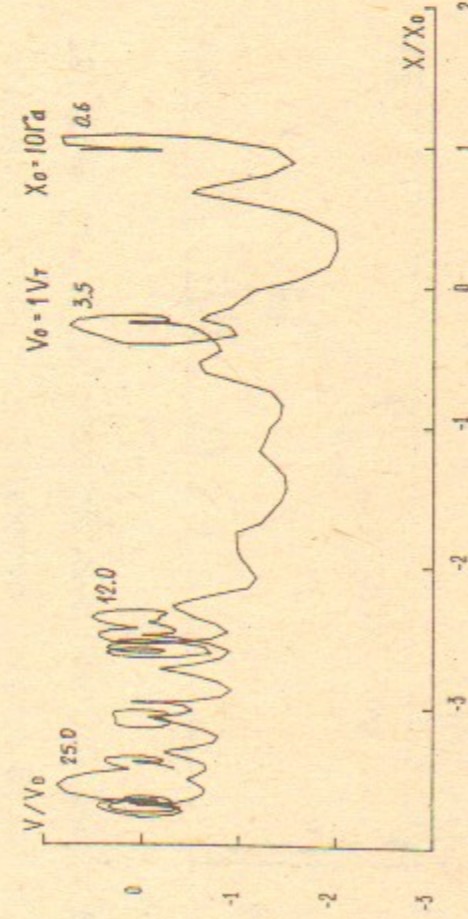


Рис.19в. Случай 3-2. Груша 7; $X_0/\Gamma_d = 8,9$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_e = -13$; $V_{\Phi}^N/V_T = -2,1246$.

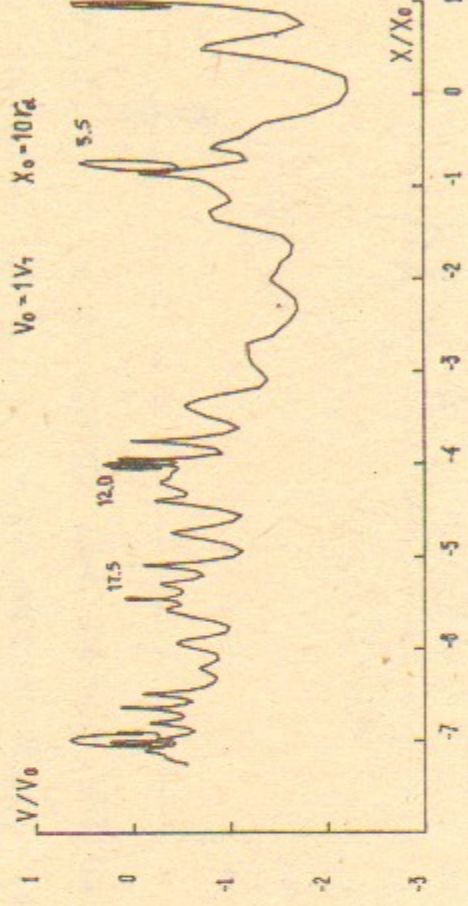


Рис.19г. Случай 3-2. Груша 7; $X_0/\Gamma_d = 8,9$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_e = -20$; $V_{\Phi}^N/V_T = -1,908$.

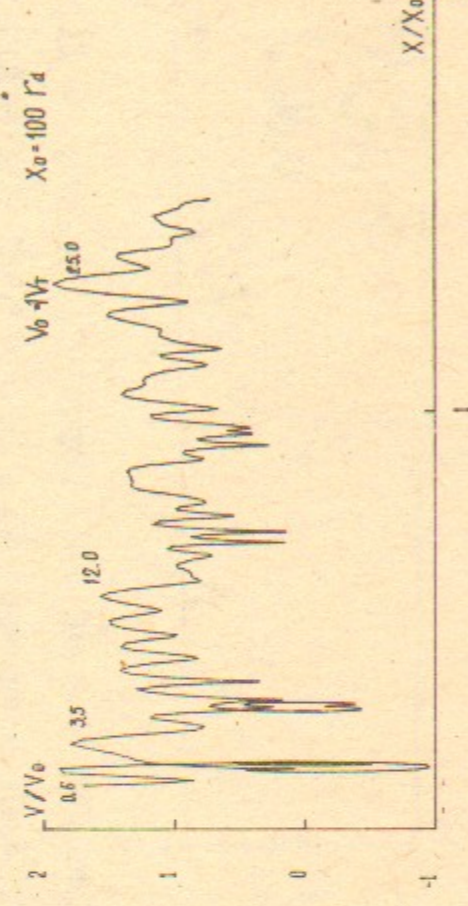


Рис.19г. Случай 3-2. Груша 7; $X_0/\Gamma_d = 8,9$;
 $V_0^0 = 0$. В системе $N_e = -6$; $V_{\Phi}^N/V_T = -3,179$.

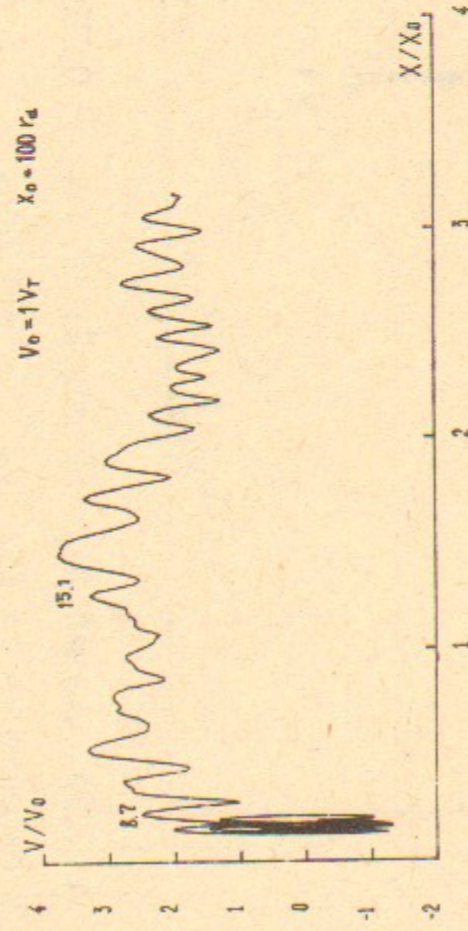


Рис.20а. Случай 3-2. Груша I; $V_0/V_T = 0,095$.
 В лабор. системе.

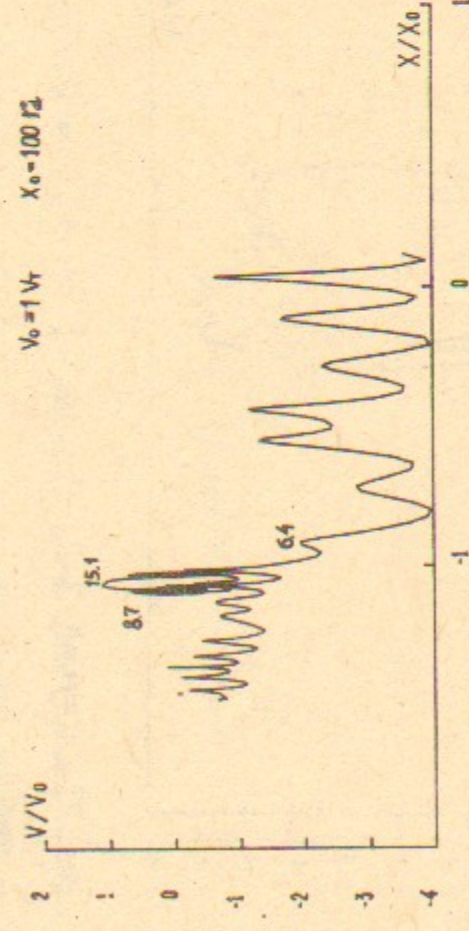


Рис.20в. Случай 3-2. Груша I; $V_0/V_T = 0,095$.
 В системе $N_e = 8$; $V_{\Phi}^N/V_T = 2,6413$.

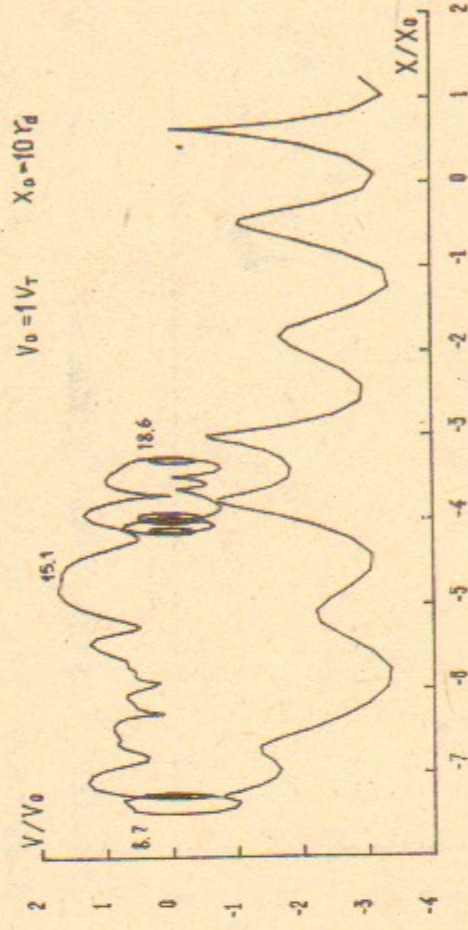


Рис.20б. Случай 3-2. Груша I; $V_0/V_T = 0,095$.
 В системе $N_e = 15$; $V_{\Phi}^N/V_T = 2,034$.

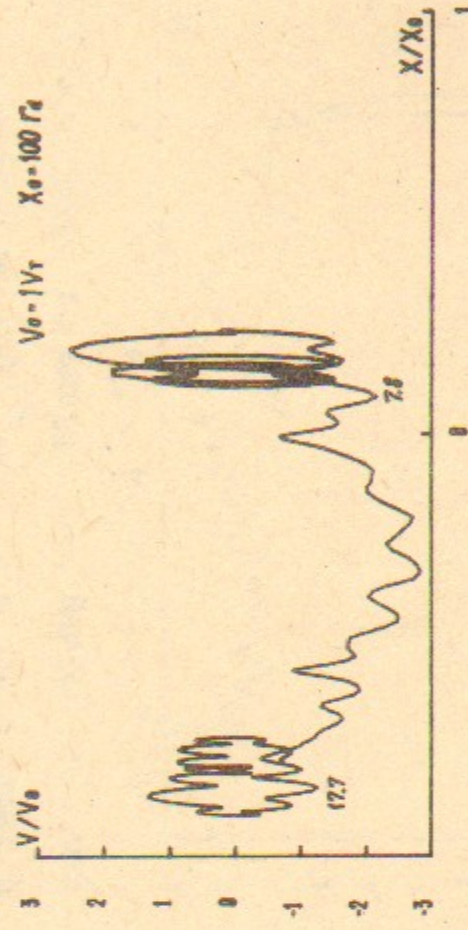


Рис.20г. Случай 3-2. Груша I; $V_0/V_T = 0,095$.
 В лабор. системе.

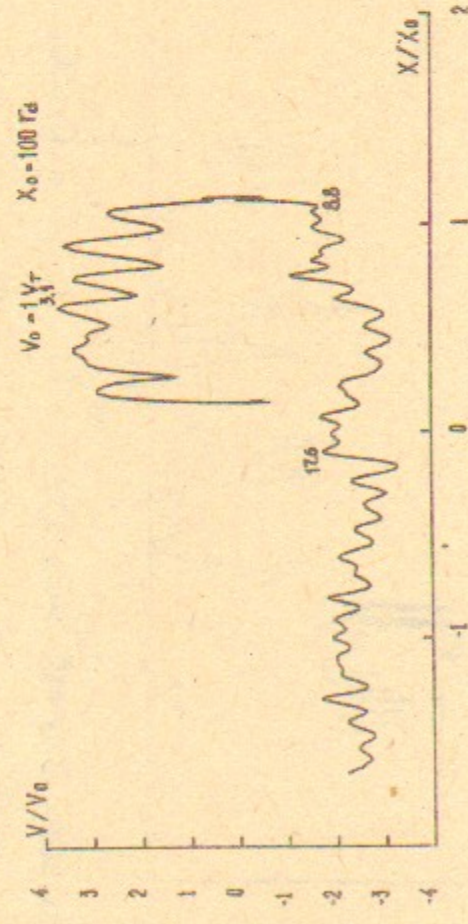


Рис. 21а. Случай 3-2. Группа 2; $V_0/V_T = 0,716$.

В лабор. системе.

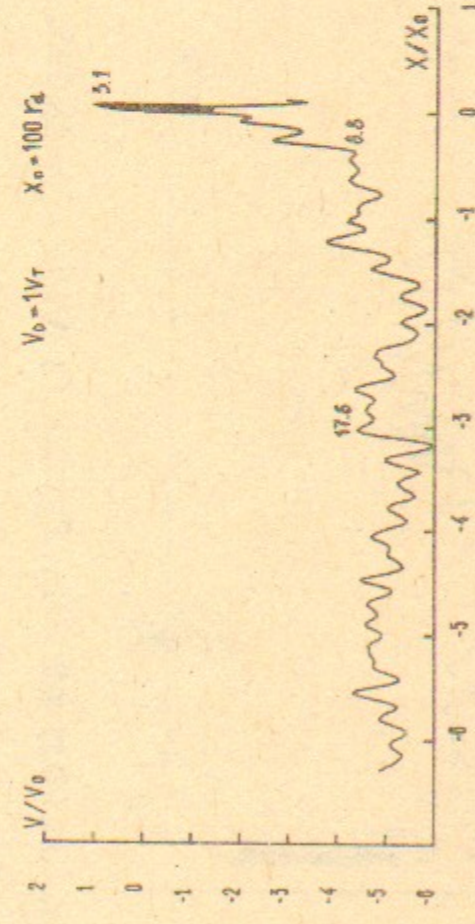


Рис. 21в. Случай 3-2. Группа 2; $V_0/V_T = 0,716$.

В системе $N_i = 15$; $V_{\Phi}^N/V_T = 2,054$.

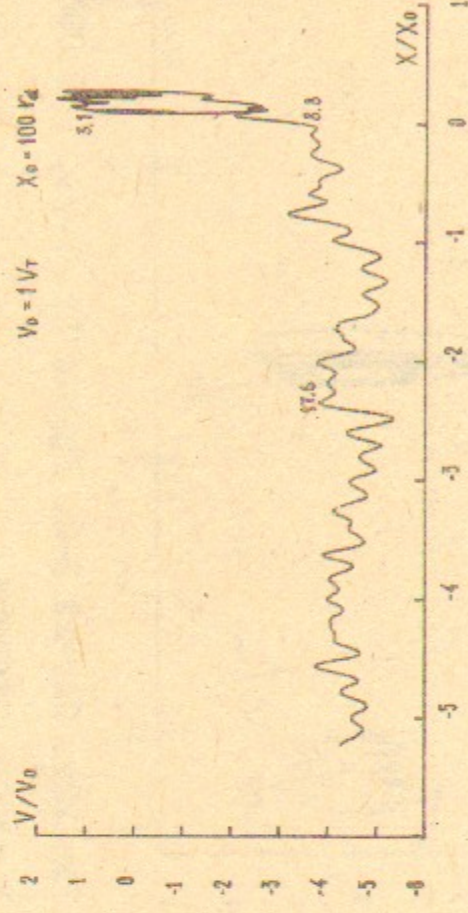


Рис. 21б. Случай 3-2. Группа 2; $V_0/V_T = 0,716$.

В системе $N_i = 8$; $V_{\Phi}^N/V_T = 2,645$.

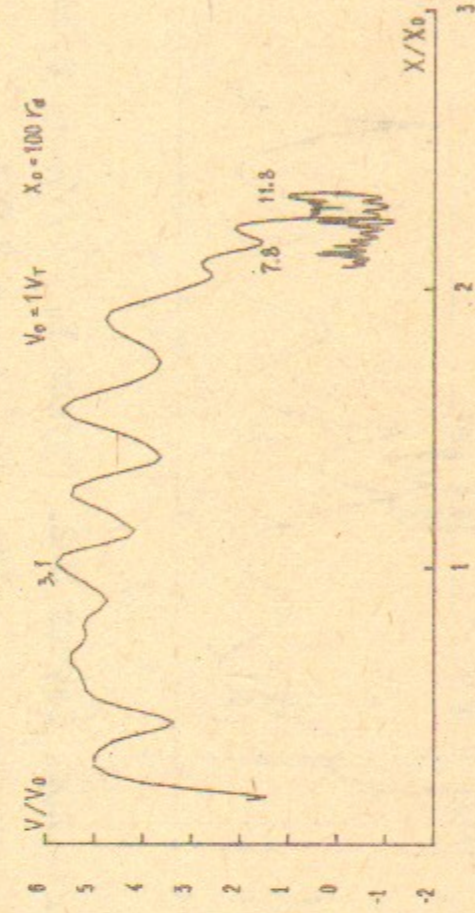


Рис. 21г. Случай 3-2. Группа 2; $V_0/V_T = 0,716$.

В системе $N_i = -13$; $V_{\Phi}^N/V_T = -2,1246$.

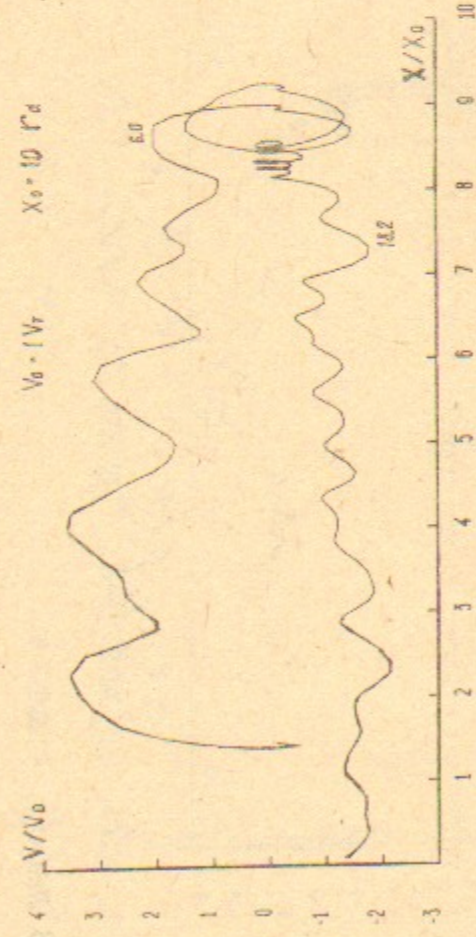


Рис. 22а. Случай 3-2. Группа 3; $V_0/V_T = 0,955$.

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

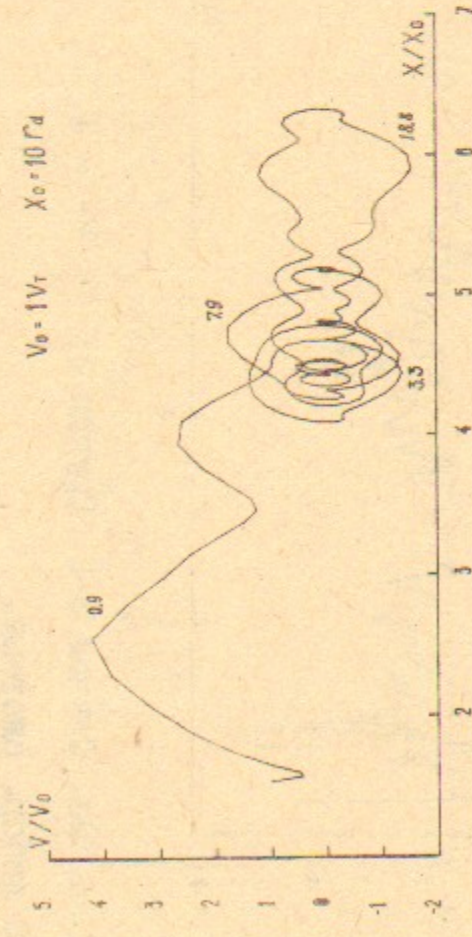


Рис. 22в. Случай 3-2. Группа 5; $V_0/V_T = 2,123$.

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

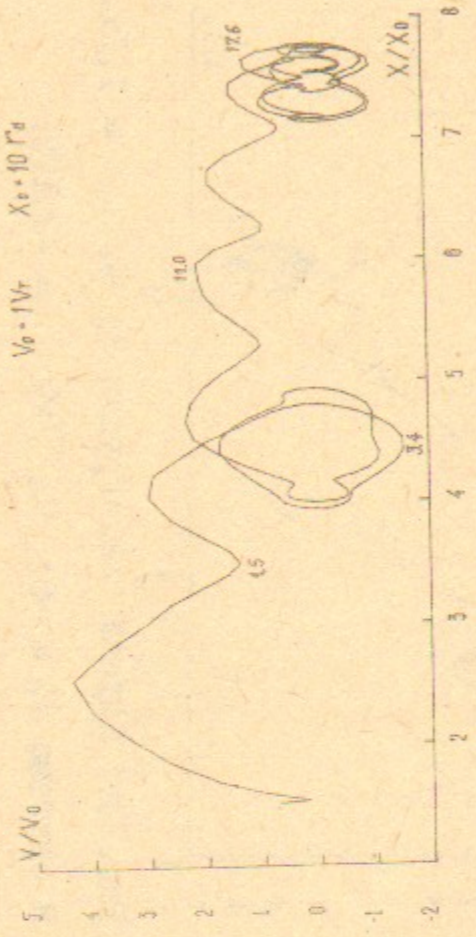


Рис. 22б. Случай 3-2. Группа 3; $V_0/V_T = 1,846$.

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

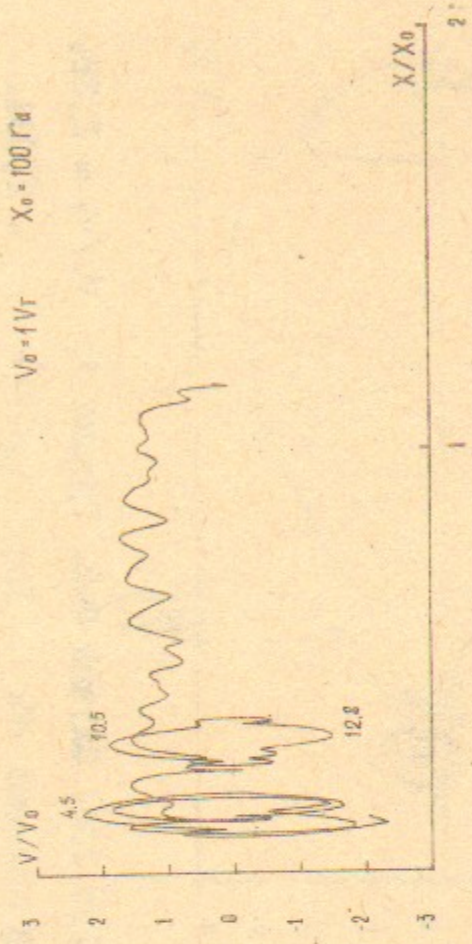


Рис. 22г. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -0,455$.

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

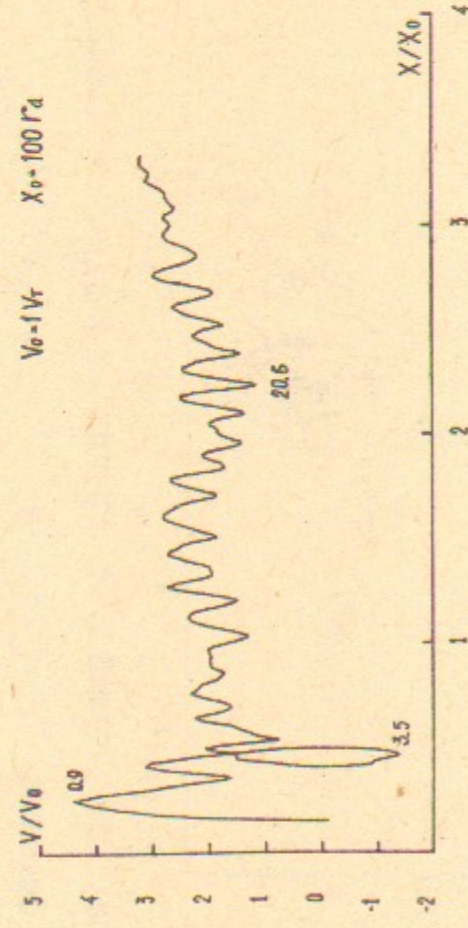


Рис. 23а. Случай 3-2. Группа 3; $V_0/V_T = 1,38$.
 В лабор. системе.

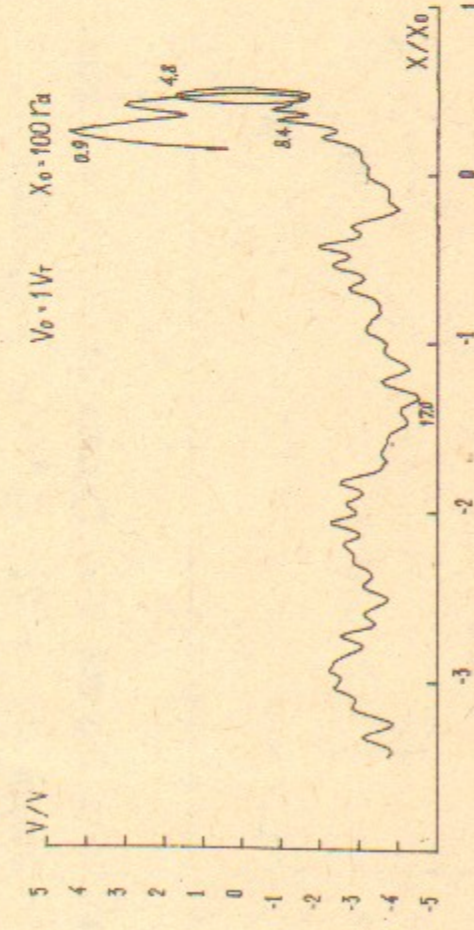


Рис. 23в. Случай 3-2. Группа 3; $V_0/V_T = 1,94$.
 В лабор. системе.

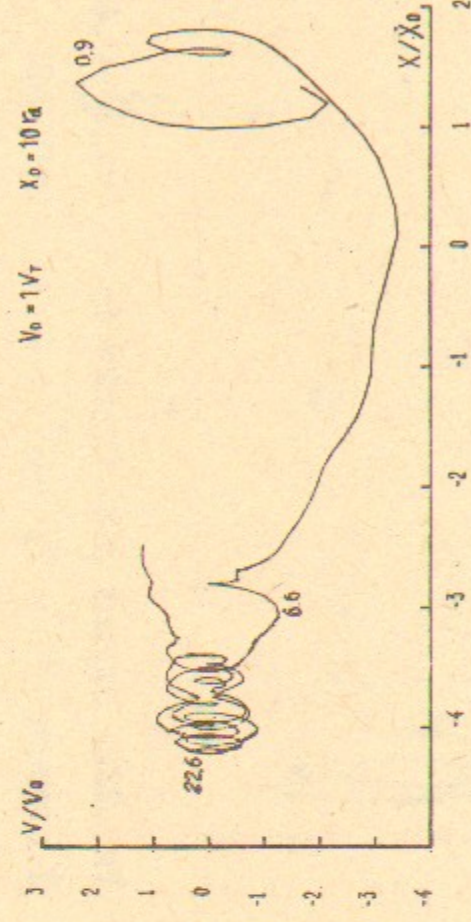


Рис. 23б. Случай 3-2. Группа 3; $V_0/V_T = 1,38$.
 В системе $N_e = 15$; $V_\phi^N/V_T = 2,034$.

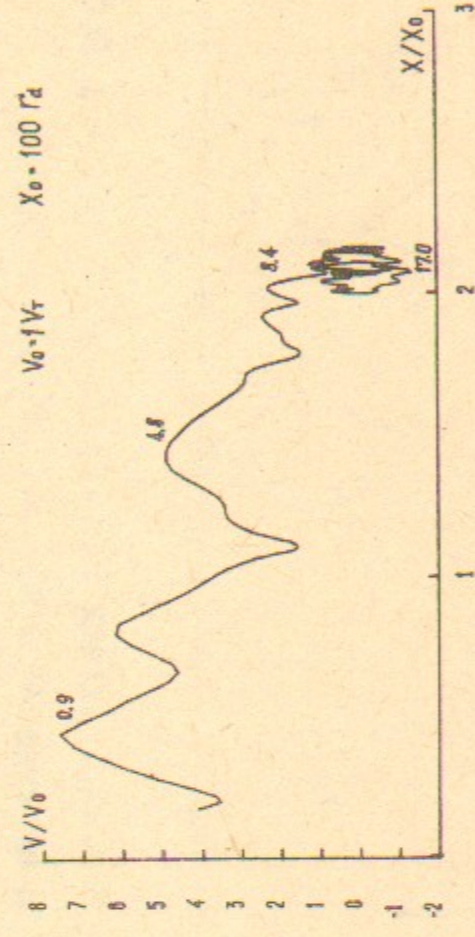


Рис. 23г. Случай 3-2. Группа 3; $V_0/V_T = 1,94$.
 В системе $N_e = -6$; $V_\phi^N/V_T = -3,179$.

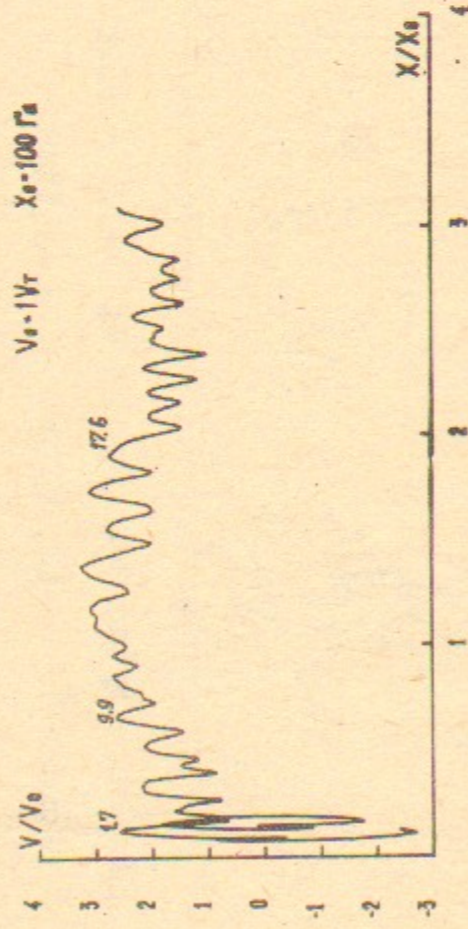


Рис. 24а. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -1,51$.
 В лабор. системе.

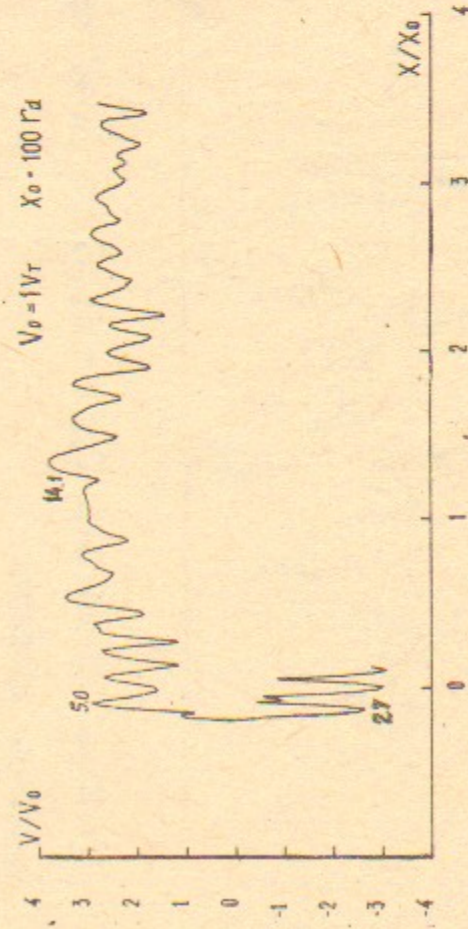


Рис. 24в. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -2,013$.
 В лабор. системе.

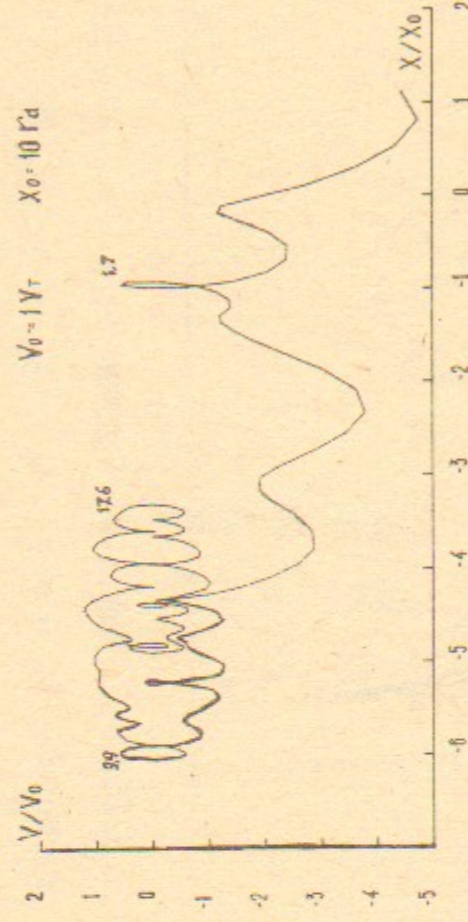


Рис. 24б. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -1,51$.
 В системе $N_e = 15$; $V_\phi^N/V_T = 2,034$.

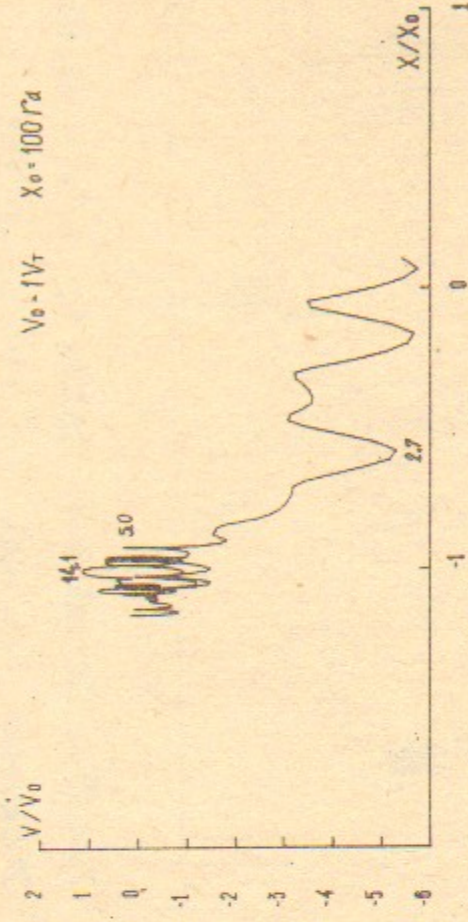


Рис. 24г. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -2,013$.
 В системе $N_e = 8$; $V_\phi^N/V_T = 2,6453$.

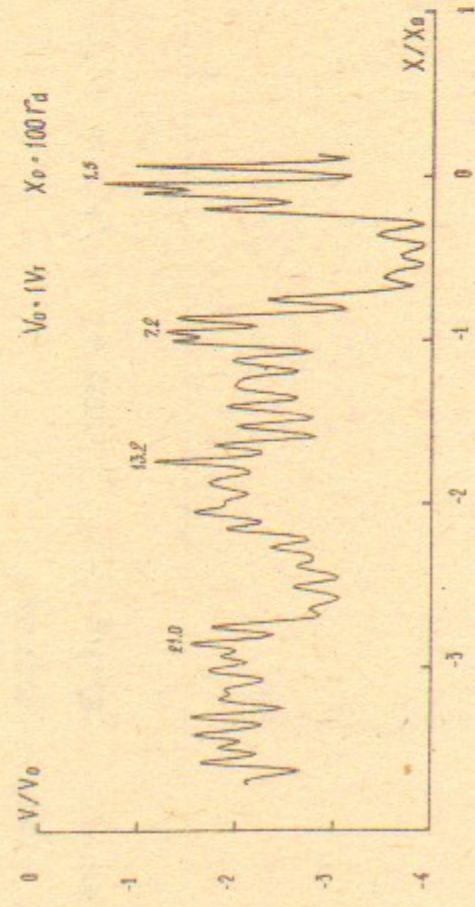


Рис. 25а. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -1,85$.
В лабор. системе.

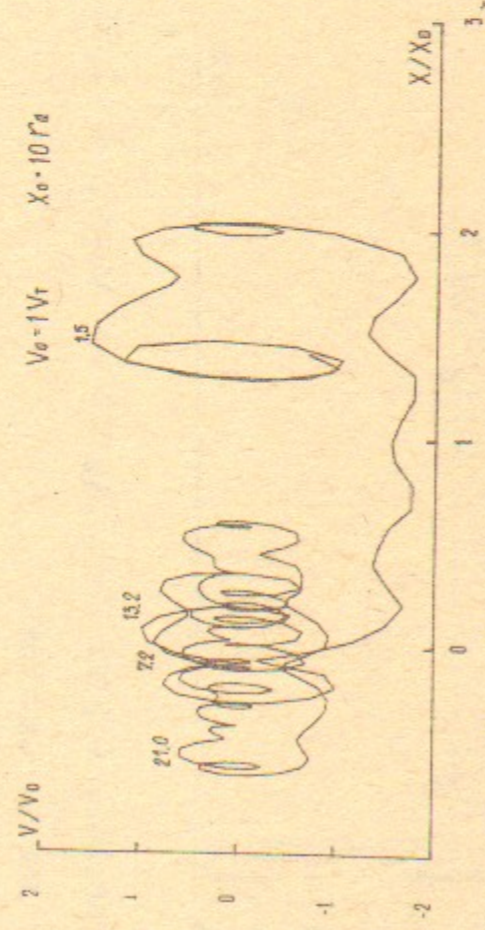


Рис. 25в. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -1,85$.
В системе $N_e = -13$; $V_{\phi}^N/V_T = -2,1246$.

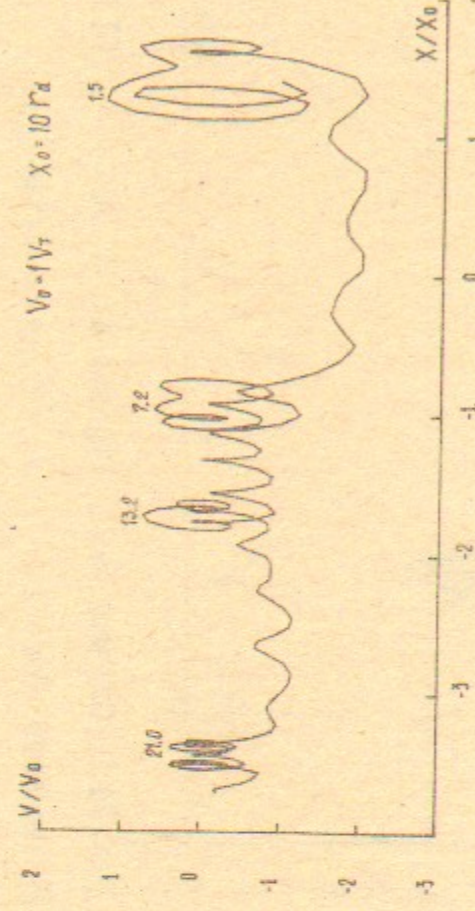


Рис. 25б. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -1,85$.
В системе $N_e = -20$; $V_{\phi}^N/V_T = -1,908$.

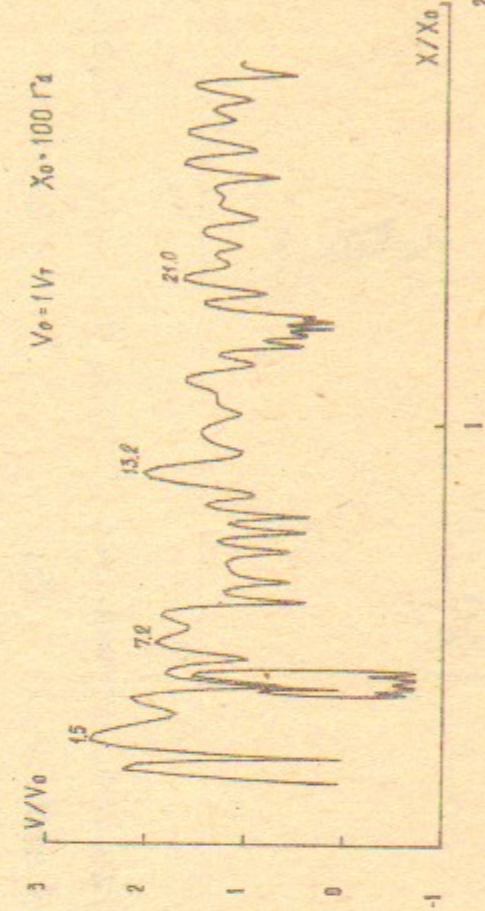


Рис. 25г. Случай 3-2. Группа 4; $V_0/V_T = -1,85$.
В системе $N_e = -6$; $V_{\phi}^N/V_T = -3,179$.

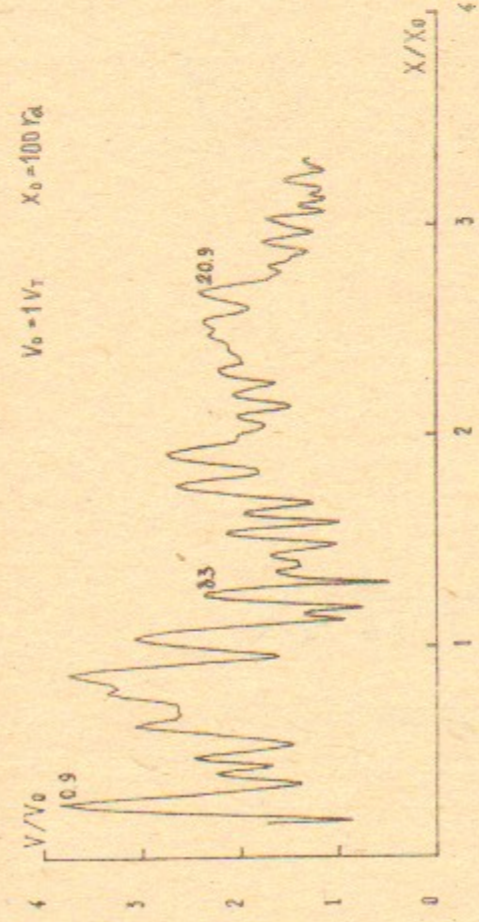


Рис. 26а. Случай 3-2. Группа 5; $V_0/V_T = 2,77$.
В лабор. системе.

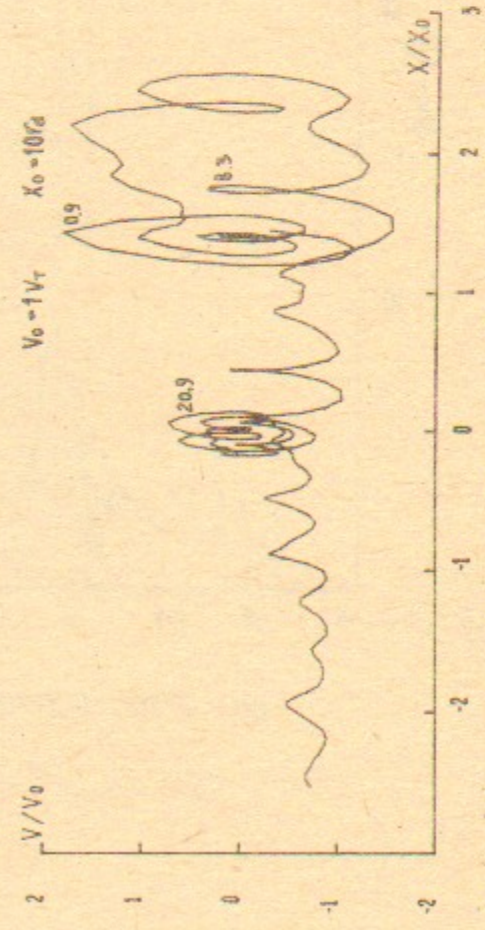


Рис. 26в. Случай 3-2. Группа 5; $V_0/V_T = 2,77$.
В системе $N_e = 15$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,034$.



Рис. 26б. Случай 3-2. Группа 5; $V_0/V_T = 2,77$.
В системе $N_e = 22$; $V_{\phi}^N/V_T = 1,878$.

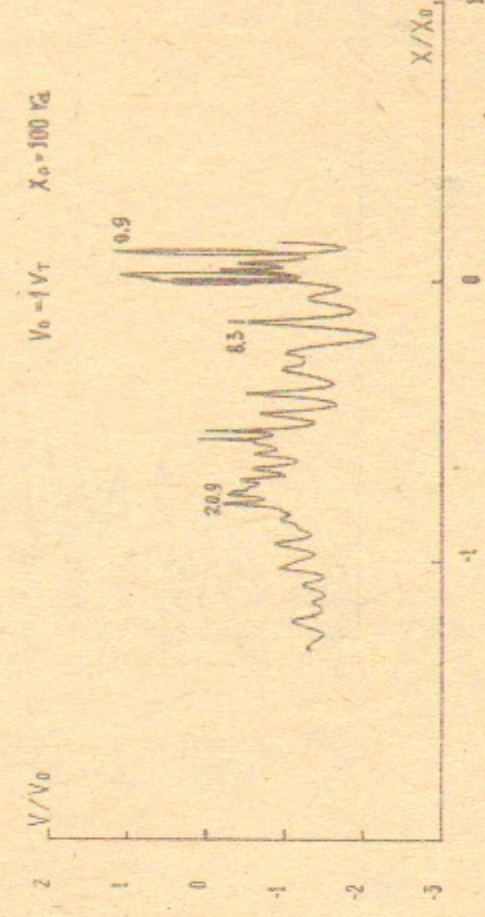


Рис. 26г. Случай 3-2. Группа 5; $V_0/V_T = 2,77$.
В системе $N_e = 8$; $V_{\phi}^N/V_T = 2,645$.

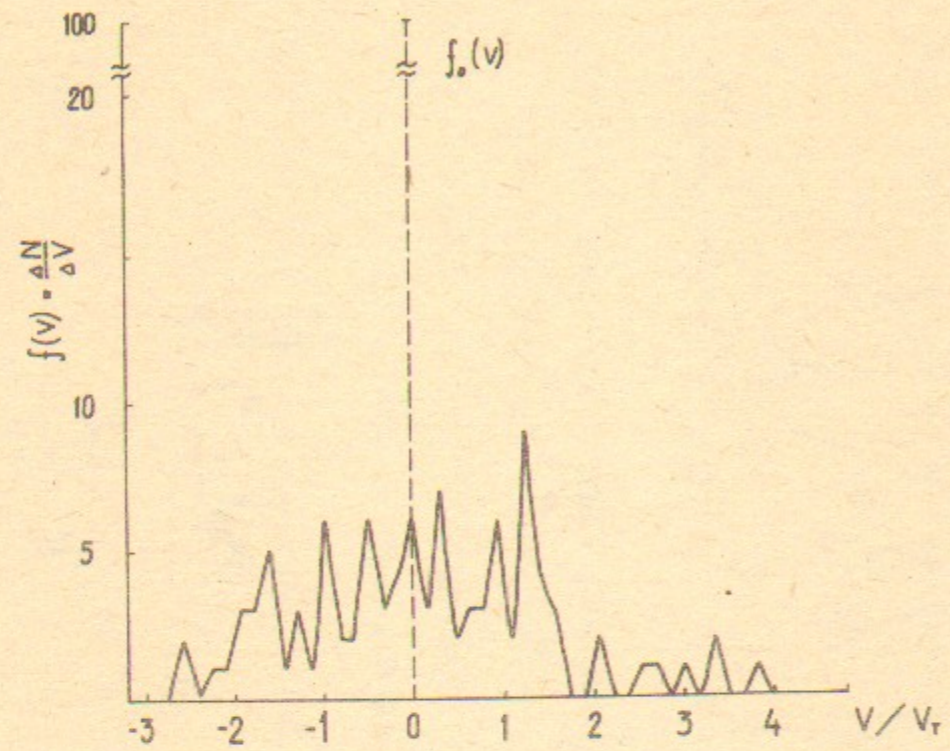


Рис. 27а. Случай 4-І. Группа 7.

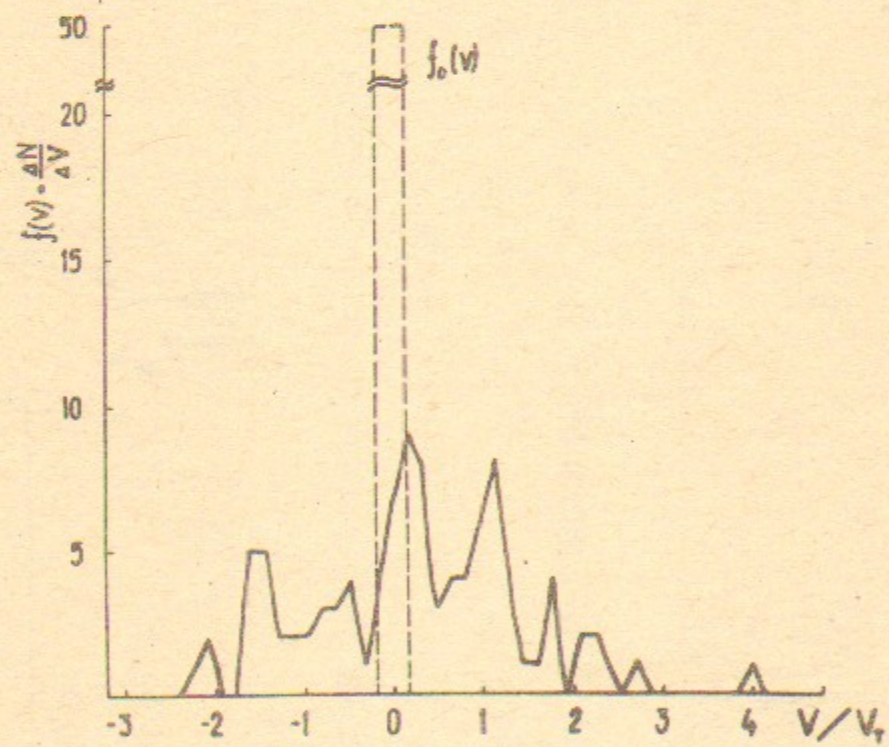


Рис. 27б. Случай 4-І. Группа I.

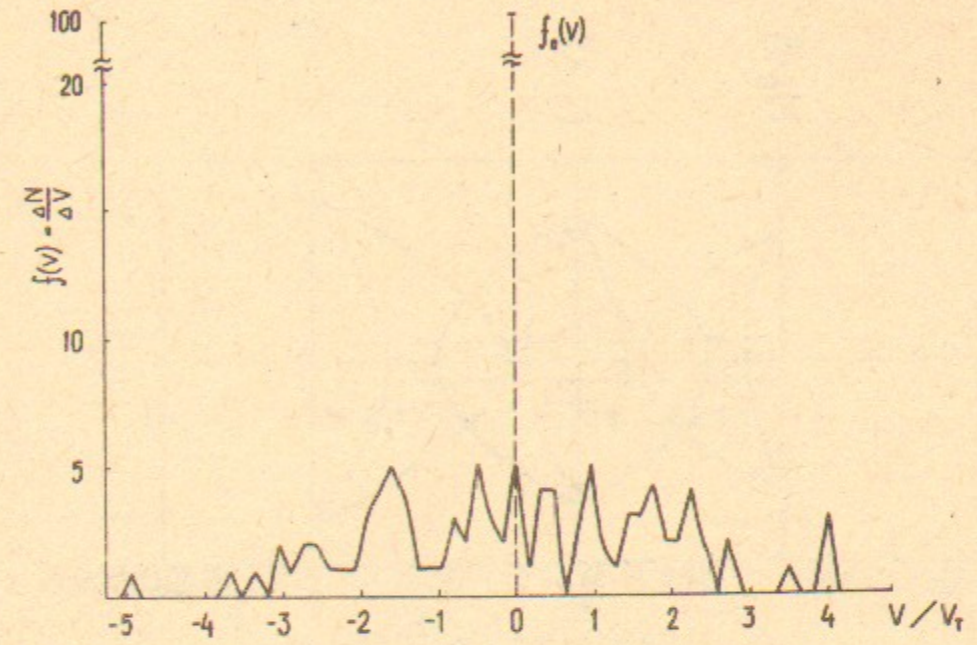


Рис. 27в. Случай 3-2. Группа 7.

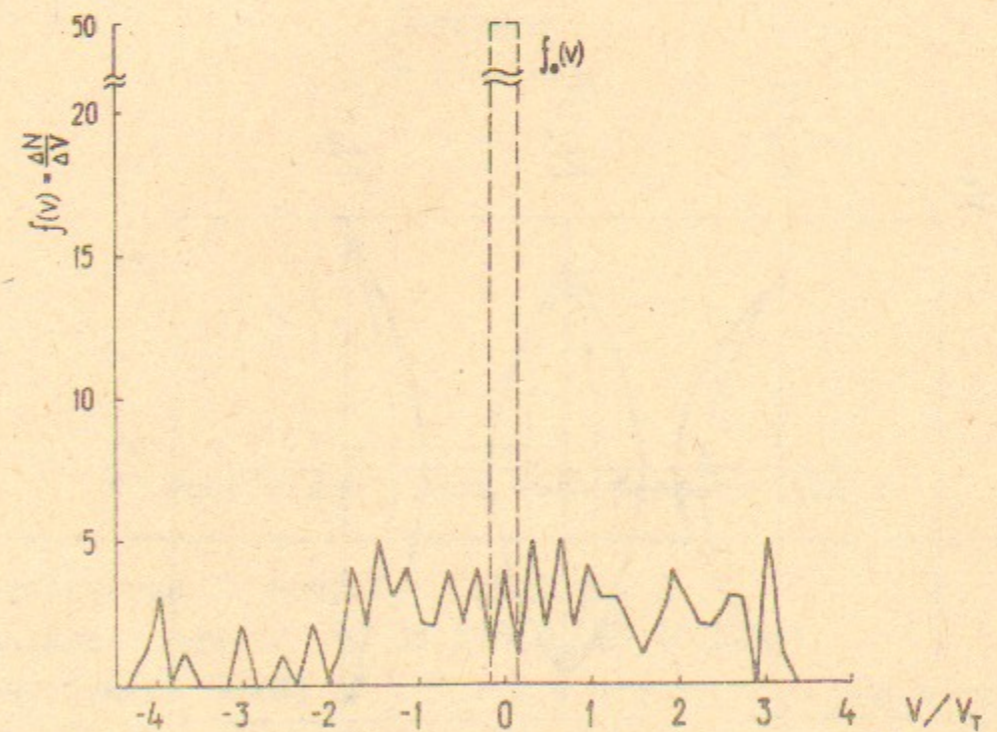


Рис. 27г. Случай 3-2. Группа I.

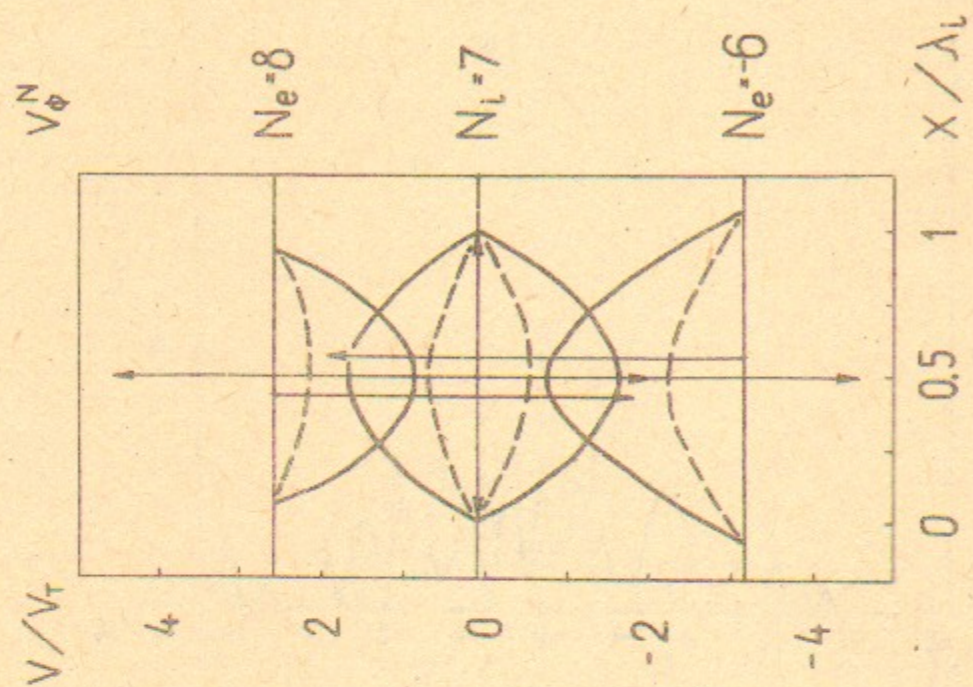


Рис. 286. Случай 3-2.

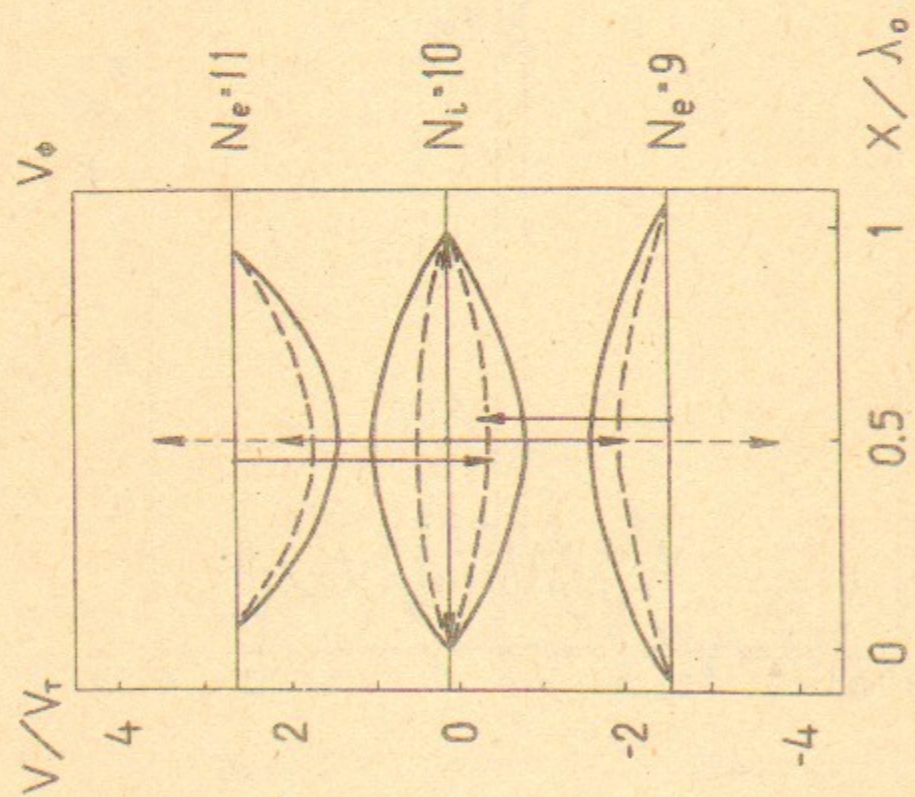


Рис. 28а. Случай 4-1.

Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин

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

Препринт
№ 89-

Работа поступила - 13 февраля 1989 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 23.03.1989г. МН 10103
Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.3,9 печ.л., 3,0 учетно-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 36

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90