

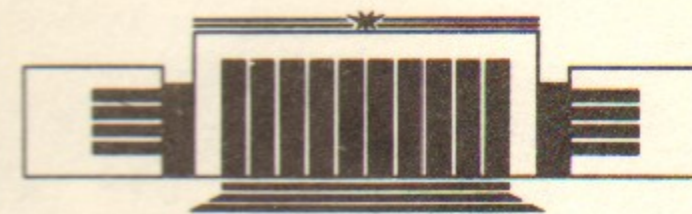


6
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

**ИОННО-ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ
БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ.
СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. I.**

ПРЕПРИНТ 90-7



НОВОСИБИРСК

ИОННО-ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ.
СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. I.

Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин

А Н Н О Т А Ц И Я

Проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию стохастической неустойчивости движения электронов при развитии одномерных нелинейных бегущих ионно-звуковых волн. Начальные параметры волн $\tilde{n}/n_0 \sim 0,2-1$; $\lambda_i/r_d \sim 10-50$; $N_i = \omega^2/\lambda_i \sim 2-10$ соответствуют случаям волны близкой к линейной, нелинейной, сильно-нелинейной (с захватом ионов) и волны с опрокидыванием.

Показано, что развитие нелинейной ионно-звуковой волны сопровождается развитием стохастической неустойчивости движения электронов, скорость которой растет с ростом нелинейности волны (с ростом N_i и \tilde{n}/n_0).

В случаях 3-1 и 4-1 ($\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 14,3$ и 10) изучено развитие стохастической неустойчивости и формирование стохастического слоя. Показано, что в $t/T_{oe} \sim 30-50$ стохастический слой занимает практически всю начальную область захвата электронов в ионно-звуковой волне и часть фазового пространства вне ее.

LARGE AMPLITUDE ION-SOUND WAVES. STOCHASTIC PHENOMENA. I.

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 instability of the electron motion in the course of the evolution of one-dimensional nonlinear ion-sound waves. The initial parameters of the ion-sound waves $\tilde{n}/n_0 \sim 0,2-1$; $\lambda_i/r_d \sim 10-50$; $N_i = \tilde{n}/\lambda_i \sim 2-10$ correspond to the cases of the linear, nonlinear, strongly nonlinear (with ion trapping) and breaking waves.

It is shown that the evolution of the nonlinear ion-sound wave is accompanied by the development of the stochastic instability of the electron motion. The growth rate of the instability increases with increasing nonlinearity of the wave (with increasing N_i and \tilde{n}/n_0).

In the cases 3-1 and 4-1 ($\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $\lambda_i/r_d = 14,3$ and 10) the evolution of the stochastic instability and the formation of the stochastic layer is studied. It is shown that at $t/T_{oe} > 30-50$ the stochastic layer includes all the initial trapping region of the electrons in the ion-sound wave and a part of the phase space outside it.

ИОННО-ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ.
СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. I.

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

Ранее нами были выполнены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию неустойчивости одномерных ленгмюровских волн при их взаимодействии с ионно-звуковыми волнами с $\lambda_i < \lambda_e / I$. Было показано, что основными процессами, определяющими развитие неустойчивости, являются конверсия ленгмюровской волны на ионно-звуковой /2,3/, модуляционная неустойчивость (действие пондеромоторной силы) и захват электронов плазмы гармониками волны. В работе /4/ исследовался механизм затухания поля и поглощения энергии электронами плазмы. Было показано, что основную роль играет захват электронов плазмы и развитие стохастических неустойчивостей (образование стохастических слоев) или сильных стохастических неустойчивостей в районе областей захвата ионно-звуковой волны и тех или иных гармоник ленгмюровской волны. В зависимости от характера этих процессов энергия поля поглощается нагревом основной массы электронов или хвостами ускоренных электронов. При параметрах волн, рассмотренных в /1,4/ развитие неустойчивости ленгмюровской волны в основном завершается за $t/T_{oe} \sim 10-15$, а развитие стохастических процессов и затухание - за $t/T_{oe} \sim 30$.

При исследовании неустойчивости ленгмюровских волн /1/ и стохастических эффектов /4/ было найдено, что заметную роль играют также процессы, связанные с ионной нелинейностью, в частности, с собственной нелинейностью ионно-звуковых волн и захватом ими ионов. В работе /5/ были исследованы бегущие ионно-звуковые волны в диапазоне параметров, представляющем интерес для работ /1,4/. Нелинейность ионно-звуковой волны проявляется в ее укрупнении, начальная стадия захвата ионов - в ускорении ионов. Скорость развития укрупнения и ускорения ионов зависит от периода ионно-звуковой волны T^i и периода захваченных ионов T_B^i . Для работ /1,4/ представляют интерес случаи, когда ионная нелинейность становится существенной на стадии развития основных процессов, поэтому в работе /5/ рассматривалось развитие ионной нелинейности за $t/T_{oe} \sim 15$ и только в некоторых случаях - за $t \sim T^i$.

В работе /5/ определены границы нелинейности и захвата ионно-звуковых волн - начальные параметры ($\tilde{n}/n_0, \lambda_i/r_d$) волн, при которых за $t/T_{oe} \sim 15$ происходит заметное укрупнение волны или начинается ускорение ионов с начальными невозмущенными скоростями $V_0 \lesssim 2V_T^i$ (начальная максвелловская функция распределения ионов обрезана на $V_0 \sim \pm 2V_T^i$). Рассмотрена эволюция нелинейной ионно-звуковой волны, развитие волны при захвате ионов. При развитии ионной нелинейности и на начальной стадии захвата волна укрупняется, формируются фронты скорости и плотности.

Эволюция нелинейных ионно-звуковых волн более подробно рассмотрена нами в работе /6/ при исследовании стоячих ионно-звуковых волн (при задании начального синусоидального возмущения скорости ионов). В случае стоячих волн при развитии ионной нелинейности и на начальной стадии захвата также формируются фронты плотности и скорости ионов. В работе /7/ показано, что на фронте волны в области шириной порядка нескольких дебаевских радиусов возникает скачок потенциала, т.е. образуется двойной электрический слой. Хотя в работе /5/ развитие потенциала не изучалось, есть все основания полагать, что и на фронте бегущей волны будет возникать скачок потенциала - двойной электрический слой.

В работе /4/ мы обращали внимание на возможную роль ионной нелинейности, в частности, образования двойных слоев, в развитии стохастического движения электронов. В настоящей работе исследуются ионно-звуковые волны с параметрами работы /4/, изучавшиеся ранее в работе /5/. Изучаются траектории движения пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости, поведение групп пробных частиц на фазовой плоскости с целью изучения стохастических явлений, обусловленных ионной нелинейностью ионно-звуковой волны.

Первая часть работы является вспомогательной по отношению к работе /4/, хотя имеет и самостоятельное значение. В этой части нас интересовали те процессы, которые становятся существенными за время развития основных процессов в работе /4/ - $t/T_{oe} \lesssim 30$. Для исследования полной картины стохастического движения электронов в ионно-звуковой волне этого времени заведомо недостаточно. В этой части работы нас интересовали некоторые первичные события, необходимые для развития стохастичес-

кого движения, такие, как выход из захвата ионно-звуковой волной электронов, захваченных в начальный момент времени, вторичный захват таких электронов и т.п. Как показано в работе /4/, при взаимодействии ленгмювской волны с ионно-звуковой такие электроны участвуют в стохастическом движении.

В настоящей работе показано, что в "линейной" ионно-звуковой волне все электроны, захваченные в начальный момент, остаются захваченными и позже. В нелинейной волне часть электронов выходит из захвата, причем время выхода из захвата коррелировано с укрупнением волны. В первую очередь из захвата выходят электроны с начальными координатами x_0, v_0 , близкими к сепаратрисе. С увеличением нелинейности волны при уменьшении λ_i и росте амплитуды область x_0, v_0 , из которой электроны выходят из захвата, растет. Движение электронов, вышедших из захвата, имеет черты стохастического, так что эту область x_0, v_0 можно назвать стохастическим слоем. Существование такой области подтверждает, что ионная нелинейность играет роль в развитии стохастической неустойчивости движения электронов при взаимодействии ленгмювской волны с ионно-звуковой, изучавшемся в работе /4/.

Во второй части работы в двух случаях ($\lambda_i/r_d = 10$ и $14,3$; $\tilde{n}/n_0 = 0,2$) изучалось более длительное (за $t/T_{oe} \sim 110$) развитие нелинейной ионно-звуковой волны. Было найдено, что в этих случаях с течением времени область x_0, v_0 , из которой электроны выходят из захвата, растет до тех пор, пока не займет практически всю область захвата. Движение электронов, вышедших из захвата, имеет стохастический характер. Они то захватываются, то вновь выходят из захвата через случайные промежутки времени. Траектории электронов с близкими x_0, v_0 различаются и расходятся на фазовой плоскости. Таким образом, можно утверждать, что развитие нелинейной ионно-звуковой волны сопровождается развитием стохастической неустойчивости движения электронов. В $t/T_{oe} < 30$ наблюдается начальная стадия этой неустойчивости. Развитие стохастической неустойчивости приводит к формированию стохастического слоя - области фазового пространства, в которой движение электронов является стохастическим.

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

Для задания бегущей ионно-звуковой волны в начальный момент времени задаются синусоидальные возмущения плотности электронов и ионов $\tilde{n}_e(x) = \tilde{n}_i(x)$ и возмущение скоростей, соответствующее фазовой скорости ионно-звуковой волны

$$V_\phi^i = C_s / [1 + (k_i r_d)^2]^{1/2}; \quad C_s = \sqrt{T_e/M}; \quad k_i = 2\pi/\lambda_i.$$

Начальные параметры ионно-звуковых волн приведены в таблице I.

На Рис. I показаны границы ионной нелинейности (I) и граница захвата ионов с $V_0 \sim 2V_T$, найденные ранее за $t/t_{oe} \sim 15/5$ и нанесены точки - начальные параметры рассматриваемых в настоящей работе ионно-звуковых волн. Видно, что в случае I-I волна близка к линейной, в случаях 2-I, 3-I волна нелинейная, в случае 4-I - параметры лежат вблизи границы захвата, а в случаях 3-2, 3-3 много выше границы захвата. Случай 3-2 лежит вблизи границы X-опрокидывания [6], а случай 3-3 - выше нее.

Для исследования движения электронов в начальный момент времени задаются группы пробных частиц ($e = m = 0$, e/m то же, что у электронов). Начальные координаты частиц x_0 , V_0 и сепаратриса ионно-звуковой волны показаны на Рис. 2. На этом рисунке показано также начальное распределение возмущения плотности $\tilde{n}(x)$ и скорости $\tilde{V}(x)$ ионов. Координаты узлов сепаратрисы x_1, x_2 приведены в таблице 2. Начальное x_0 всех частиц совпадает с координатой максимума сепаратрисы x_m , скорости V_0 различаются, но все x_0, V_0 лежат внутри области захвата. Предельные V_0 частиц в группах приведены в таблице 2.

При исследовании стохастических эффектов изучаются траектории движения пробных частиц на фазовой плоскости $x-V$ в лабораторной системе координат и в системе координат ионно-звуковой волны. Траектории в системе волны могут быть несколько искажены, так как мы не учитывали изменение фазовой скорости нелинейной волны во времени, а использовали или начальную или

Таблица I.

Нумерация случаев и начальные данные ионно-звуковых волн.

Случай	I-I	2-I	3-I	4-I	3-2	3-3	Тип волны
N_i	2	5	7	10	7	7	
\tilde{n}/n_0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,67	0,97	
λ_i/r_d	50	20	14,3	10	14,3	14,3	
V_ϕ^i/V_T	$9,92 \cdot 10^{-2}$	$9,54 \cdot 10^{-2}$	$9,15 \cdot 10^{-2}$	$8,47 \cdot 10^{-2}$	$9,15 \cdot 10^{-2}$	$9,15 \cdot 10^{-2}$	
V_ϕ^i/V_T^i	5,43	5,23	5,01	4,64	5,01	5,01	
T^i/T_{oe}	80,2	33,4	24,8	18,8	24,8	24,8	
T_g^i/T_{oe}	179	71	51	36	28	23	
	слабо нелин.	нелин.	нелин.	сильно нелин.	X-опрок.	опрокид.	

Случай в работе /5/

2-5

2-4

3-2

3-3

3-4

$$N_i = L/\lambda_i; \quad V_\phi^i = C_s / [1 + (k_i r_d)^2]^{1/2}; \quad C_s = \sqrt{T_e/M} = 0,1 V_T; \quad k_i = 2\pi/\lambda_i; \quad V_T = \sqrt{T_e/m}; \quad V_T^i = \sqrt{T_i/M}; \quad T^i = \lambda_i / V_\phi^i$$

$$T_B^i = \frac{2\pi}{k_i \sqrt{e\varphi}} \quad - \text{ период захваченных ионов.}$$

Таблица 2.

Начальные координаты пробных частиц.

Группа 1 $(V_0 - V_{\phi}^i)/V_{\beta_0}^i = -0,290 \pm 0,064$.

Группа 2 $(V_0 - V_{\phi}^i)/V_{\beta_0}^i = 0,69 \pm 0,36; -(0,83 \pm 0,39)$

Случай	1-1	2-1	3-1	4-1	3-2	3-2
Δn	100	100	100	100	100	100
X_1/r_d	25	10	7,1	15	7,1	7,1
X_2/r_d	75	30	21,4	25	21,4	21,4
$X_0/r_d = X_m/r_d$	50	20	14,3	20	14,3	14,3
V_0/V_T	-	-0,159±0,156	-0,159±0,156	-0,159±0,156	-0,286±0,286	-0,350±0,350
V_0/V_T	0,72±0,40	0,72±0,40	0,72±0,40	0,72±0,40	1,31±0,60	1,57±0,72
V_0/V_T	-(0,64±0,25)	-(0,64±0,25)	-(0,64±0,25)	-(0,64±0,25)	-(1,16±0,46)	-(1,40±0,54)

Группа 1

Группа 2

Δn - число частиц в группе; X_1, X_2, X_m - узлы и максимум (X_m) сепаратрисы; X_0, V_0 - начальные X и V частиц.

конечную V_{ϕ}^i . В большинстве случаев изменения V_{ϕ}^i невелики. Во всех случаях эта неточность не мешает четко различать захваченные частицы от выходящих из захвата и от захваченных вторично. Изучается также поведение групп пробных частиц на фазовой плоскости при развитии ионно-звуковой волны. Фазовые плоскости выводятся через $1-2 T_{oe}$. Определяется область начальных координат X_0, V_0 такая, что частицы с X_0, V_0 в этой области выходят из захвата. Амплитуда захвата $V_{\beta_0}^i$ и границы области захвата $V_{\phi}^i \pm V_{\beta_0}^i$ начальной ионно-звуковой волны приведены в таблице 3.

В этой же таблице 3 приведен период оборота электронов, захваченных ионно-звуковой волной, T_g^e . Зависимость T_g^e от номера гармоники N_i и амплитуды волны \tilde{n}/n_0 показана на Рис.3а,б.

В таблице 3 приведены также $V_{\beta t}^i, (V_{\phi}^i \pm V_{\beta t}^i), T_{\beta t}^e$ в конечный момент времени $t/T_{oe} \sim 28$. Отметим, что $V_{\beta t}^i = 2\sqrt{\frac{e\varphi_t}{m}}$ определялась через амплитуду возмущения плотности $\tilde{n}_t^{N_i}$ гармоники $N=N_i$ в момент времени t . При этом предполагалось, что выполняется условие $\tilde{n}_t^{N_i}/n_0 \approx e\varphi_t/T_e$.

Развитие нелинейной ионно-звуковой волны приводит к ее укрупнению-формированию фронта скорости и плотности шириной порядка нескольких дебаевских радиусов. На этом фронте возникает скачок потенциала и концентрируется электрическое поле, то есть возникает двойной электрический слой. На Рис.4а-д приведены фазовые плоскости ионов (распределение скорости ионов), распределение возмущения плотности $\tilde{n}(x)$ и распределение поля $E(x)$ в момент, когда достигается максимальное укрупнение для разных случаев. Распределение потенциала не приведено на Рис.4, так как почти не отличается от $\tilde{n}(x)$. Из Рис.4 видно, что поле действительно концентрируется на фронте волны в области $\Delta x/r_d \sim 4$.

Развитие нелинейной волны в разных случаях показано на Рис.5-9. Видно, что во всех случаях развивается захват ионов, а в случаях 3-2, 3-3 развитие волны имеет характер опрокидывания. На Рис.10а,б показана зависимость от N_i и \tilde{n}/n_0 времени t_1 , когда достигается максимальное укрупнение и t_2 , когда начинается захват ионов. Видно, что с ростом N_i и \tilde{n}/n_0 t_1 и t_2 уменьшаются.

Таблица 3.
Параметры ионно-звуковых волн.

Случай	1-1	2-1	3-1	4-1	3-2	3-3
N_i	2	5	7	10	7	7
\tilde{n}/n_0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,67	0,97
$V_{\beta 0}^i/V_T$	0,89	0,89	0,89	0,89	1,62	1,96
$(V_{\phi}^i + V_{\beta 0}^i)/V_T$	0,99	0,99	0,98	0,98	1,71	2,05
$(V_{\phi}^i - V_{\beta 0}^i)/V_T$	-0,79	-0,79	-0,80	-0,81	-1,53	-1,87
T_B^e/T_{oe}	17,9	7,1	5,1	3,6	2,8	2,3
\tilde{n}_t^i/n_0	0,17	0,13	0,12	0,11	0,10	0,03
$V_{\beta t}^i/V_T$	0,83	0,72	0,70	0,67	0,64	0,35
$(V_{\phi}^i + V_{\beta t}^i)/V_T$	0,93	0,81	0,79	0,75	0,73	0,45
$(V_{\phi}^i - V_{\beta t}^i)/V_T$	-0,73	-0,63	-0,60	-0,58	-0,54	-0,26
$T_{\beta t}^e/T_{oe}$	19,2	8,9	6,5	4,8	7,1	13

$V_{\beta 0}^i, V_{\beta t}^i = 21\sqrt{\frac{e\varphi_0}{m}}; 21\sqrt{\frac{e\varphi_t}{m}}$ - в $t = 0$ и $t/T_{oe} = 28$; $T_B^e, T_{\beta t}^e = k_i\sqrt{\frac{e\varphi_0}{m}}; k_i\sqrt{\frac{e\varphi_t}{m}}$ - период электронов, захваченных ионно-звуковой волной в $t = 0$ и $t/T_{oe} = 28$; $\tilde{n}_t^i, \tilde{n}_t^i$ - возмущение плотности гармоники $N = N_i$ в $t = 0$ и $t/T_{oe} = 28$.

Захват ионов на начальной стадии приводит к затуханию волны. Зависимость от времени амплитуды \tilde{n}^{N_i/n_0} гармоники $N = N_i$ и границ области захвата $(V_{\phi}^i \pm V_{\beta 0}^i)$ при разных N_i и \tilde{n}^i/n_0 приведена на Рис.11а-г. Начальная и конечная (в $t/T_{oe} \sim 28$) амплитуда захвата ионно-звуковой волны $V_{\beta 0}^i, t$ и границы области захвата $(V_{\phi}^i \pm V_{\beta 0}^i, t)$ приведены в таблице 3. На Рис.11в,г хорошо видна модуляция амплитуды волны после начального затухания в случаях 3-2, 3-3.

Рассмотрим движение пробных частиц на фазовой плоскости. Начальные координаты частиц групп 1 и 2 расположены внутри области захвата ионно-звуковой волны, причем в случаях с разными амплитудами одинаковы отношения $(V_0 - V_{\phi}^i)/V_{\beta 0}^i$ (Рис.2, Таблица 2). Можно ожидать, что частицы с такими начальными координатами будут захвачены ионно-звуковой волной. Действительно, в случае 1-1, когда волна близка к линейной, все частицы захвачены (Рис.12). Группы частиц остаются в пределах области захвата. В случае 2-1 все частицы группы 1 захвачены (Рис.13), хотя траектории их имеют более сложный характер, чем в случае 1-1. В группе 2 некоторые частицы захвачены, а некоторые (12 штук) выходят из захвата (Рис.14). Возмущение траекторий частиц малой энергии (Рис.13) наблюдается в $t/T_{oe} \geq 16-20$, когда в этом случае становится существенным укрупнение волны (максимальное укрупнение достигается в $t/T_{oe} \sim 29$). Несколько позже (в $t/T_{oe} \geq 20-22$) начинают выходить из захвата частицы группы 2.

В случае 3-1 частицы группы 1 по-прежнему захвачены до $t/T_{oe} \sim 28$ (Рис.15в,г; 16г), но в группе 2 заметная часть частиц (60 штук) выходит из захвата (Рис.15а,б; 16а,б), а некоторая часть остается захваченной (Рис.16в). Частицы начинают выходить из захвата в $t/T_{oe} \geq 10-12$, когда волна укрупняется (максимальное укрупнение достигается в $t/T_{oe} \sim 14-16$). Выйдя из захвата, частица становится пролетной с $v > 0$ (Рис.15б, 16б) или $v < 0$ (Рис.15а, 16а), а иногда захватывается вторично (Рис.16а). Отметим, что траектории частиц с близкими начальными координатами различаются и расходятся на фазовой плоскости (Рис.16а-в). Такой характер траекторий показывает, что движение электронов приобретает черты стохастического /8/.

В случае 3-1 выводились траектории пробных частиц группы 2, заданных в другой области захвата - $x_1/r_d = 50; x_2/r_d = 64,3; x_0/r_d = x_m/r_d = 57,2$. Здесь наблюдается та же картина:

часть частиц группы 2 (50 штук) выходит из захвата в $t/T_{oe} \approx 10-12$ (Рис.17а,б,г), часть остается захваченной (Рис.17в). Траектории частиц с близкими V_0 различаются (Рис.17а-в). Наблюдается также траектория с вторичным захватом и новым выходом из захвата (Рис.17а). Можно было ожидать, что траектории частиц с одинаковыми V_0 и разными X_0 будут одинаковы. Действительно, частицы с малыми V_0 типа частиц Рис.15б, 16в оказываются захваченными и траектории их отличаются незначительно. Однако, траектории частиц, выходящих из захвата различаются в $t/T_{oe} > 10-15$. Примером могут служить траектории Рис.15а-17а, 16б-17г. Это может быть объяснено тем, что X_0 задается недостаточно точно относительно максимума сепаратрисы, а малые различия начальных координат, как мы видели, приводят к большому различию траекторий. Кроме того, возможна роль погрешностей расчета: в случае 3-1 $\lambda_i/r_d = 14,3 r_d$, а длина ячейки $1 r_d$. Поскольку используется метод "спокойного старта" (в каждой ячейке задается максвелловское распределение частиц), на разных λ_i число частиц может несколько различаться, что приведет к небольшим различиям в развитии нелинейной волны и следовательно к различию траекторий. Мы считаем основным то, что сохраняется общий характер явления, хотя конкретные траектории несколько различаются, а также то, что область V_0 частиц, выходящих из захвата, в обоих случаях оказывается одинаковой.

В случае 4-1 максимальное укрупнение достигается в $t/T_{oe} \approx 10$. В этом случае заметная часть частиц группы 2 (71 шт.) и некоторые частицы группы 1 (16 штук) выходят из захвата (группа 2 в $t/T_{oe} \approx 6-8$, группа 1 в $t/T_{oe} \approx 26$). Типичные траектории показаны на Рис.18а,б; 19а-в. Часть частиц группы 2 и основная масса частиц группы 1 остаются захваченными (Рис.18в,г; 19г). Здесь также траектории близких частиц различаются (Рис.18а-в; 19а,б), многие частицы имеют сложные траектории и двигаются то как пролетные, то как захваченные. Например, частица Рис.19б выходит из захвата с $V > 0$, становится пролетной, затем снова захватывается. Частица Рис.19а выходит из захвата с $V < 0$, становится пролетной, захватывается, опять становится пролетной с $V > 0$, не совершив оборота, и снова захватывается. Частицы группы 2, вышедшие из захвата, разбрасываются по фазовой плоскости, заполняя всю длину системы. Все это указывает на стохастический характер их движения.

В случае 4-1, также как в случае 3-1, выводились траектории пробных частиц группы 2, заданных в другой области захвата $X_1/r_d = 45$; $X_2/r_d = 55$; $X_0/r_d = X_m/r_d = 50$. В этом случае длина волны $\lambda_i/r_d = 10$ содержит целое число ячеек. Оказалось, что в этом случае траектории совпадают до $t/T_{oe} \approx 19-21$, однако, потом начинают несколько различаться. Есть случаи, когда частица с $X_0/r_d = 20$ остается захваченной до $t/T_{oe} \approx 28$, а частица с тем же V_0 и $X_0/r_d = 50$ выходит из захвата в $t/T_{oe} > 20-25$. Есть и противоположные случаи, когда захваченной остается частица с $X_0/r_d = 50$, а частица с $X_0/r_d = 20$ выходит из захвата. В среднем картина сохраняется: выход из захвата начинается в то же $t/T_{oe} \approx 6-8$, к $t/T_{oe} \approx 28$ выходят из захвата частицы из всей области V_0 группы 2; к $t/T_{oe} \approx 28$ частицы так же разбрасываются по фазовой плоскости; траектории имеют тот же характер. Однако, различие траекторий в $t/T_{oe} > 20$ несколькостораживает. Или дело в неточности задания X_0 относительно X_m , или различие траекторий определяется какими-то паразитными эффектами, например, шумами. Этот вопрос остается открытым.

В случаях 3-2, 3-3, когда волна опрокидывается, существенную роль играет уменьшение амплитуды волны при опрокидывании. В этих случаях заметная часть частиц выходит из захвата и в группе 2 и в группе 1. В случае 3-2 в группе 2 в $t/T_{oe} \approx 10$ из захвата выходит 71 частица, в группе 1 в $t/T_{oe} \approx 20 - 31$ частица. В случае 3-3 в группе 2 в $t/T_{oe} \approx 6$ из захвата выходит 74 частицы, в группе 1 в $t/T_{oe} \approx 18 - 62$ частицы. Характерные траектории приведены на Рис.20-25. Некоторые частицы и в этих случаях остаются захваченными (Рис.20в, 21г, 22в, 23б, 24г). Отметим, что в этих случаях с течением времени заметно меняется фазовая скорость волны. Поскольку при построении траекторий в системе координат волны мы использовали или начальную ($V_{\phi}^i/V_T = 0,09153$) или конечную ($V_{\phi}^f/V_T = 0,06177$), траектории не вполне правильны. Однако, это не мешает четко различать захваченные частицы от выходящих из захвата и от захваченных вторично. Хотя в этих случаях часть частиц, вышедших из захвата, остается пролетными, но и здесь наблюдаются черты стохастического характера движения - различие близких траекторий (Рис.20б,в; 21а-г; 22в,г; 23а-в; 25а-г), траектории стохастического характера (Рис.21а,в; 23а; 25а-г).

Стохастизация движения электронов указывает на развитие стохастической неустойчивости движения. Стохастический характер движения электронов проявляется в случае 3-1 и особенно отчетливо в случаях 4-1 и 3-2. Здесь заметное число частиц попадает во вторичный захват или имеет еще более сложные траектории.

На Рис.26а,б показана зависимость от N_i и \tilde{n}/n_0 числа частиц, вышедших из захвата, а также числа частиц, попадающих во вторичный захват за время $t/T_{oe} \sim 28$. Видно, что с ростом N_i и \tilde{n}/n_0 число этих частиц возрастает (кроме случая 3-3).

Сравнение разных случаев показывает, что существует некоторая область начальных координат такая, что частицы с x_0, v_0 в этой области с течением времени выходят из захвата. Если считать свидетельства стохастического характера движения частиц, вышедших из захвата, достаточными, то эту область можно назвать стохастическим слоем. Мы будем условно называть ее просто слоем. Можно определить внутренние границы этого слоя, анализируя траектории частиц из групп 1 и 2 (десятки), а также анализируя конечные координаты x, v частиц этих групп (сотни) на фазовой плоскости в $t/T_{oe} \sim 30$. Частицы с x, v вне начальной области захвата вышли из захвата, так что их x_0, v_0 лежат в пределах слоя и предельные v_0 , ближайшие к v_{ϕ}^i определяют его внутренние границы.

Внешние границы слоя следовало бы определять, задавая группы пробных частиц вне области захвата подобно работе /4/. Однако мы этого не делали. Другим способом внешние границы слоя можно оценить по максимальной v_{max} и минимальной v_{min} скорости частиц, вышедших из захвата. Такое определение предполагает, что движение частиц действительно является стохастическим /4/, так что внешние границы слоя, определенные по $v_{max, min}$ в $t/T_{oe} \sim 28$, имеют условный характер. Внутренняя граница достаточно четко определяет, если не границу стохастического слоя, то границу области, из которой частицы выходят из захвата.

Границы и ширина верхнего и нижнего слоя в разных случаях приведены в таблице 4.

На Рис.27а-д показаны области захвата ионно-звуковой волны и границы слоя (стрелки), пунктиром показана область захвата в $t/T_{oe} \sim 30$. На Рис.28а,б показана зависимость от N_i и \tilde{n}/n_0 внешних и внутренних границ слоя, а также границ начальной и конеч-

Таблица 4.

Границы и ширина стохастических слоев.

Случай	1-1	2-1	3-1	4-1	3-2 [⊗]	3-3
N_i	2	5	7	10	7	7
\tilde{n}/n_0	0,2	0,2	0,2	0,2	0,67	0,97
Верхний слой						
v_{zp}/v_T внешн.	-	0,99	1,11	1,34	1,39	1,58
v_{zp}/v_T внутр.	-	0,58	0,33	0,09	0,09	0,10
Δ/v_T	-	0,41	0,78	1,25	1,30	1,33
Δ/v_{ϕ}^i	-	0,56	1,12	1,86	2,04	3,73
Нижний слой						
v_{zp}/v_T внешн.	-	-0,84	-0,78	-1,27	-1,36	-1,51
v_{zp}/v_T внутр.	-	-0,56	-0,25	-0,01	-0,05	+0,09
Δ/v_T	-	0,28	0,53	1,26	1,31	1,60
Δ/v_{ϕ}^i	-	0,39	0,76	1,89	2,07	4,5

v_{zp} - граница стохастического слоя внешняя и внутренняя;
 Δ - ширина стохастического слоя; $v_{\phi}^i = 2\sqrt{\frac{e\varphi_{\phi}^i}{m}}$ в $t/T_{oe} = 28$.

⊗ - обработка с учетом изменения фазовой скорости (в $t/T_{oe} = 28$ $v_{\phi}^i = 0,0605$).

ной области захвата. На Рис.29а-г показана зависимость от N_i и \tilde{n}/n_0 ширины верхнего и нижнего слоя. Из этих рисунков видно, что ширина слоя возрастает с ростом N_i (уменьшением λ_i) и с ростом \tilde{n}/n_0 . Отметим, что в случаях 4-1 - 3-2 - 3-3 слой занимает практически всю область захвата, кроме очень маленькой области вблизи ее центра.

В рассмотренных выше случаях наблюдалась по существу начальная стадия развития стохастической неустойчивости. Для того, чтобы надежно убедиться в стохастическом характере движения электронов и определить границы стохастического слоя, исследовалось долговременное (до $t/T_{oe} \sim 112$) развитие ионно-звуковой волны и движения электронов в случаях 3-1 и 4-1. Изучалось поведение групп пробных частиц на фазовой плоскости, траектории частиц. В случае 3-1 изучались группы пробных частиц 1 и 2 (таблица 2, Рис.2), в случае 4-1 - только группа 2.

Развитие ионно-звуковой волны в $t/T_{oe} > 30$ определяется, в основном, движением захваченных и выходящих из захвата ионов, а также захваченных и выходящих из захвата электронов. В случае 3-1 захват ионов проявляется в $t/T_{oe} \sim 18$ (Рис.6), в случае 4-1 - в $t/T_{oe} \sim 12$ (Рис.7). Движение захваченных ионов на фазовой плоскости можно видеть по фазовым плоскостям ионов Рис.6,30 (случай 3-1) и Рис.7,31 (случай 4-1). Захваченные ионы совершают примерно 1/2 и 3/4 оборота за время $t/T_{oe} \sim 32$ и 56 (случай 3-1) и $t/T_{oe} \sim 26$ и 42 (случай 4-1). При этом часть ионов выходит из захвата, так как амплитуда волны падает в течение 1/2 оборота захваченных ионов. Часть ионов остается захваченной. Их движение приводит к модуляции амплитуды. При изменении амплитуды волны меняется ее укрупнение, а, следовательно, характер двойного электрического слоя и величина поля в нем. При достаточно малых амплитудах волна приближается к синусоидальной и двойной слой не формируется.

Модуляция амплитуды волны и изменение во времени двойного слоя могут быть причиной стохастизации движения электронов, а также и ионов. В настоящей работе мы интересуемся только электронами.

Рассмотрим траектории движения пробных частиц (электронов) за более длительное время, чем раньше. Эти траектории приведены

на Рис.32-37 (случай 3-1) и на Рис.38-40 (случай 4-1). Отметим, что по техническим причинам траектория выводится отдельными частями с интервалами времени $t/T_{oe} = 28$ ($t/T_{oe} \sim 0-28$; 28-56; 56-84; 84-112). В каждом интервале траектория строится в своих координатах X, V . Начальные моменты времени t_0 приведены на рисунках. На траектории указывается время t/T_{oe} . Приводятся траектории в системе координат волны $N_i = 7$ (случай 3-1) или $N_i = 10$ (случай 4-1). Как и выше, фазовая скорость волны V_{ϕ}^i полагается постоянной, так что траектория не является вполне точной, однако позволяет сравнивать разные траектории и делать четкие выводы о характере движения частицы относительно волны (захват или пролет).

Выше мы показали, что в случае 3-1 все частицы группы 1 остаются захваченными до $t/T_{oe} \sim 28$. При дальнейшем развитии волны частицы 1 начинают выходить из захвата в $t/T_{oe} \geq 30$. С течением времени из захвата выходят частицы с V_0 все более близкими к фазовой скорости V_{ϕ}^i . С $t/T_{oe} \sim 112$ выходят из захвата 89 частиц с V_0 практически во всей области $V_0/V_T \sim (-0,159) - (+0,156)$. Часть частиц остается захваченной и в течение $t/T_{oe} \sim 112$.

Частицы, вышедшие из захвата, имеют сложные траектории. Так частица Рис.32а-г остается в захвате до $t/T_{oe} \sim 42$, выходит из захвата и становится пролетной с $V < 0$, вновь захватывается в $t/T_{oe} \sim 47$ и сразу же выходит из захвата с $V > 0$, то есть отражается (Рис.32б), вновь захватывается, выходит из захвата с $V < 0$ (Рис.32в), еще раз захватывается и выходит из захвата с $V < 0$ (Рис.32г). Частица Рис.33а-г выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 28$ с $V < 0$, вновь захватывается и сразу выходит из захвата с $V > 0$, т.е. отражается (Рис.33б), захватывается и вновь выходит из захвата с $V > 0$, опять то захватывается, то выходит из захвата с $V < 0$ (Рис.33в,г). Частицы Рис.34а,б; 34в,г имеют несколько менее сложные траектории. Частица Рис.34а,б выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 34$ с $V < 0$, то отражается или захватывается, то выходит из захвата с $V > 0$ (Рис.34б) и остается пролетной с $V > 0$ в $t/T_{oe} > 70$. Частица Рис.34в,г выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 34$, становится пролетной с $V < 0$, отражается (Рис.34в) и остается пролетной с $V > 0$ в $t/T_{oe} \sim 53-87$, вновь отражается и становится пролетной с $V < 0$ в $t/T_{oe} > 93$.

Частицы группы 2 также выходят из захвата (к $t/T_{oe} \sim 112$

из захвата выходит 9I частица) и имеют сложные траектории. Так частица Рис.35а-г выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 25$ с $v > 0$ (Рис.35а), отражается, становится пролетной с $v < 0$, захватывается, переходит в соседнюю область захвата (Рис.35б), остается захваченной в $t/T_{oe} \sim 55-84$ (Рис.35в) и вновь то выходит из захвата, то вновь захватывается (Рис.35г). Частица Рис.36а-г та же, что на Рис.16а. Она попадает во вторичный захват уже в $t/T_{oe} \sim 22$ (Рис.36а), а далее то выходит из захвата, то вновь попадает в захват или отражается (Рис.36б-г). Частица Рис.37а,б выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 25$ с $v > 0$, остается пролетной до $t/T_{oe} \sim 56$, а затем то захватывается, то выходит из захвата (Рис.37а,б). Траектория частицы Рис.37в,г вначале близка к траектории частицы Рис.36а,б, но уже в $t/T_{oe} \sim 38$ частица отражается и движется далее то отражаясь, то захватываясь (Рис.37в,г).

В случае 4-I изучались траектории частиц группы 2. К $t/T_{oe} \sim 112$ практически все частицы этой группы (99 частиц) выходят из захвата. Их траектории также как в случае 3-I имеют сложный характер. Так частица Рис.38а-г выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 36$ с $v < 0$, и далее то захватывается, то вновь выходит из захвата (Рис.38б-г). Частица Рис.39а-г выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 21$ (Рис.39а), вновь надолго захватывается на соседней длине волны, выходит из захвата в $t/T_{oe} \sim 56$ с $v < 0$ (Рис.39б,в), опять захватывается и выходит из захвата с $v > 0$ (Рис.39в,г). Частицы Рис.40а,б и 40в,г те же, что на Рис.19а и 19б соответственно. Траектории Рис.40а,б; 40в,г являются продолжением траекторий Рис.19а,19б. Эти частицы выходят из захвата уже в $t/T_{oe} \sim 6$ (Рис.19а), ~ 8 (Рис.19б). Частица Рис.19а отражается в $t/T_{oe} \sim 14-19$ и в $t/T_{oe} \sim 25-28$ (Рис.19а), становится пролетной с $v < 0$, захватывается (Рис.40а), выходит из захвата с $v < 0$, вновь захватывается (Рис.40б) и остается захваченной до $t/T_{oe} \sim 112$. Частица Рис.19б, близкая по начальным координатам к частице Рис.19а, имеет совершенно другую траекторию. В $t/T_{oe} \sim 20-84$ она то захватывается, то выходит из захвата, а в $t/T_{oe} > 84$ то отражается, то становится пролетной.

Таким образом, траектории частиц в обоих случаях свидетельствуют о стохастическом характере их движения — частицы то захватываются, то выходят из захвата, то отражаются через случайные промежутки времени. Траектории частиц с близкими начальными

ми координатами различаются и расходятся на фазовой плоскости. Примером могут служить пары или тройки траекторий Рис.32-34а,б; 37а,б-35; 36-37в,г; 40а,б-40в,г-39; группы 1 и 2 частиц с близкими начальными координатами (напомним, что все частицы вначале захвачены в области $\Delta x \sim \lambda_i$) разбрасываются по фазовой плоскости и к $t/T_{oe} \sim 112$ практически равномерно заполняют всю длину системы $L = 7\lambda_i$ (случай 3-I) или $L = 10\lambda_i$ (случай 4-I).

Эти факты показывают, что в рассмотренных случаях развивается стохастическая неустойчивость движения электронов, обусловленная эффектами, связанными с нелинейностью ионно-звуковой волны.

Движение электронов является стохастическим в некоторой области фазового пространства — в стохастическом слое. Границы этого слоя можно определить также, как это делалось выше. Внутренние границы определяются по выходу из захвата частиц групп 1 и 2, внешние границы по максимальной и минимальной скорости в $t/T_{oe} \sim 112$ частиц, вышедших из захвата. Внутренние границы в случае 4-I в $t/T_{oe} \geq 56$ принимались равными V_{ϕ}^i , так как они близки к V_{ϕ}^i уже в $t/T_{oe} \sim 28$. На Рис.41,42 показана зависимость от времени внешних и внутренних границ стохастического слоя, а также границ области захвата в случаях 3-I и 4-I. На Рис.43а,б; 44а,б показана зависимость от времени ширины верхнего и нижнего стохастического слоя. Границы и ширина стохастического слоя в разные моменты времени приведены в таблице 5. Из Рис.41,42 видно, что внутренняя граница слоя в случае 3-I приближается к фазовой скорости в $t/T_{oe} > 56$, так что в этом случае, также как в случае 4-I, слой начинает занимать практически всю область захвата. Внешние границы слоя растут сначала довольно быстро, а затем в $t/T_{oe} > 56$ почти не меняются. В случае 3-I одна-две частицы из двухсот (группы 1 и 2), в случае 4-I одна частица из ста в некоторые моменты имеют заметно большую скорость, что показано на Рис.41,42. В этих случаях мы принимали за границу слоя V_{max}, V_{min} непрерывного распределения по v . Рис.43а,44а показывает, что ширина слоя сначала довольно быстро возрастает, а затем практически не растет или растет очень медленно. Этот факт свидетельствует в пользу того, что наблюдаемые явления имеют физическую природу, а не являются следствием нефизических воздействий, например, паразитных шумов. Действительно, шумы должны были бы приводить к постоянному росту ширины слоя.

Таблица 5.

Границы и ширина стохастических слоев.

Случай 3-1. $N_i = 7$, $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $V\phi^i/V_T = 9,15 \cdot 10^{-2}$.

$t/t_{\text{тоэ}}$	$\tilde{n}_t^{N_i}/n_0$	V_{zt}^i/V_T	Верхний слой			Нижний слой								
			$\frac{V\phi^i + V_{zt}^i}{V_T}$	$\frac{V_{zp}/V_T}{\text{внешн.}}$	$\frac{V_{zp}/V_T}{\text{внутр.}}$	Δ/V_T	Δ/V_{zt}^i	$\frac{V\phi^i - V_{zt}^i}{V_T}$	$\frac{V_{zp}/V_T}{\text{внешн.}}$	$\frac{V_{zp}/V_T}{\text{внутр.}}$	Δ/V_T	Δ/V_{zt}^i		
0	0,2	0,89	0,98											
28	0,12	0,70	0,79	I, II	0,33	0,78	I, 12			-0,78	-0,247	0,53	0,76	
56	0,11	0,66	0,75	I, 94 ^x	0,10	1,84	2,77			-1,67 ^x	0,073	1,74	2,63	
84	0,086	0,59	0,68	2,03 ^x	0,10	1,93	3,30			-1,89	0,076	1,96	3,35	
II2	0,057	0,48	0,57	2,19 ^{xx}	0,09	2,10	4,40			-1,96 ^{xx}	0,086	2,05	4,29	

20

$\tilde{n}_t^{N_i}$ - возмущение плотности (гармоника $N=N_i$) в момент t ; $V_{zt}^i = 2\sqrt{\frac{e\phi^i}{m}}$;

V_{zp} - граница стохастического слоя внешняя и внутренняя;

Δ - ширина стохастического слоя.

x - не учли одну частицу с $V > V_{zp}$ (см. Рис.41).

xx - не учли две частицы с $V > V_{zp}$ (см. Рис.41).

Таблица 5, продолжение.

Границы и ширина стохастических слоев.

Случай 4-1. $N_i = 10$; $\tilde{n}/n_0 = 0,2$; $V\phi^i/V_T = 8,47 \cdot 10^{-2}$.

$t/t_{\text{тоэ}}$	$\tilde{n}_t^{N_i}/n_0$	V_{zt}^i/V_T	Верхний слой			Нижний слой								
			$\frac{V\phi^i + V_{zt}^i}{V_T}$	$\frac{V_{zp}/V_T}{\text{внешн.}}$	$\frac{V_{zp}/V_T}{\text{внутр.}}$	Δ/V_T	Δ/V_{zt}^i	$\frac{V\phi^i - V_{zt}^i}{V_T}$	$\frac{V_{zp}/V_T}{\text{внешн.}}$	$\frac{V_{zp}/V_T}{\text{внутр.}}$	Δ/V_T	Δ/V_{zt}^i		
0	0,2	0,89	0,98											
28	0,11	0,66	0,75	I, 34	0,086	1,25	1,86			-0,58	-1,27	-0,013	1,26	1,89
56	0,091	0,60	0,68	I, 88	0,085 ^x	1,79	2,99			-0,52	-1,76	0,085 ^x	1,85	3,09
84	0,057	0,48	0,56	I, 88	0,085 ^x	1,79	3,77			-0,39	-1,92	0,085 ^x	2,00	4,20
II2	0,027	0,32	0,41	2,00 ^x	0,085 ^x	1,92	5,91			-0,24	-2,06 ^x	0,085 ^x	2,14	6,60

21

^x V_{zp} внутренняя принята равной $V\phi^i$.

x - не учли одну частицу с $V > V_{zp}$ (см. Рис.42).

Таким образом, можно сделать вывод, что развитие нелинейной ионно-звуковой волны сопровождается развитием стохастической неустойчивости движения электронов. Начальная стадия этой неустойчивости проявляется в выходе из захвата частиц, захваченных в начальный момент времени и в некоторых случаях во вторичном захвате частиц. Эта стадия наблюдается в $t/T_{oe} < 30$. Поэтому можно сделать вывод, что эффекты, связанные с нелинейностью ионно-звуковой волны, могут играть роль при развитии стохастической неустойчивости движения электронов в случаях взаимодействия ленгмювской волны с ионно-звуковой, рассмотренных в работе /4/. Сравнение ширины стохастического слоя в районе сепаратрисы ионно-звуковой волны в разных случаях настоящей работы (Рис.29, таблица 4) и в аналогичных случаях работы /4/ (Рис.15,22, таблица 4 в работе /4-IV/) показывает, что слой в каждом случае работы /4/ в несколько раз шире, чем в аналогичном случае здесь. Даже развитый слой ($t/T_{oe} \sim 112$) в случаях 3-1, 4-1 в 1,5-2 раза уже, чем в аналогичных случаях работы /4/ в $t/T_{oe} \sim 28$. Это неудивительно, т.к. при взаимодействии ленгмювской волны с ионно-звуковой /4/ помимо ионной нелинейности к стохастизации движения электронов приводит еще ряд эффектов (возмущение полем основной волны, возмущение полем гармоник конверсии и т.п.).

Каковы основные механизмы, приводящие к стохастической неустойчивости движения электронов в поле ионно-звуковой волны. Один из таких механизмов, который может играть существенную роль, особенно при долговременном развитии, — модуляция амплитуды (поля) волны при движении захваченных электронов и ионов. Анализ кривых $W_E(t)$ (W_E — энергия электрического поля), приведенных в работе /5/, показывает, что поле волны в рассмотренных случаях промодулировано колебаниями, связанными с движением захваченных частиц. Согласно работе /9/ модуляция ленгмювской волны при движении захваченных электронов приводит к стохастической неустойчивости движения электронов и формированию стохастического слоя около сепаратрисы волны. Можно ожидать, что аналогичная картина будет наблюдаться и в случае ионно-звуковой волны.

Другой возможный механизм — взаимодействие захваченных или пролетных частиц с двойными электрическими слоями, формирующимися на фронтах укрупняющейся нелинейной ионно-звуковой волны.

Роль этого механизма подтверждается корреляцией времени начала выхода электронов из захвата и укрупнения волны в разных случаях.

Образование двойного электрического слоя на фронте бегущей волны можно рассматривать как возмущение ее поля. На стадии роста укрупнения это возмущение сосредоточено в области между максимумом X_m и узлом сепаратрисы X_2 , в момент максимального укрупнения — в области $X \sim (X_m + \lambda_i/4)$. Попадая в эту область, частица меняет свою энергию, в результате чего может выйти из захвата. В разных случаях с уменьшением длины волны (с ростом N_i) и с ростом начальной амплитуды волны уменьшается период оборота захваченных частиц (Рис.3, таблица 3), так что частицы чаще попадают в эту область и имеют большую вероятность выйти из захвата, набрав достаточную энергию. Действительно, наблюдается рост числа частиц, выходящих из захвата, с ростом N_i и \tilde{n}/n_0 (Рис.26).

В работе /10/ исследовалось взаимодействие электронов малой начальной скорости с двойными слоями, формирующимися при развитии нелинейного ионного возмущения с хорошо выраженными фронтами скорости и плотности. Показано, что при взаимодействии с двойным слоем частица ускоряется, тормозится или отражается, причем взаимодействие происходит в области слоя на длине $\Delta x/r_d \sim 1-3$. На траектории частицы наблюдается характерный скачок скорости — скорость меняется на заметную величину за время $\Delta t/T_{oe} \sim 1-2$.

Скачки скорости такого типа наблюдаются и в рассматриваемых случаях, например, на траекториях частиц Рис.33б,в; 34б,г; 36б,г; 38в,г. Это подтверждает гипотезу о существенной роли двойных слоев при стохастизации движения электронов. Подтверждается и предположение о том, что в случае нелинейных бегущих ионно-звуковых волн двойной слой играет роль возмущения поля волны. Действительно, на траекториях захваченных частиц, совершающих оборот в области захвата, иногда можно четко видеть характерные скачки скорости, свидетельствующие о взаимодействии с двойными слоями. Примером могут служить траектории частиц Рис.33г, 34в, 35г, 36а, 37а, 40г.

Таким образом, можно сделать вывод, что оба механизма — модуляция амплитуды ионно-звуковой волны при движении захваченных электронов и ионов и взаимодействие частиц с двойными элек-

трическими слоями, формирующимися на фронтах нелинейной ионно-звуковой волны, — играют существенную роль при развитии стохастической неустойчивости движения электронов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Неустойчивость ленгмюровских волн в неоднородной плазме. IУ". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 82-53, 1982.
2. P.K.Kaw, A.T.Lin, J.M.Dawson. Phys. Fluids 16, 1967, 1973.
3. N.S.Buchelnikova, E.P.Matochkin. Physica Scripta 26, 566, 1981.
4. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Взаимодействие ленгмюровской волны с ионно-звуковой. Стохастические эффекты. I-IV". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 88-139, 1988; № 88-163, 1988; № 89-36, 1989; № 89-106, 1989.
5. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Ионно-звуковые волны большой амплитуды". Препринт ИЯФ СО АН СССР, № 82-51, 1982; VI конф. по физике низкотемпературной плазмы, т.1, стр.268, Ленинград, 1983; Proc. XVI ICPiG v.5, p.738, Düsseldorf, 1983.
6. 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.
7. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "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-III". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 86-153, № 86-154, № 86-155, 1986; VII конф. по физике низкотемпературной плазмы, т.1, стр.215, Ташкент, 1987. Proc. XVIII ICPiG v.2, p.284, Swansea, 1987; Proc. Conf. on Plasma Physics, v.2, p.128, Kiev, 1987.
9. A.Murakami, I.Nomura, H.Momota. J. Phys. Soc. Japan 51, 4053, 1982.
10. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Развитие ионного возмущения. Двойные слои и стохастические эффекты". Препринт ИЯФ СО АН СССР.

Подписи к рисункам:

- Рис.1. Границы нелинейности (I) и захвата ионов (II) и начальные параметры ионно-звуковых волн.
- Рис.2. Распределение возмущения плотности и скорости ионов, сепаратриса электронов, захваченных ионно-звуковой волной и начальные координаты пробных частиц в группах I и 2.
 $V_{z0}^i = 2\sqrt{\frac{e\varphi_0}{m}}$; X_1, X_2, X_m - координаты узлов и максимума (X_m) сепаратрисы.
- Рис.3. Зависимость периода захваченных электронов ($T_B^e = \frac{2\pi}{k_i \sqrt{\frac{e\varphi_0}{m}}} = \frac{\lambda_i}{\sqrt{\frac{e\varphi_0}{m}}}$) от параметров волны.
 а. Зависимость от N_i .
 б. Зависимость от \tilde{n}/n_0 .
- Рис.4. Фазовые плоскости ионов и распределение возмущения плотности и поля в момент максимального укручения.
 Рис а б в г д
 Случай 2-I 3-I 4-I 3-2 3-3
 E нормировано на mra/eT_{oe}^2 .
- Рис.5-9. Фазовые плоскости ионов в разные моменты времени.
 Рис 5 6 7 8 9
 Случай 2-I 3-I 4-I 3-2 3-3
- Рис.10. Зависимость момента максимального укручения (I) и начала захвата (2) от параметров волны.
 а. Зависимость от N_i .
 б. Зависимость от \tilde{n}/n_0 .
- Рис.11. Зависимость от времени амплитуды гармоники возмущения плотности \tilde{n}^{N_i}/n_0 (а, в) и границ области захвата $V_\phi^i \pm V_{z0}^i$ (б, г) при разных длинах волн (разных N_i) - Рис.11а, б и разных амплитудах - Рис.11в, г.
- Рис.12-25. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости.
 Рис. 12 13-14 15-17 18-19 20-22 23-25
 Случай 1-I 2-I 3-I 4-I 3-2 3-3
 Цифры на траектории - моменты времени t/T_{oe} , когда частица имеет данные X и V .
 Траектории в системе волны N_i : $X = x - V_\phi^N t$; $V = V - V_\phi^N$

- Рис.26. Зависимость числа частиц, вышедших из захвата (I) и захваченных вторично (2) от параметров волны.
 а. Зависимость от N_i .
 б. Зависимость от \tilde{n}/n_0 .
- Рис.27. Область захвата электронов ионно-звуковой волной в $t = 0$ (сплошная линия), $t/T_{oe} \sim 28$ (пунктир) и границы стохастического слоя в $t/T_{oe} \sim 28$ (стрелки).
 Рис а б в г д
 Случай 2-I 3-I 4-I 3-2 3-3
- Рис.28. Внутренние и внешние границы стохастических слоев (сплошные линии), границы области захвата электронов в $t = 0$ ($V_\phi^i \pm V_{z0}^i$) и в $t/T_{oe} \sim 28$ ($V_\phi^i \pm V_{zt}^i$) в зависимости от параметров волны.
 а. Зависимость от N_i .
 б. Зависимость от \tilde{n}/n_0 .
- Рис.29. Ширина стохастического слоя $\Delta/V_T, \Delta/V_{zt}^i$ в зависимости от параметров волны.
 а, б. Зависимость от N_i .
 в, г. Зависимость от \tilde{n}/n_0 .
 x - верхний слой; o - нижний слой.
- Рис.30, 31. Фазовые плоскости ионов в разные моменты времени (продолжение Рис.6,7).
 Рис 30 31
 Случай 3-I 4-I
- Рис.32-40. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости.
 Рис 32-37 38-40
 Случай 3-I 4-I
 Цифры на траектории - моменты времени t/T_{oe} , когда частица имеет данные X и V ; t_0 - начальный момент времени временного интервала.
- Рис.41, 42. Внутренние и внешние границы стохастических слоев (сплошные линии), границы области захвата электронов ($V_\phi^i \pm V_{zt}^i$) в зависимости от времени.
 Рис. 41 42
 Случай 3-I 3-2
 Отдельные точки - одна частица из группы I (•) или 2 (x).

Рис.43,44. Ширина стохастического слоя электронов $\Delta/v_T, \Delta/v_{3t}^i$
 в зависимости от времени.

Рис 43а,б 44а,б

Случай 3-I 4-I

× - верхний слой; o - нижний слой.

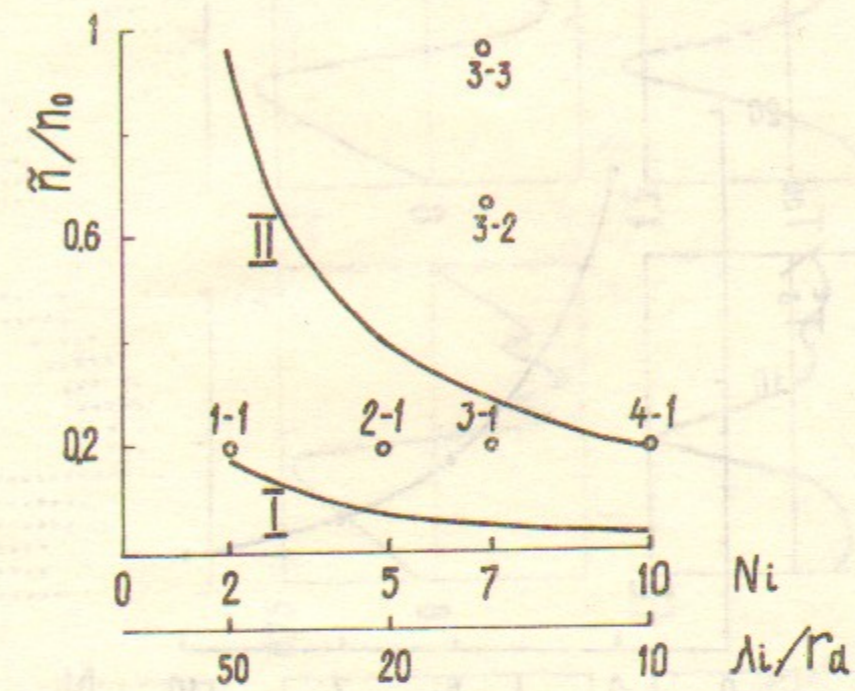


Рис.1.

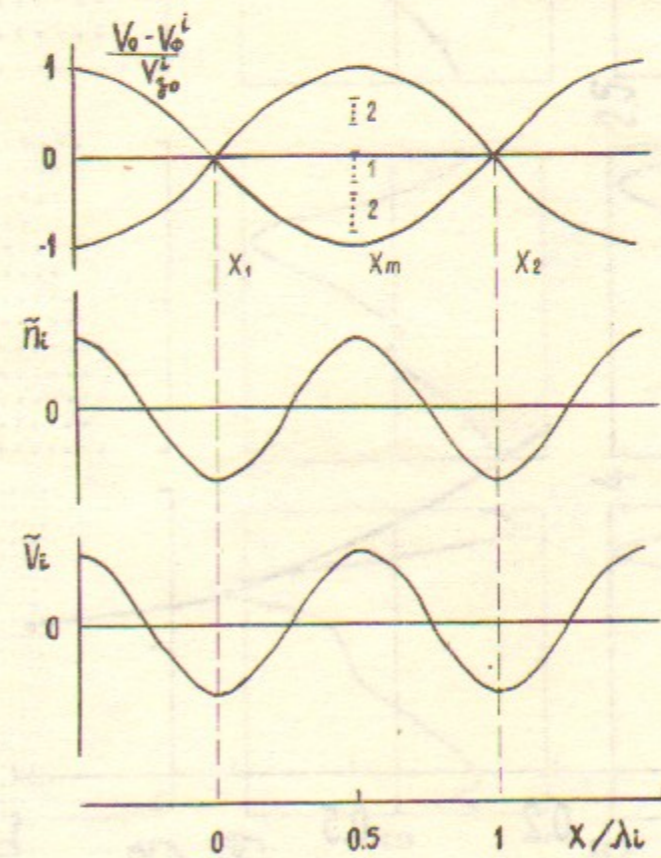


Рис.2.

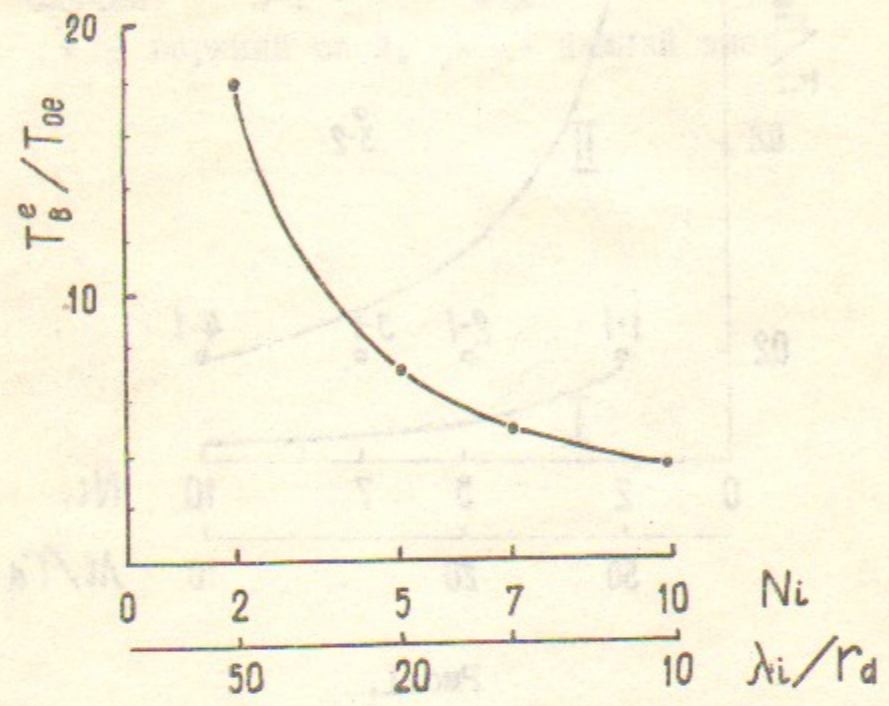


Рис. 3а.

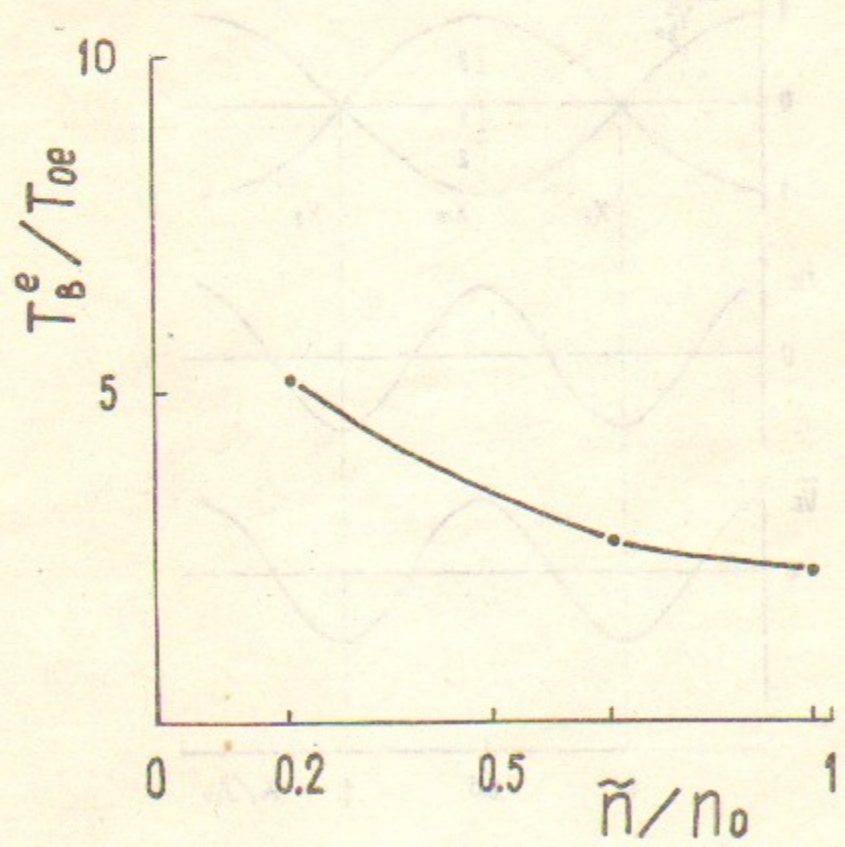


Рис. 3б.

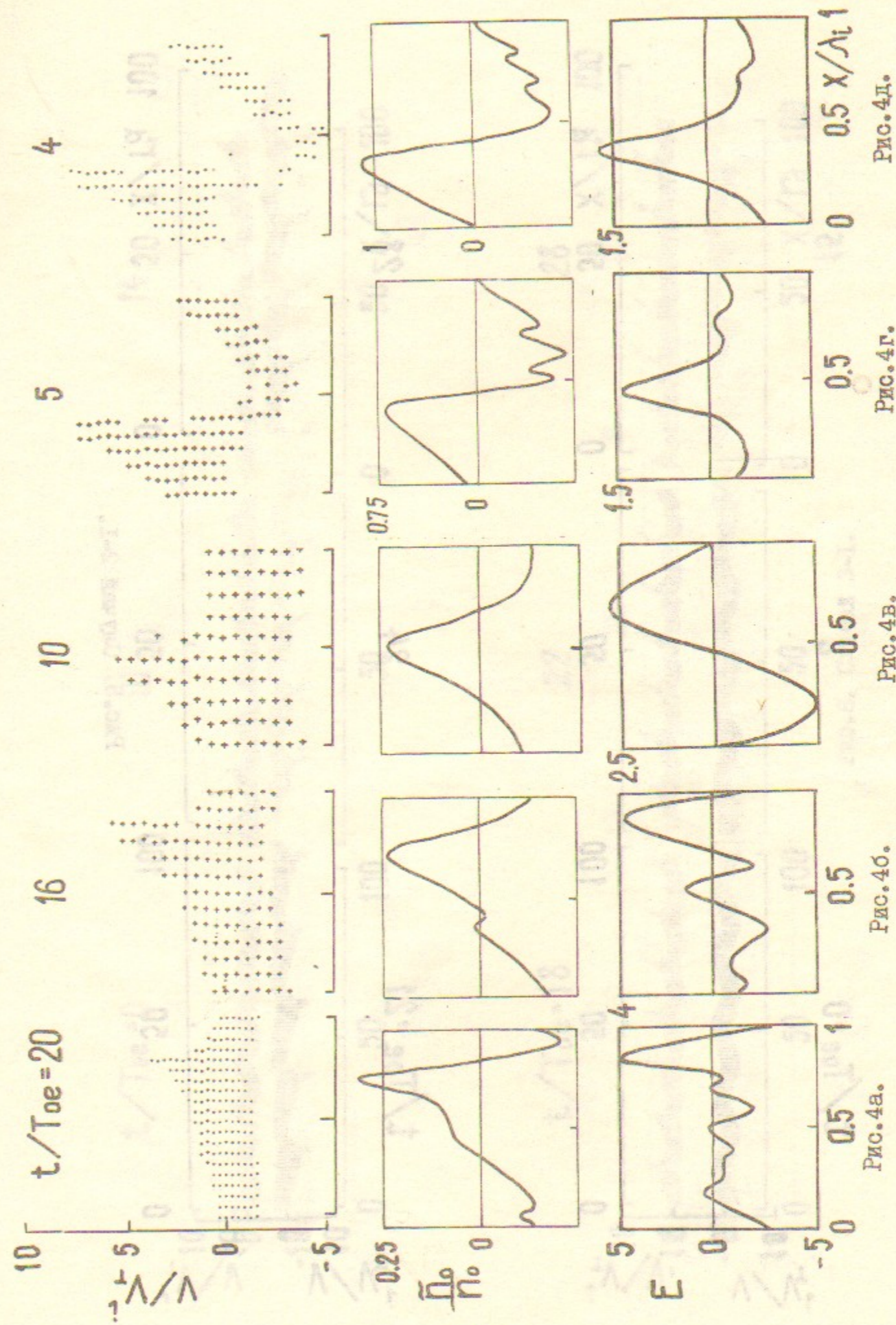


Рис. 4а.

Рис. 4б.

Рис. 4в.

Рис. 4г.

Рис. 4д.

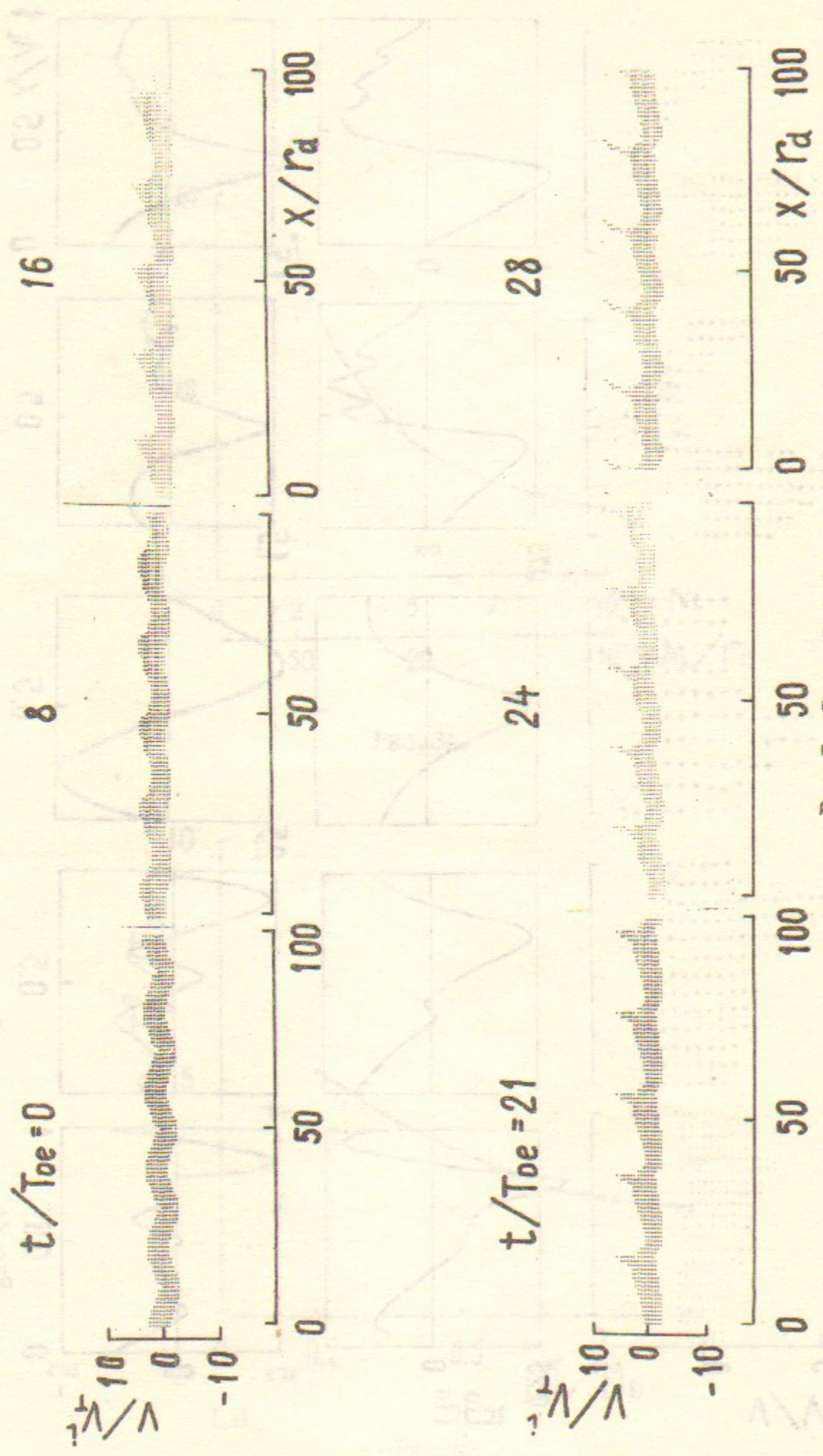


Рис.5. Случай 2-1.

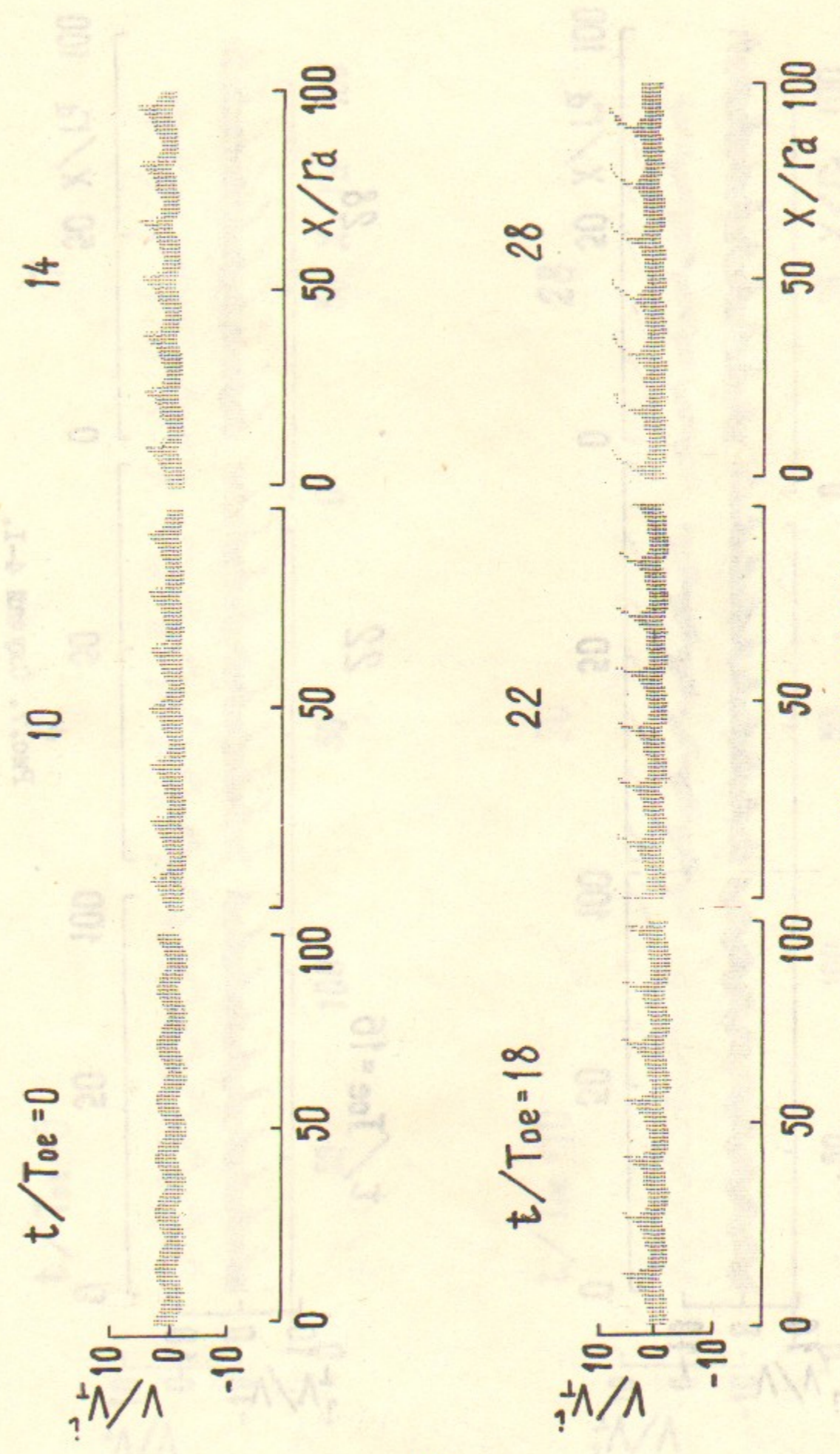


Рис.6. Случай 3-1.

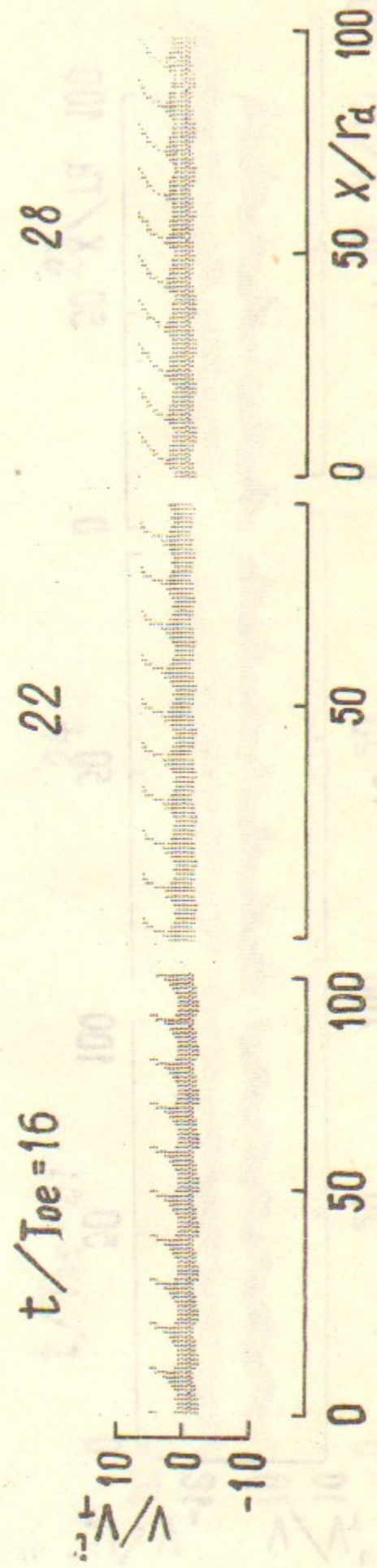
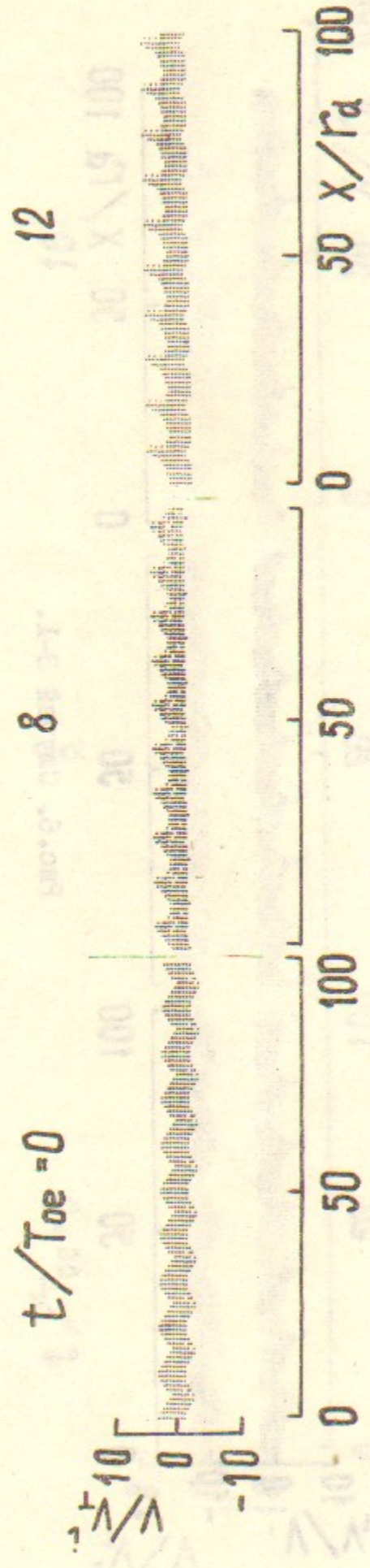


Рис.7. Случай 4-1.

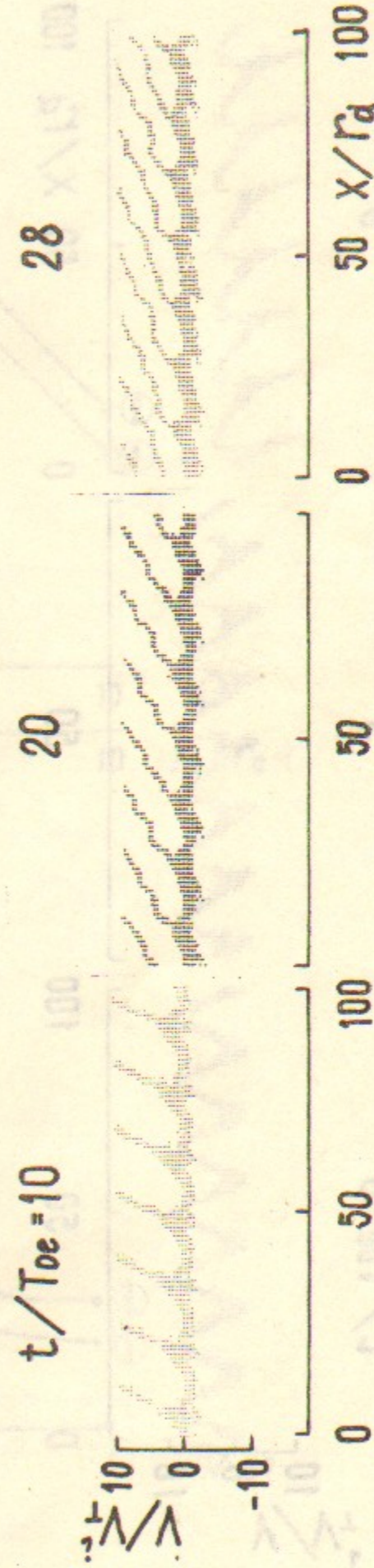
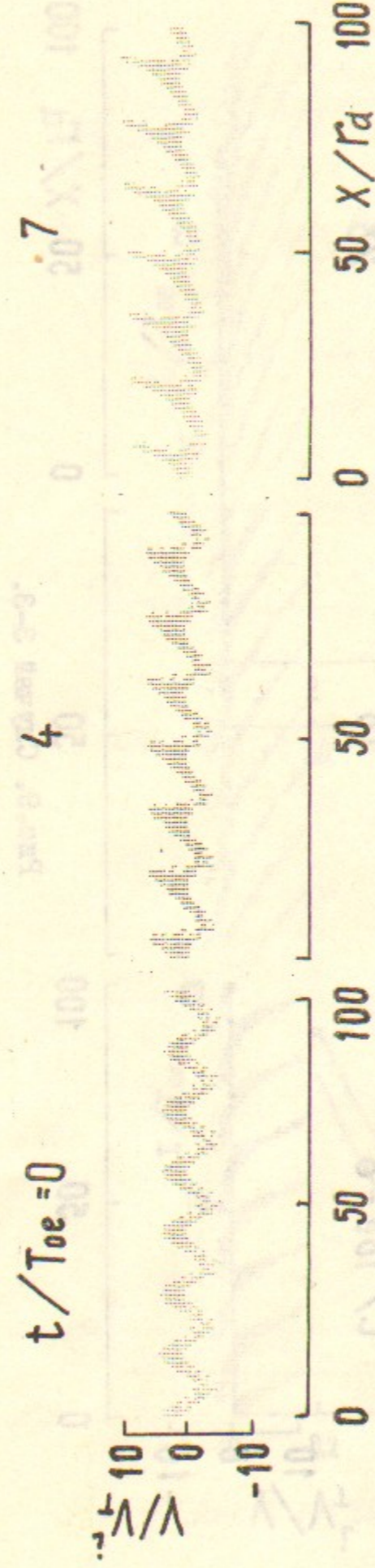


Рис.8. Случай 3-2.

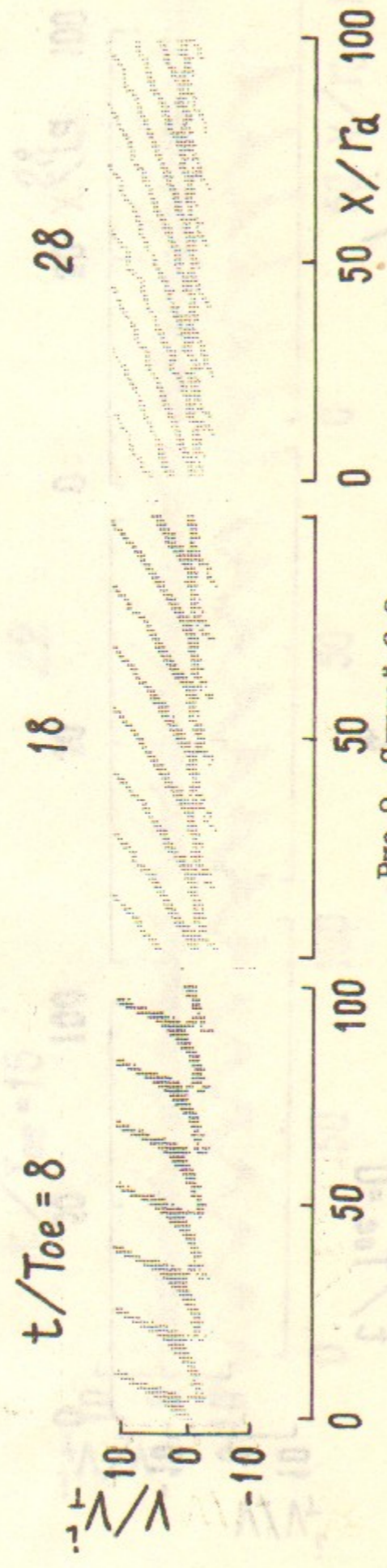
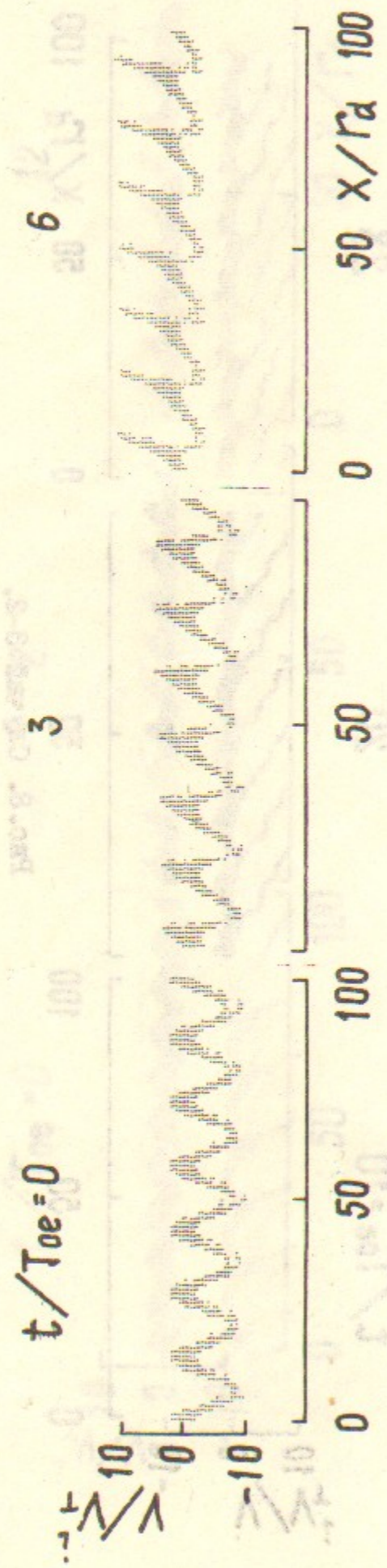


Рис.9. Случай 3-3.

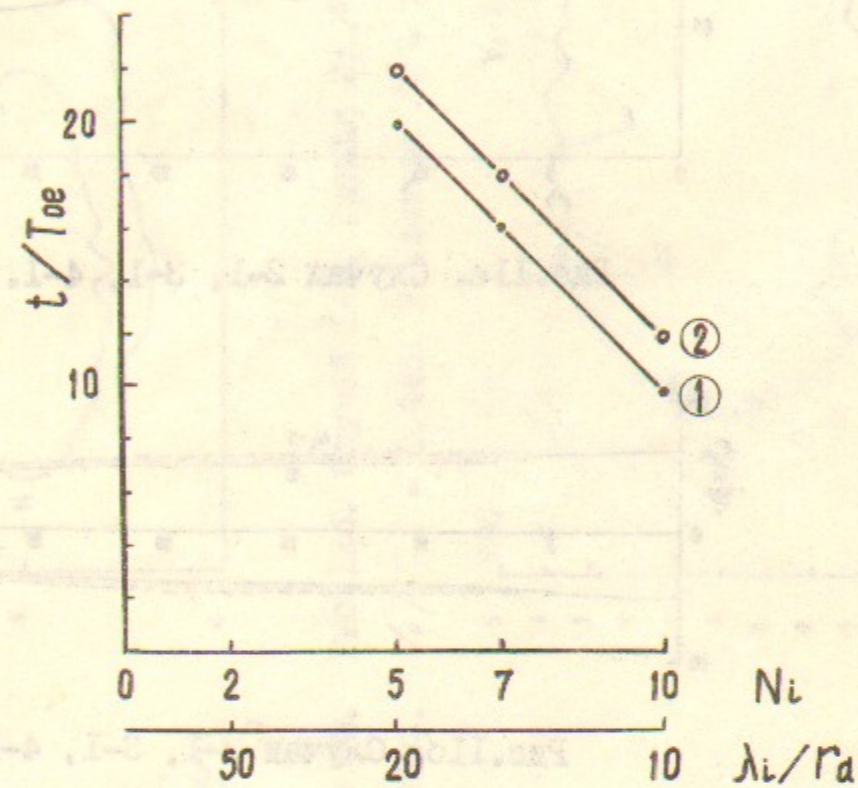


Рис.10а.

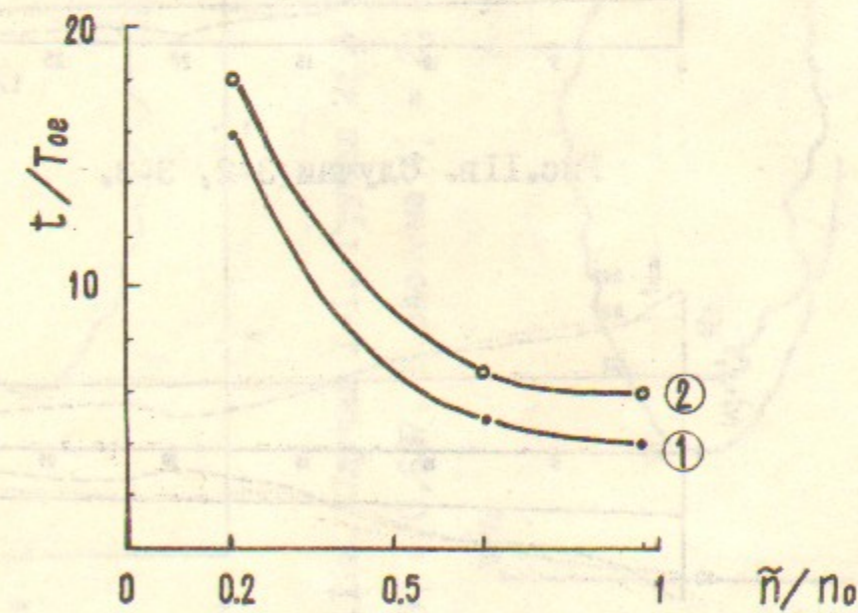


Рис.10б.

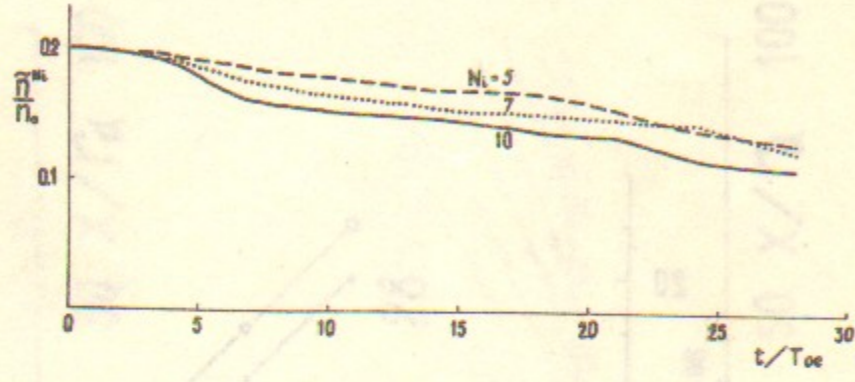


Рис.11а. Случай 2-1, 3-1, 4-1.

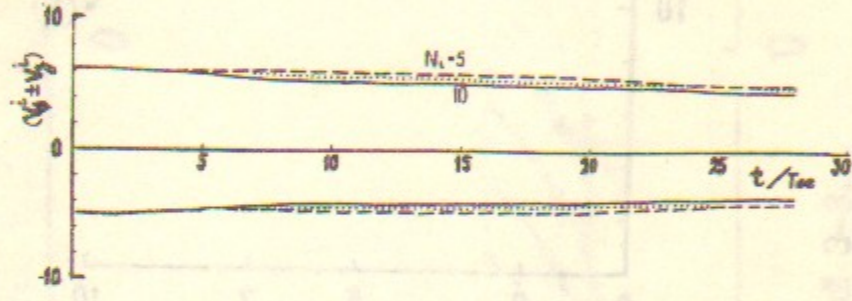


Рис.11б. Случай 2-1, 3-1, 4-1.

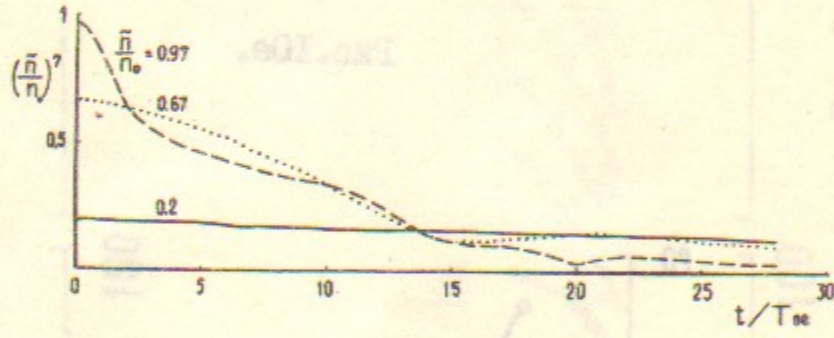


Рис.11в. Случай 3-2, 3-3.

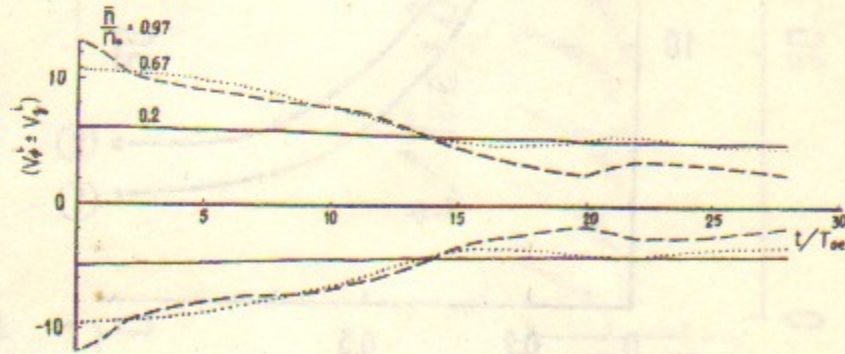


Рис.11г. Случай 3-2, 3-3.

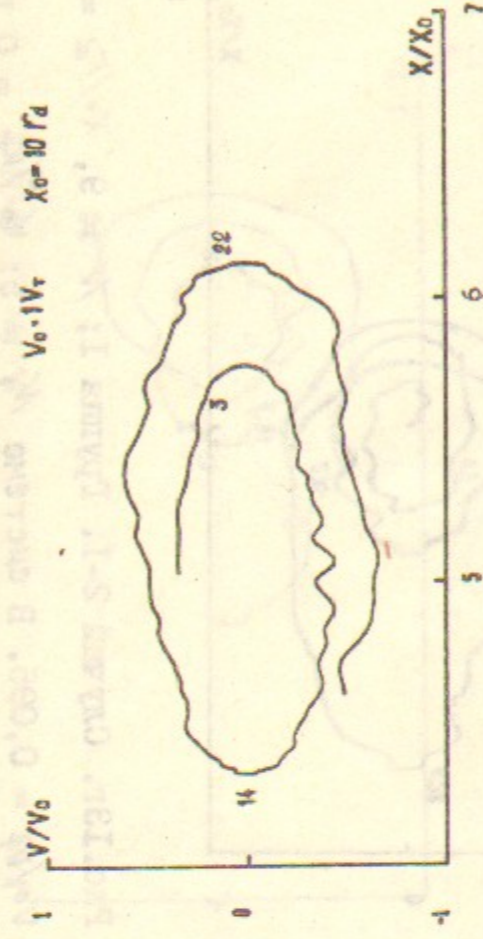


Рис.12б. Случай 1-1. Группа 2; $N = 4$, $X_0/\Gamma_d = 50$.
 $V_0/V_T = 0,446$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$.

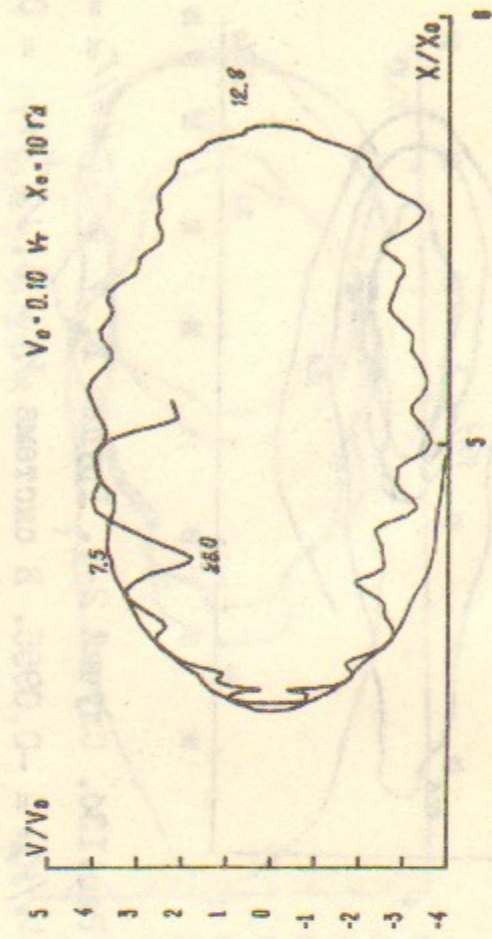


Рис.12г. Случай 1-1. Группа 2; $N = 9$, $X_0/\Gamma_d = 50$.
 $V_0/V_T = -0,286$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$.

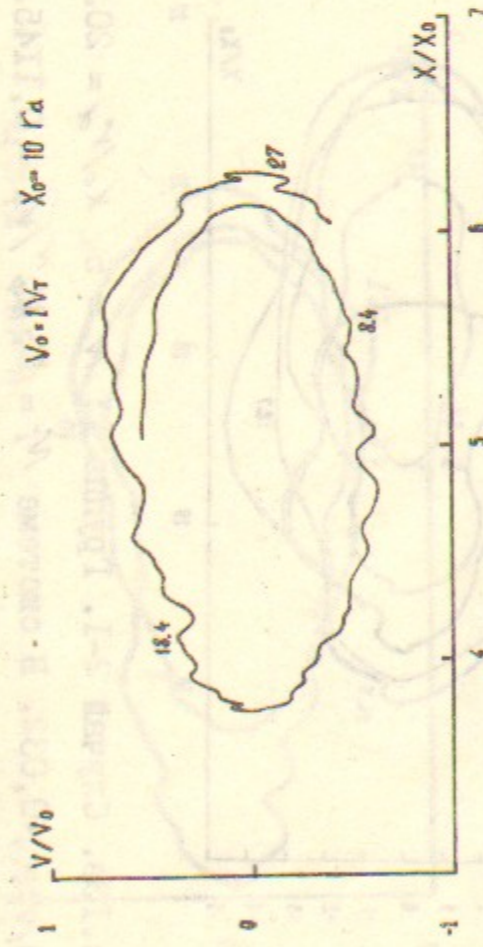


Рис.12а. Случай 1-1. Группа 2; $N = 2$, $X_0/\Gamma_d = 50$.
 $V_0/V_T = 0,637$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$.

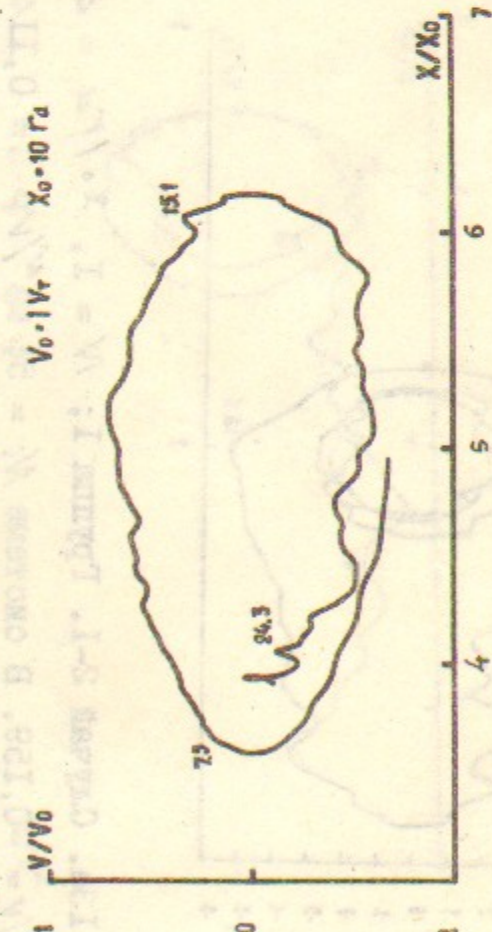


Рис.12в. Случай 1-1. Группа 2; $N = 6$, $X_0/\Gamma_d = 50$.
 $V_0/V_T = -0,573$. В системе $N_i = 2$; $V_\phi^N/V_T = 0,0992$.

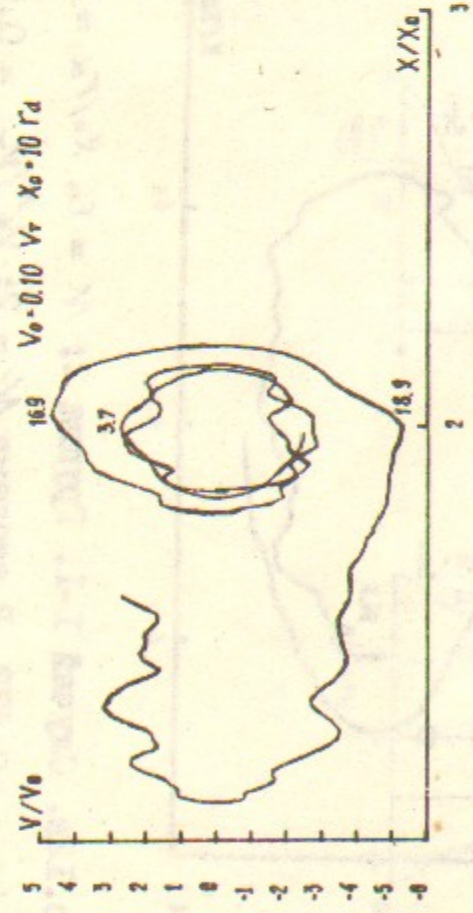


Рис. 13а. Случай 2-1. Группа 1; $N = 1$, $X_0/\Gamma_d = 20$.
 $V_0/V_T = -0,159$. В системе $N_i = 5$; $V_\phi^N/V_T = 0,1145$.

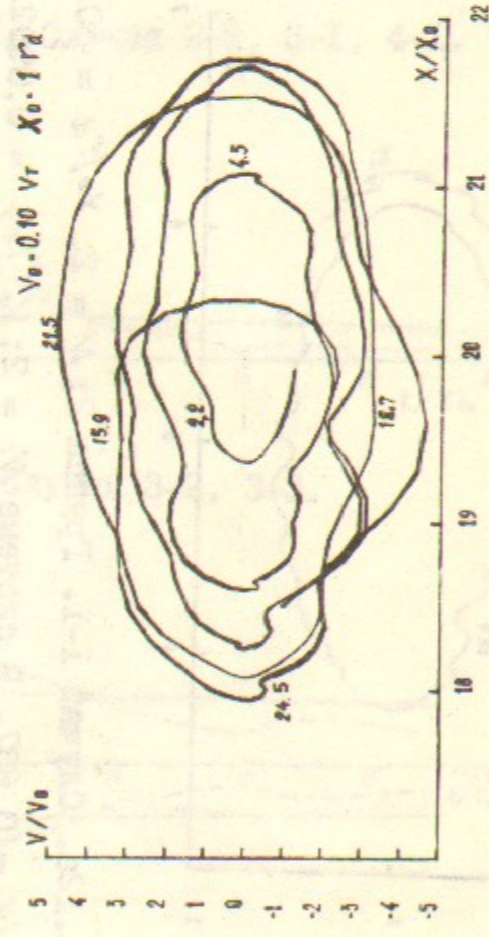


Рис. 13в. Случай 2-1. Группа 1; $N = 5$, $X_0/\Gamma_d = 20$.
 $V_0/V_T = -0,032$. В системе $N_i = 5$; $V_\phi^N/V_T = 0,1145$.

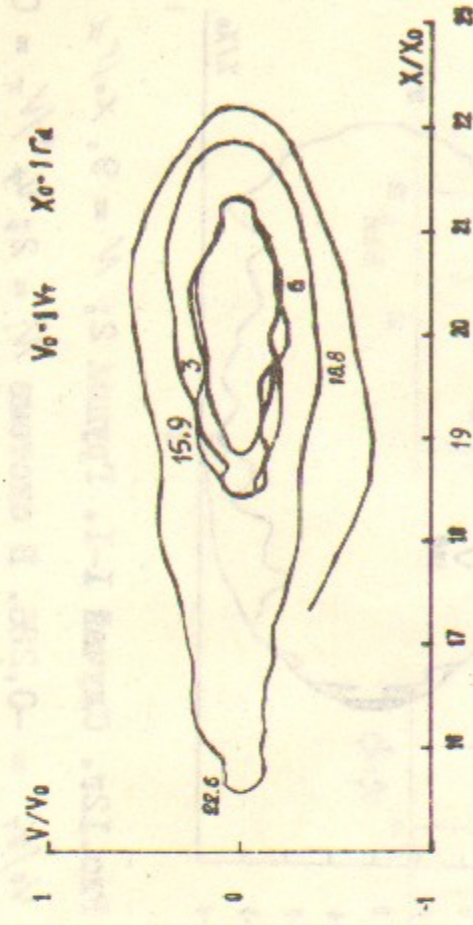


Рис. 13г. Случай 2-1. Группа 1; $N = 3$, $X_0/\Gamma_d = 20$.
 $V_0/V_T = -0,0955$. В системе $N_i = 5$; $V_\phi^N/V_T = 0,1145$.

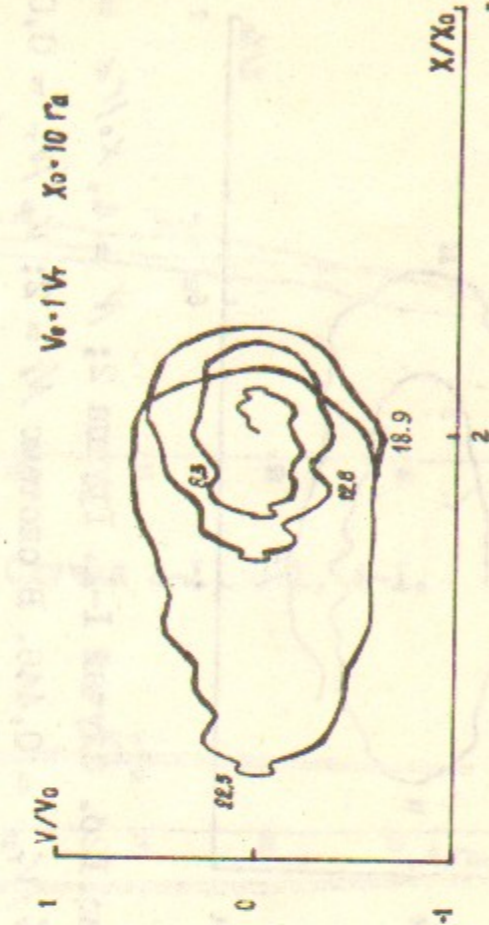


Рис. 13з. Случай 2-1. Группа 1; $N = 9$, $X_0/\Gamma_d = 20$.
 $V_0/V_T = 0,095$. В системе $N_i = 5$; $V_\phi^N/V_T = 0,1145$.

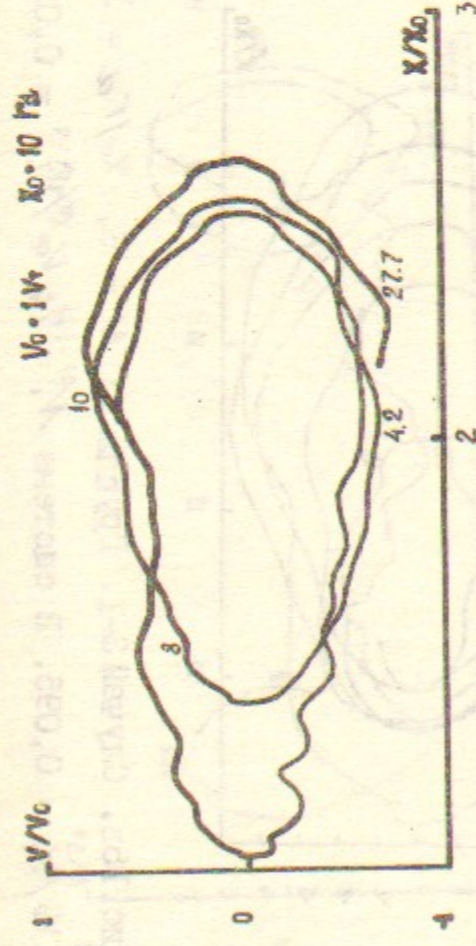


Рис. 14а. Случай 2-1. Группа 2; $N = 1$, $X_0/\Gamma_d = 20$.
 $V_0/V_T = 0,716$. В системе $N_i = 5$; $V_\phi^N/V_T = 0,1145$.

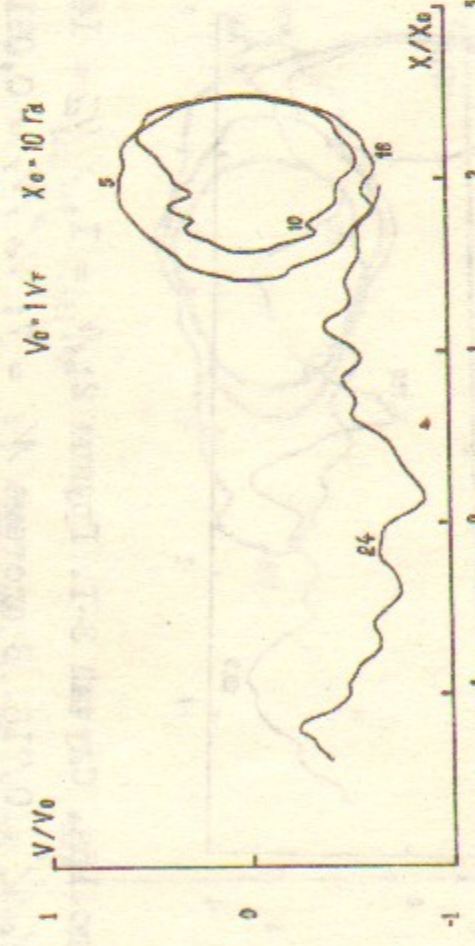


Рис. 14в. Случай 2-1. Группа 2; $N = 6$, $X_0/\Gamma_d = 20$.
 $V_0/V_T = -0,573$. В системе $N_i = 5$; $V_\phi^N/V_T = 0,1145$.

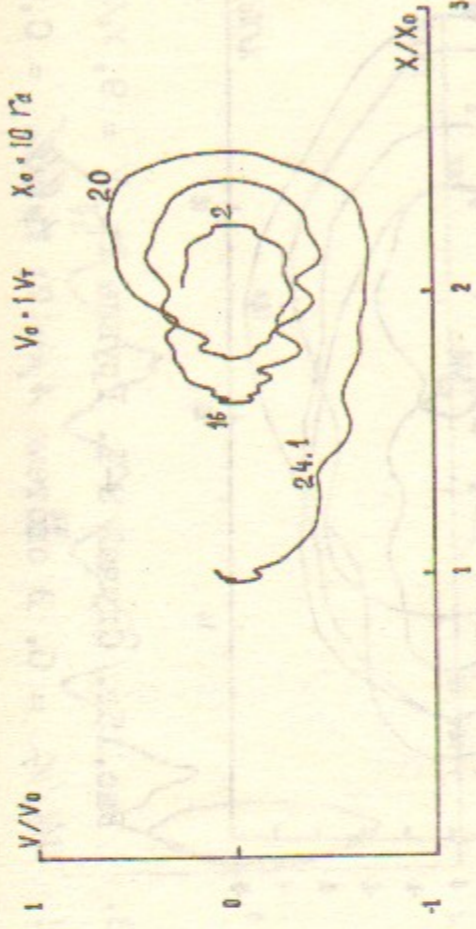


Рис. 14г. Случай 2-1. Группа 2; $N = 5$, $X_0/\Gamma_d = 20$.
 $V_0/V_T = 0,350$. В системе $N_i = 5$; $V_\phi^N/V_T = 0,1145$.

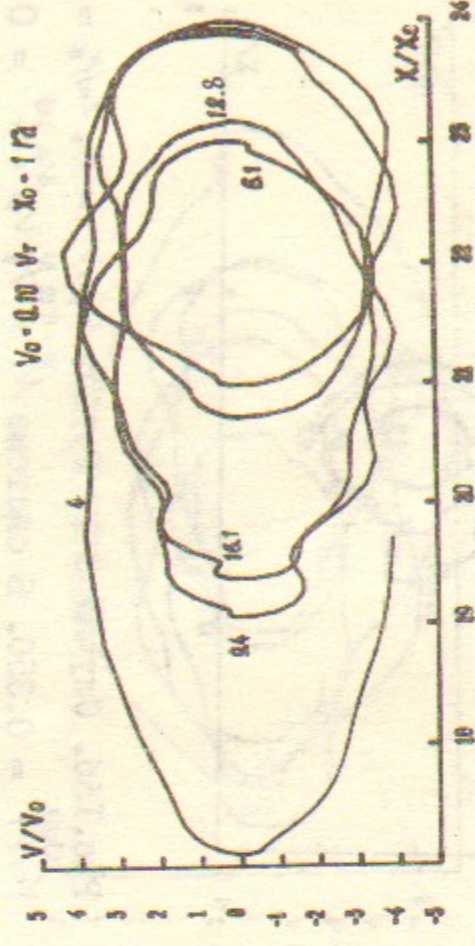


Рис. 14з. Случай 2-1. Группа 2; $N = 9$, $X_0/\Gamma_d = 20$.
 $V_0/V_T = -0,286$. В системе $N_i = 5$; $V_\phi^N/V_T = 0,1145$.

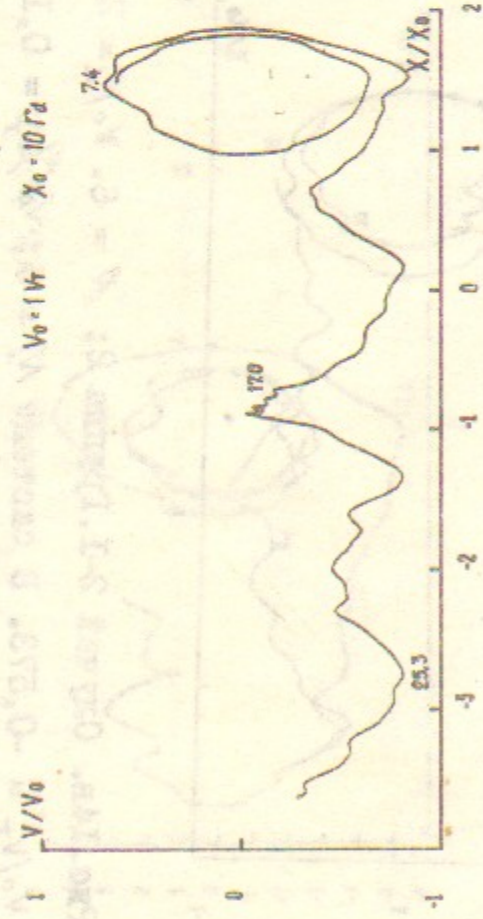


Рис. 15а. Случай 3-1. Группа 2; $N = 1$, $X_0/\Gamma_d = 14,3$.
 $V_0/V_T = 0,716$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

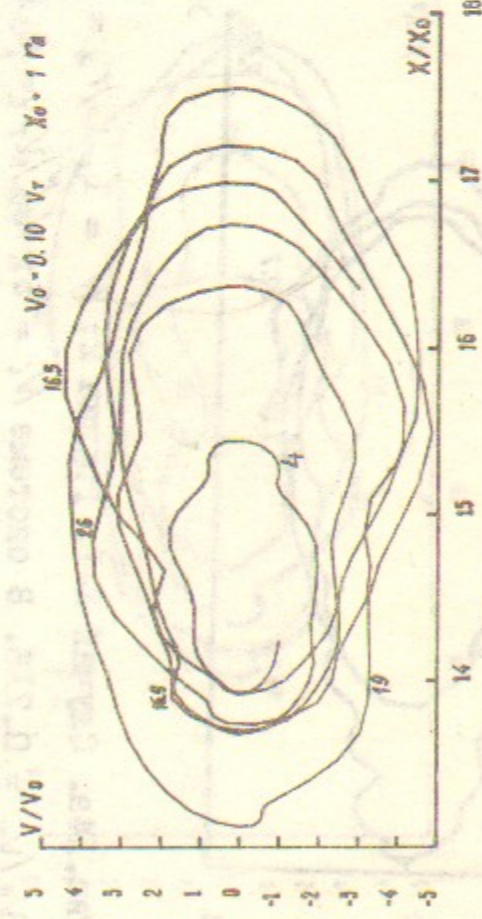


Рис. 15в. Случай 3-1. Группа 1; $N = 6$, $X_0/\Gamma_d = 14,3$.
 $V_0/V_T = 0,095$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

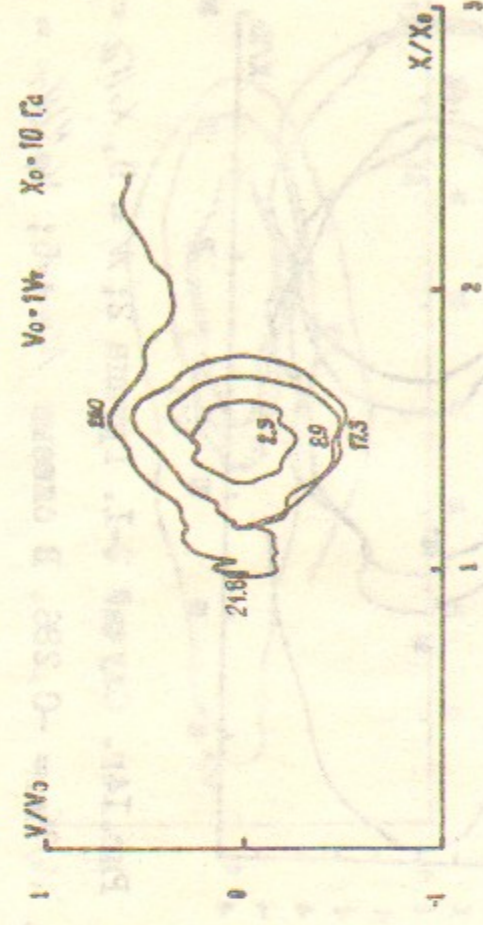


Рис. 15б. Случай 3-1. Группа 2; $N = 5$, $X_0/\Gamma_d = 14,3$.
 $V_0/V_T = 0,350$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

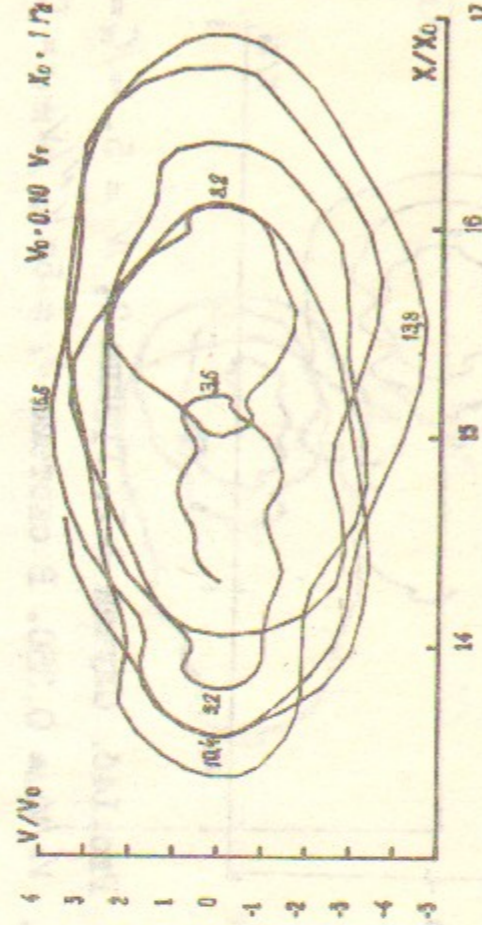


Рис. 15г. Случай 3-1. Группа 1; $N = 9$, $X_0/\Gamma_d = 14,3$.
 $V_0/V_T = 0$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

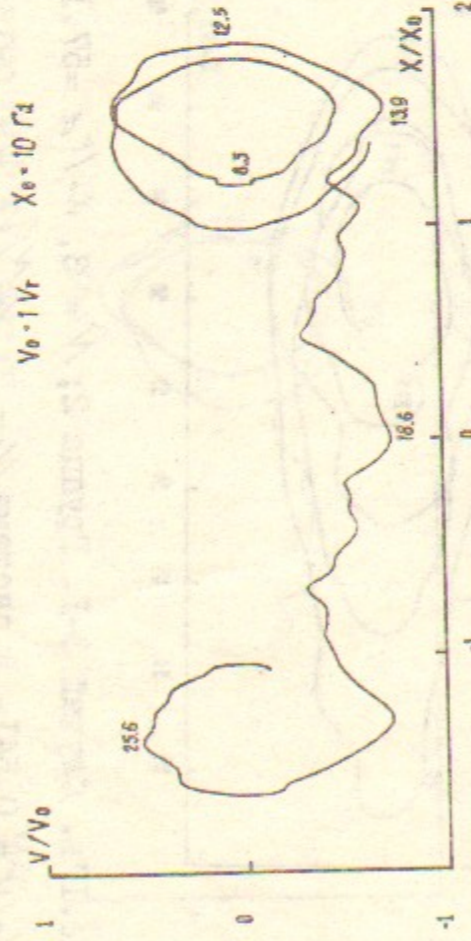


Рис. 16а. Случай 3-1. Группа 2; $N = 6$, $X_0/\Gamma_d = 14,3$.
 $V_0/V_T = -0,573$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

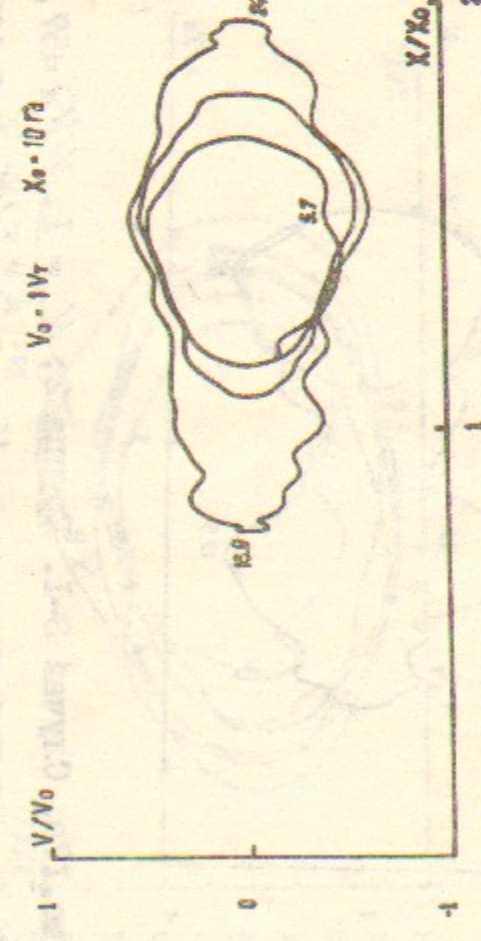


Рис. 16в. Случай 3-1. Группа 2; $N = 8$, $X_0/\Gamma_d = 14,3$.
 $V_0/V_T = -0,382$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

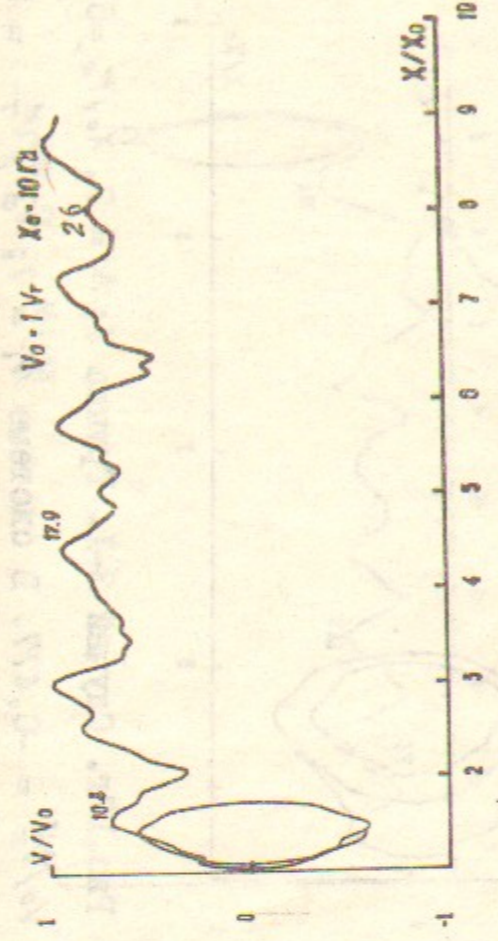


Рис. 16б. Случай 3-1. Группа 2; $N = 7$, $X_0/\Gamma_d = 14,3$.
 $V_0/V_T = -0,477$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

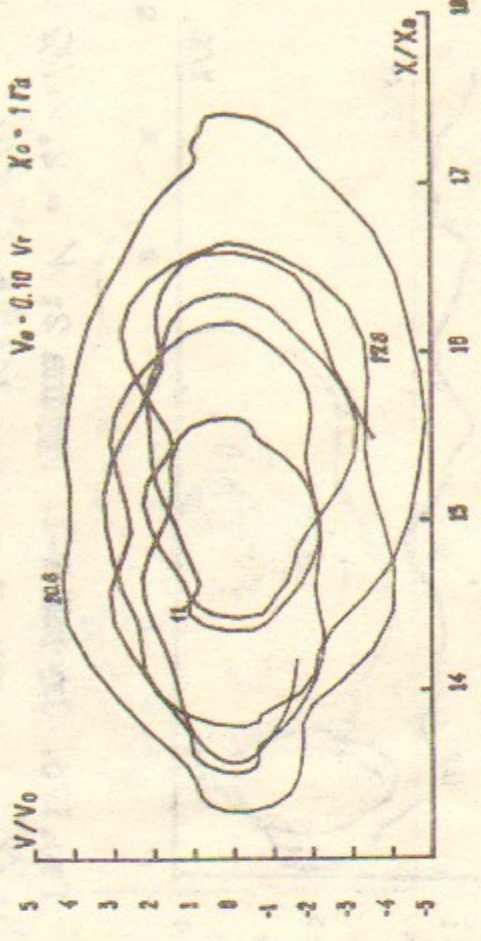


Рис. 16г. Случай 3-1. Группа 1; $N = 4$, $X_0/\Gamma_d = 14,3$.
 $V_0/V_T = -0,064$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

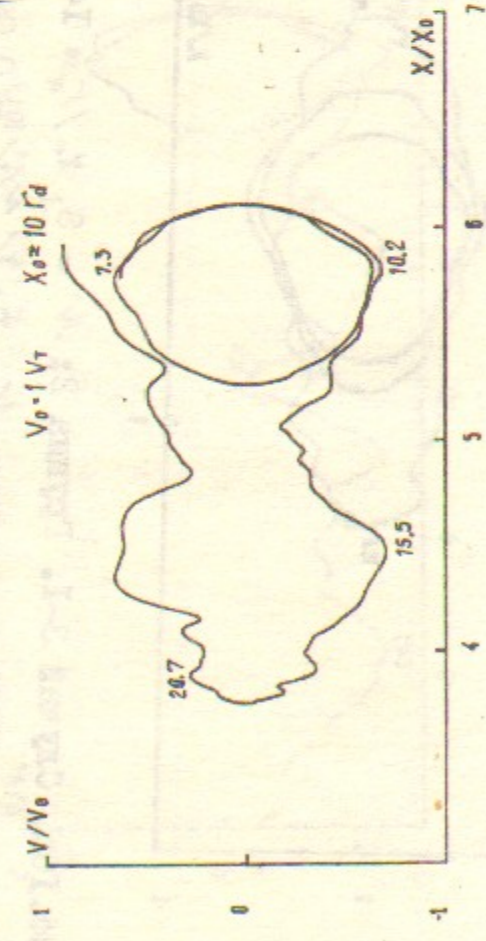


Рис.17а. Случай 3-1. Группа 2; $N = 1$, $\chi_0/r_d = 57,14$. Рис.17б. Случай 3-1. Группа 2; $N = 2$, $\chi_0/r_d = 57,14$.
 $V_0/V_T = 0,716$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $V_0/V_T = 0,637$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

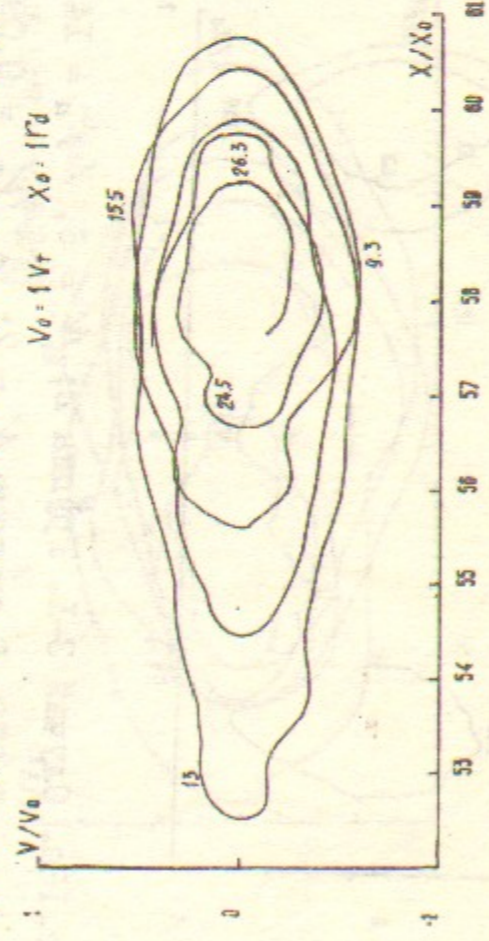


Рис.17в. Случай 3-1. Группа 2; $N = 3$, $\chi_0/r_d = 57,14$. Рис.17г. Случай 3-1. Группа 2; $N = 7$, $\chi_0/r_d = 57,14$.
 $V_0/V_T = 0,541$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $V_0/V_T = -0,477$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

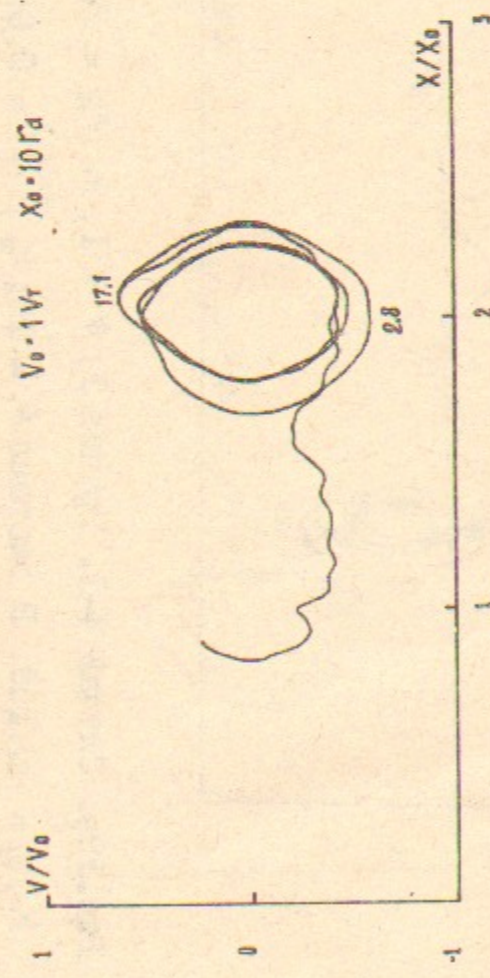
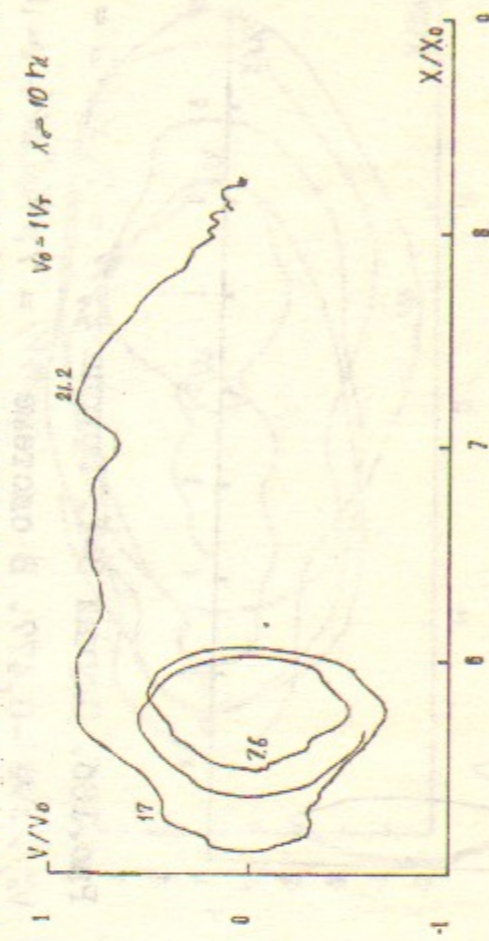
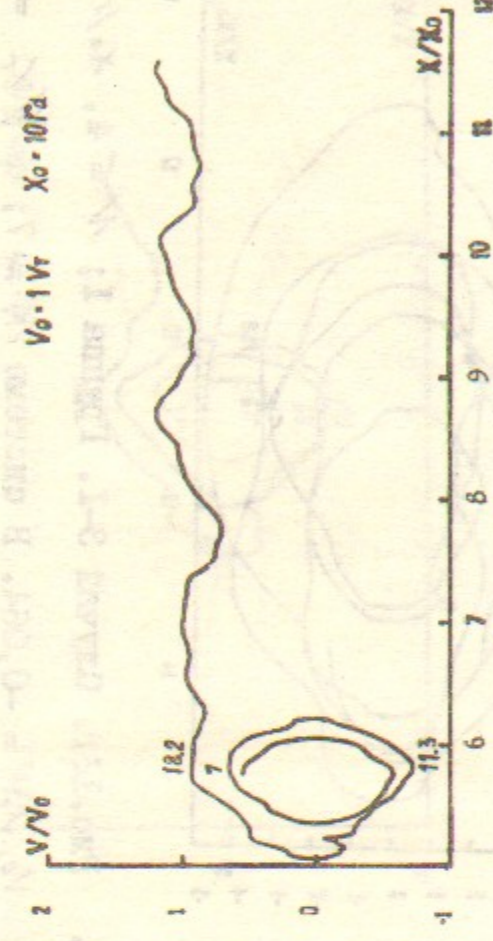


Рис.18а. Случай 4-1. Группа 2; $N = 1$, $\chi_0/r_d = 20$. Рис.18б. Случай 4-1. Группа 2; $N = 2$, $\chi_0/r_d = 20$.
 $V_0/V_T = 0,716$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$. $V_0/V_T = 0,637$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$.

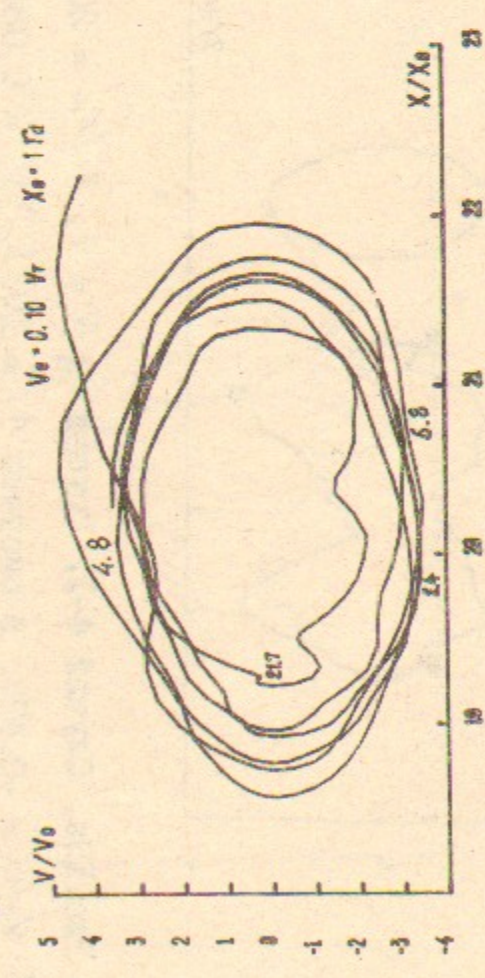
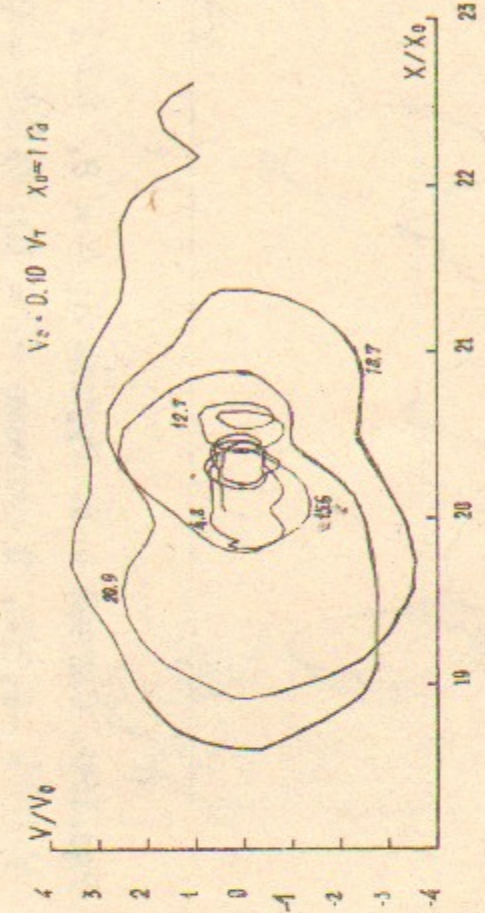
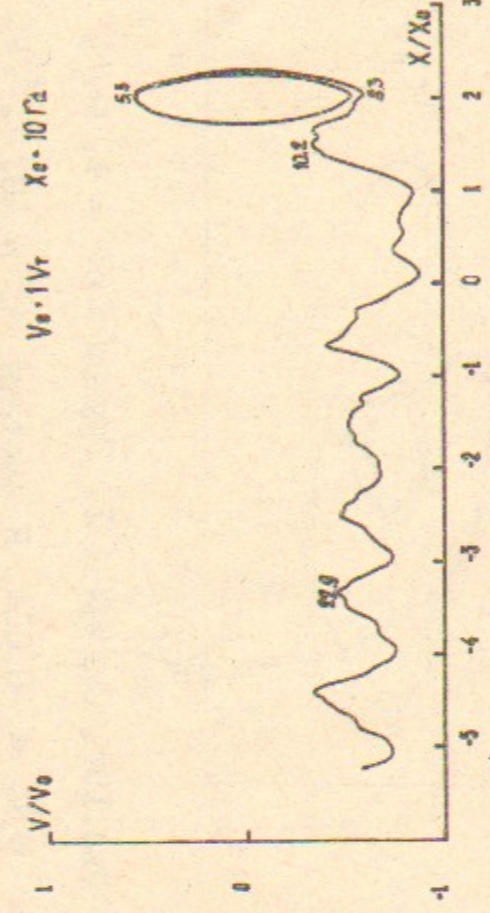


Рис.18в. Случай 4-1. Группа 2; $N = 4$, $\chi_0/r_d = 20$. Рис.18г. Случай 4-1. Группа 1; $N = 9$, $\chi_0/r_d = 20$.
 $V_0/V_T = 0,446$. В системе $N_i = 10$, $V_\phi^N/V_T = 0,0847$. $V_0/V_T = 0,095$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$.



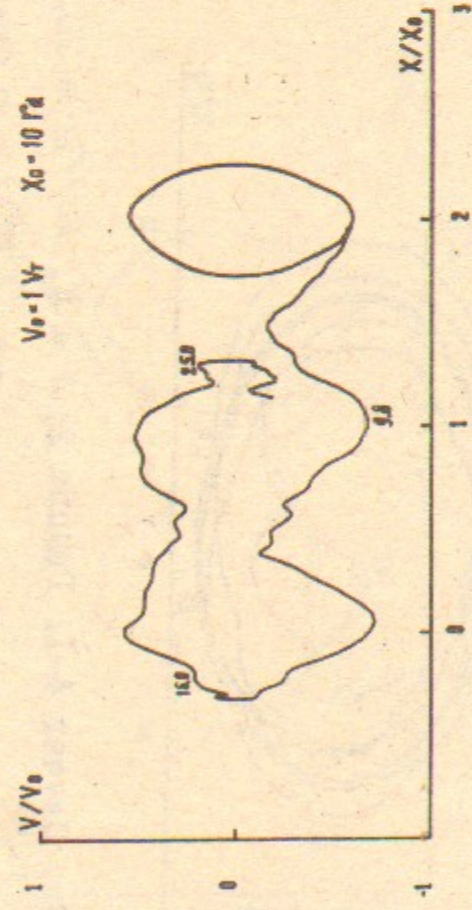


Рис.19а. Случай 4-1. Группа 2; $N = 7$, $\chi_0/\Gamma_d = 20$.

46 $V_0/V_T = -0,477$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$.

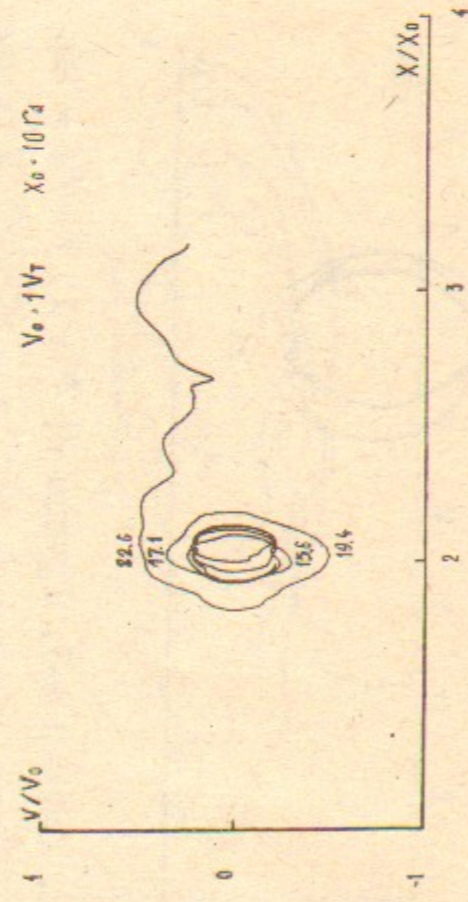


Рис.19в. Случай 4-1. Группа 1; $N = 1$, $\chi_0/\Gamma_d = 20$.

$V_0/V_T = -0,159$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$. $V_0/V_T = -0,064$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$.

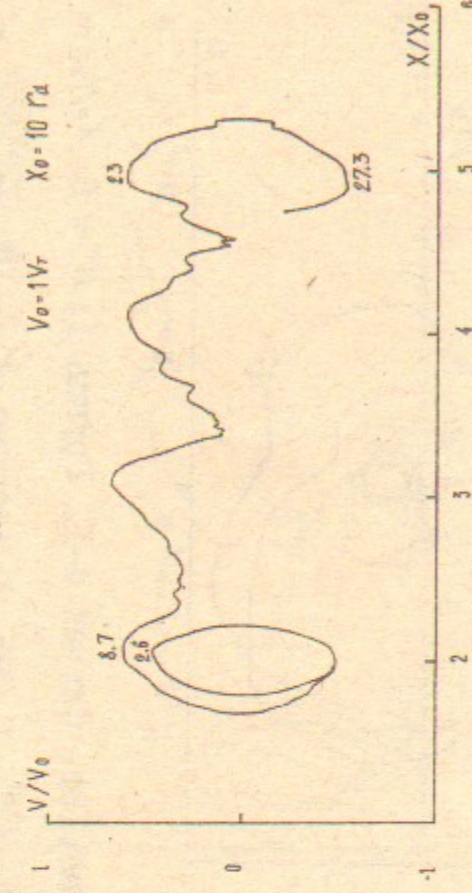


Рис.19б. Случай 4-1. Группа 2; $N = 8$, $\chi_0/\Gamma_d = 20$.

$V_0/V_T = -0,382$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$.

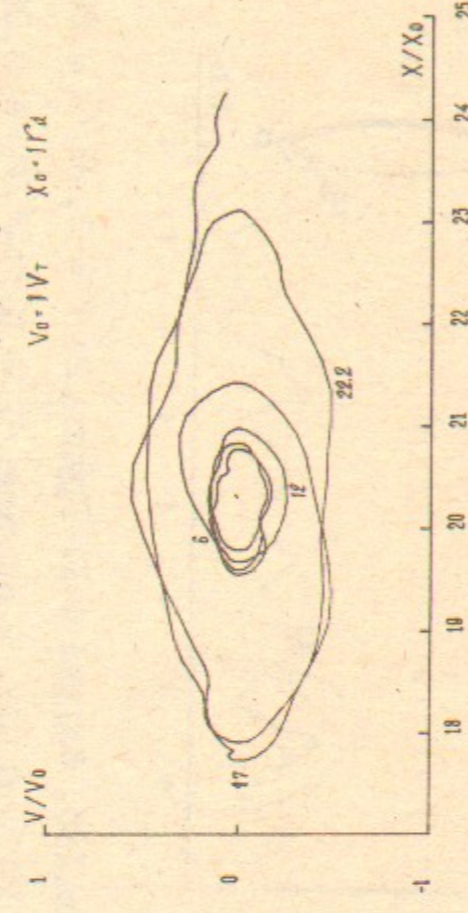


Рис.19г. Случай 4-1. Группа 1; $N = 4$, $\chi_0/\Gamma_d = 20$.

$V_0/V_T = -0,159$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$.

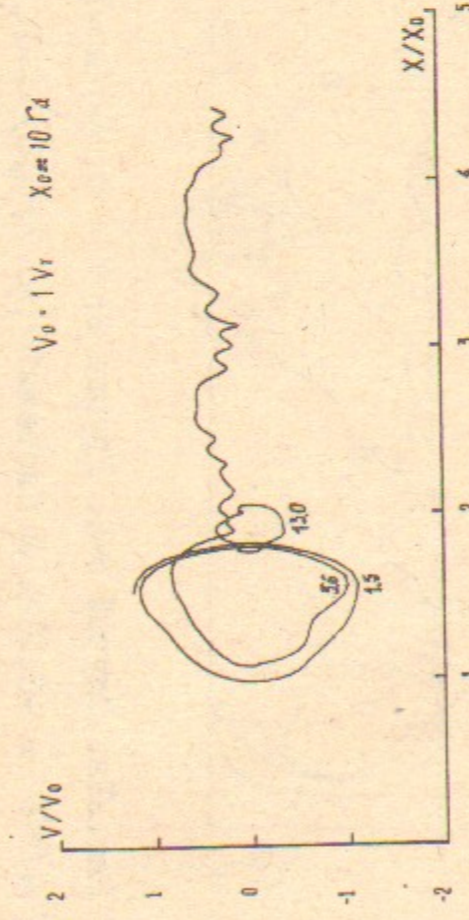


Рис.20а. Случай 3-2. Группа 2; $N = 1$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.

$V_0/V_T = 1,305$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

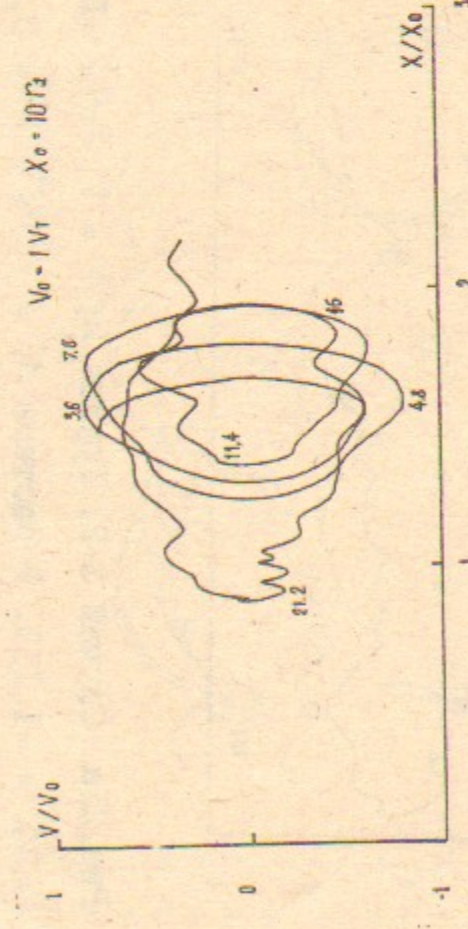


Рис.20в. Случай 3-2. Группа 2; $N = 4$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.

$V_0/V_T = 0,812$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0618$. $V_0/V_T = 0,646$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

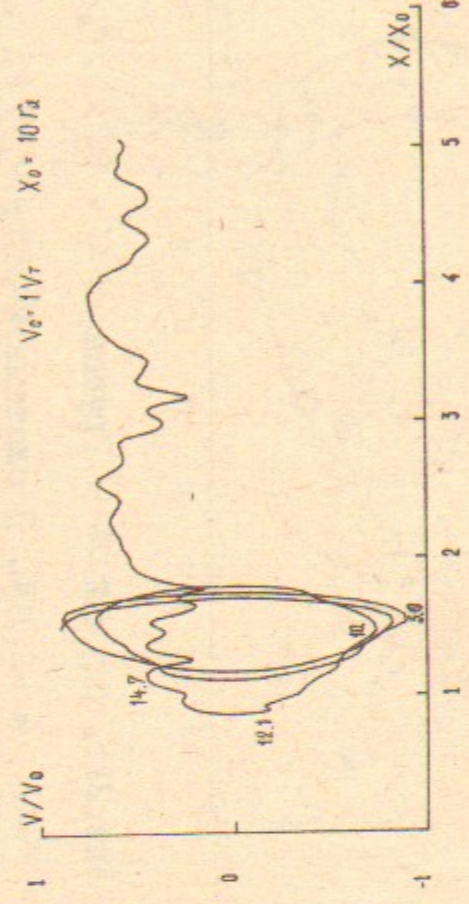


Рис.20б. Случай 3-2. Группа 2; $N = 3$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.

$V_0/V_T = 0,987$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

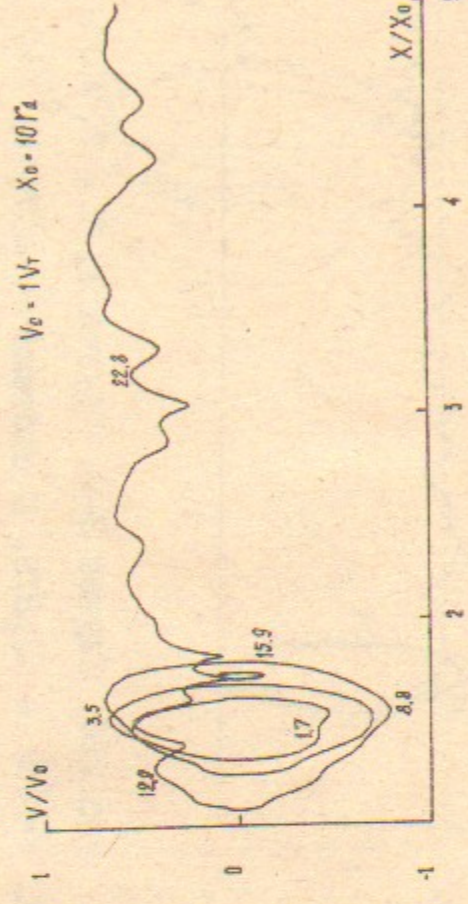


Рис.20г. Случай 3-2. Группа 2; $N = 5$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.

$V_0/V_T = 0,646$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

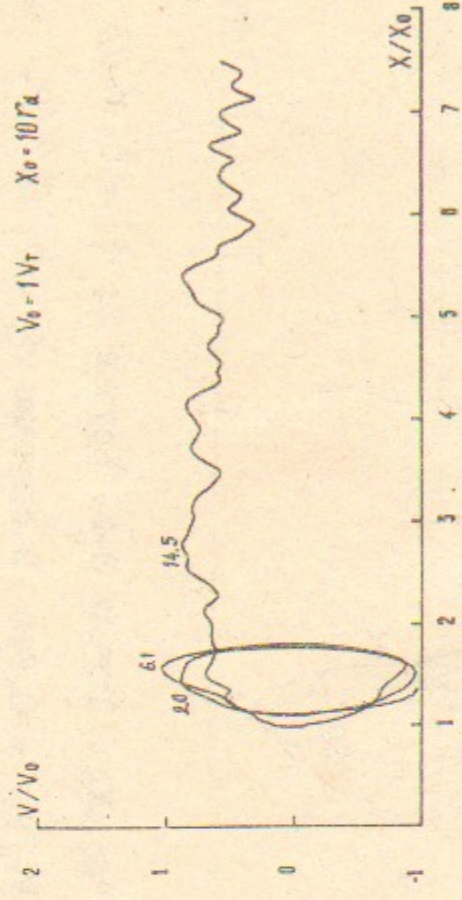
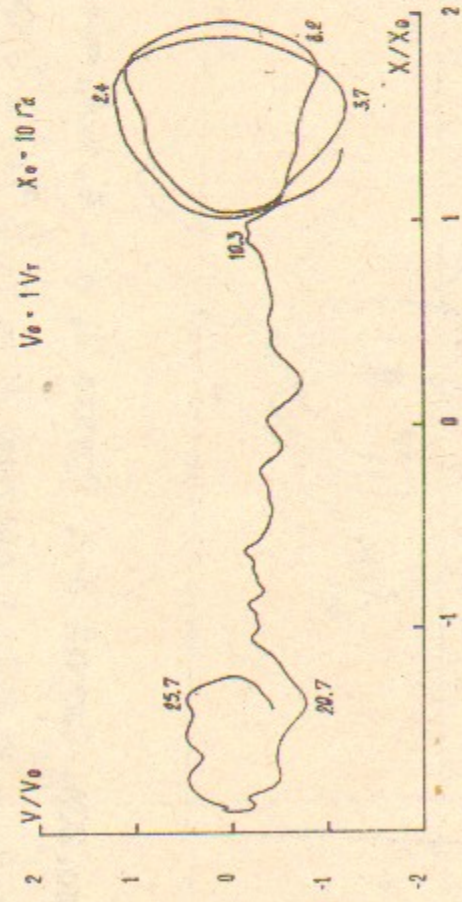


Рис. 21а. Случай 3-2. Группа 2; $\mathcal{N} = 7$, $\chi_0/r_d = 14,3$. Рис. 21б. Случай 3-2. Группа 2; $\mathcal{N} = 7$, $\chi_0/r_d = 14,3$. $V_0/V_T = -1,119$. В системе $\mathcal{N}_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0618$. $V_0/V_T = -0,875$. В системе $\mathcal{N}_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

48

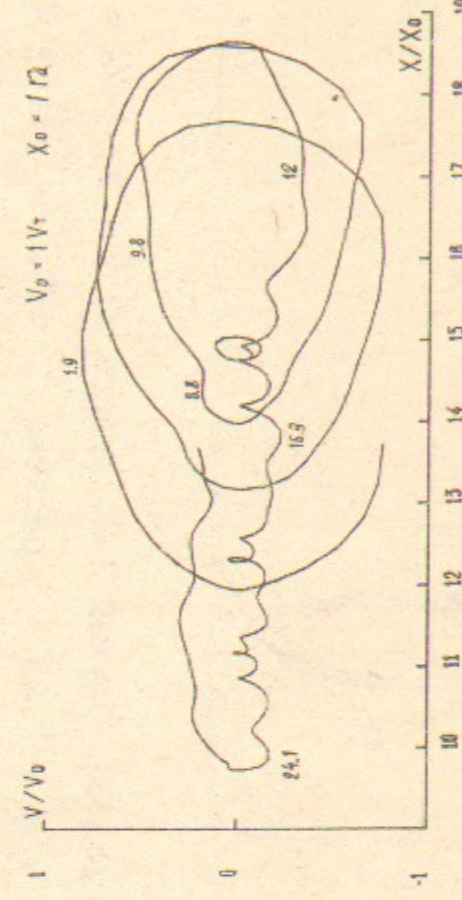
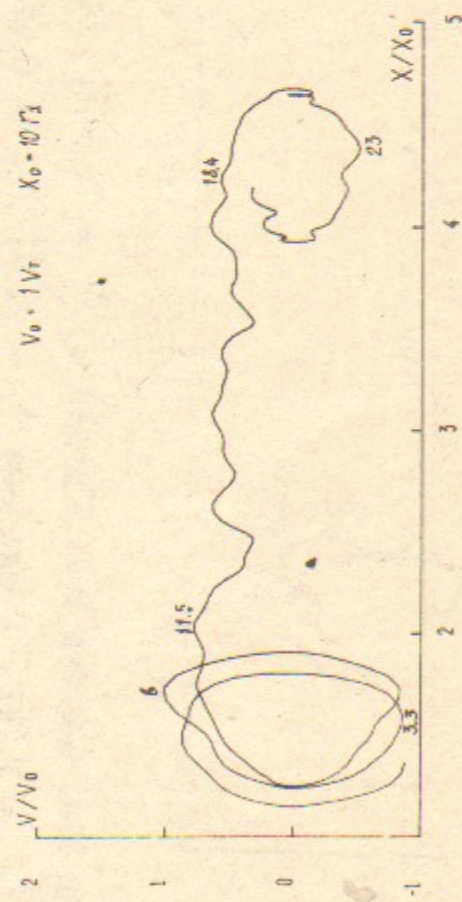


Рис. 21в. Случай 3-2. Группа 2; $\mathcal{N} = 5$, $\chi_0/r_d = 14,3$. Рис. 21г. Случай 3-2. Группа 2; $\mathcal{N} = 8$, $\chi_0/r_d = 14,3$. $V_0/V_T = -0,818$. В системе $\mathcal{N}_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0618$. $V_0/V_T = -0,700$. В системе $\mathcal{N}_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0618$.

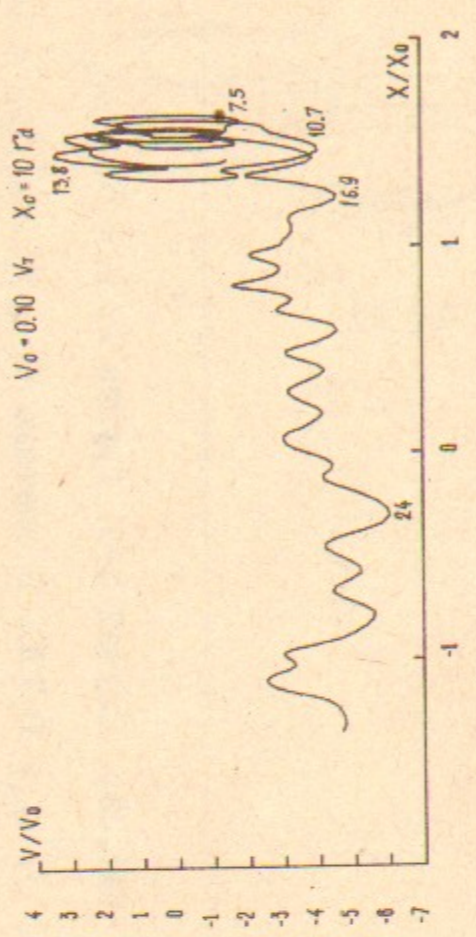
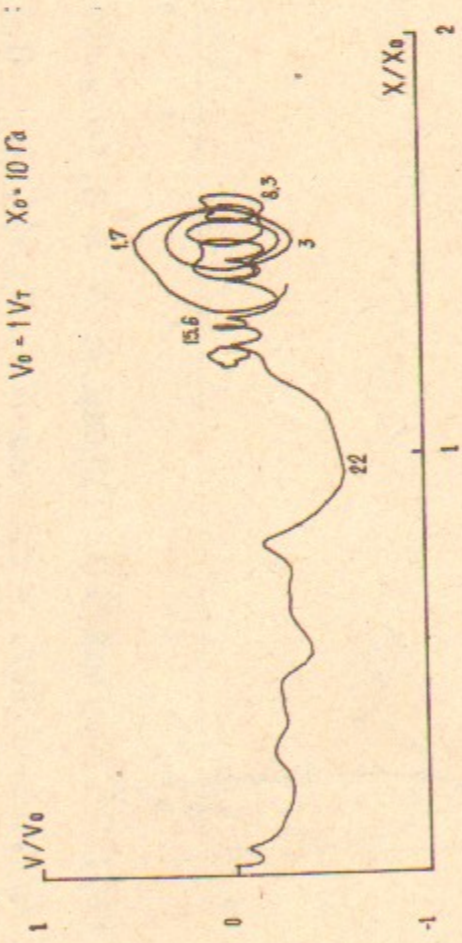


Рис. 22а. Случай 3-2. Группа 1; $\mathcal{N} = 1$, $\chi_0/r_d = 14,3$. Рис. 22б. Случай 3-2. Группа 1; $\mathcal{N} = 4$, $\chi_0/r_d = 14,3$. $V_0/V_T = -0,229$. В системе $\mathcal{N}_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $V_0/V_T = -0,057$. В системе $\mathcal{N}_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

49

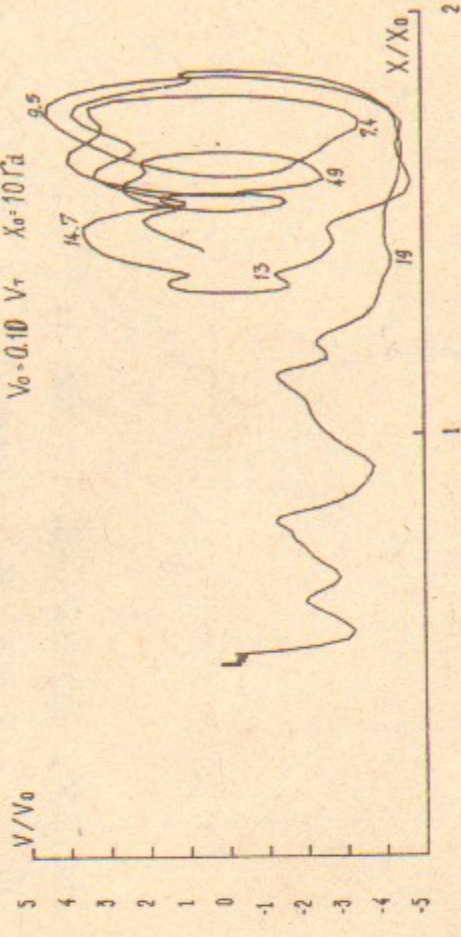
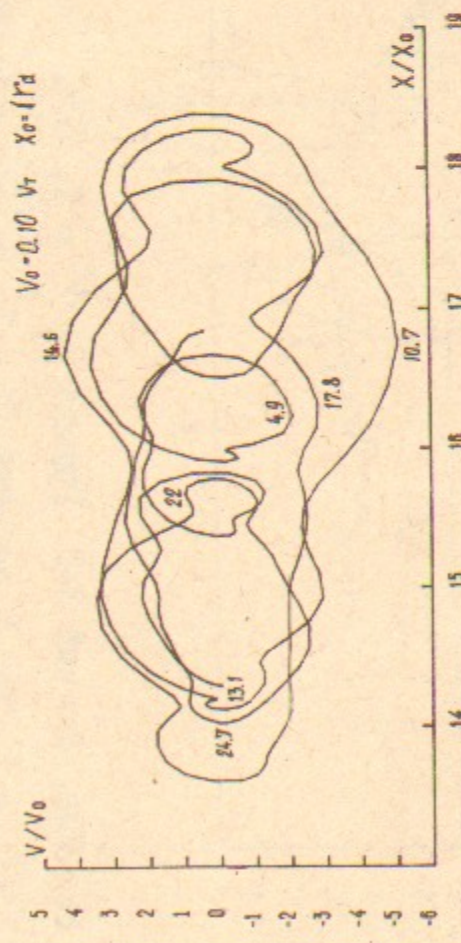


Рис. 22в. Случай 3-2. Группа 1; $\mathcal{N} = 6$, $\chi_0/r_d = 14,3$. Рис. 22г. Случай 3-2. Группа 1; $\mathcal{N} = 7$, $\chi_0/r_d = 14,3$. $V_0/V_T = 0,057$. В системе $\mathcal{N}_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0618$. $V_0/V_T = 0,115$. В системе $\mathcal{N}_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0618$.

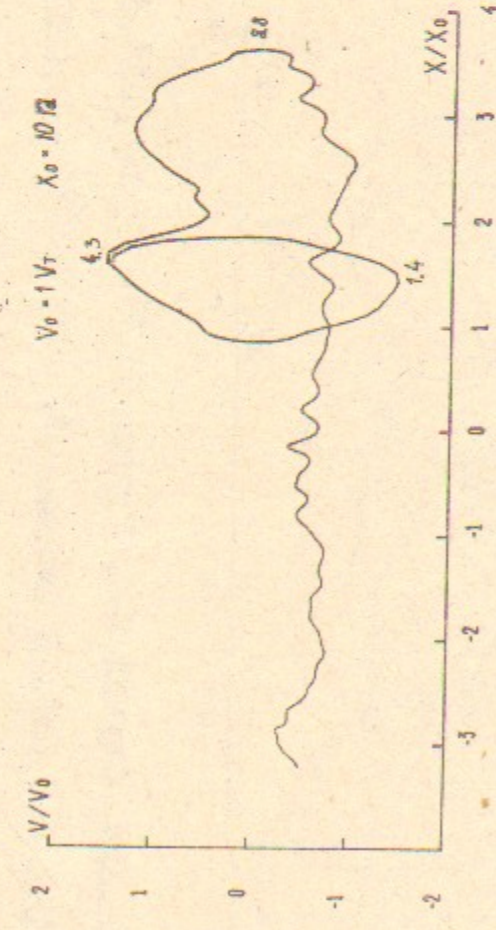


Рис. 23а. Случай 3-3. Группа 2; $N = 1$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 23б. Случай 3-3. Группа 2; $N = 2$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. $V_0/V_T = 1,576$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

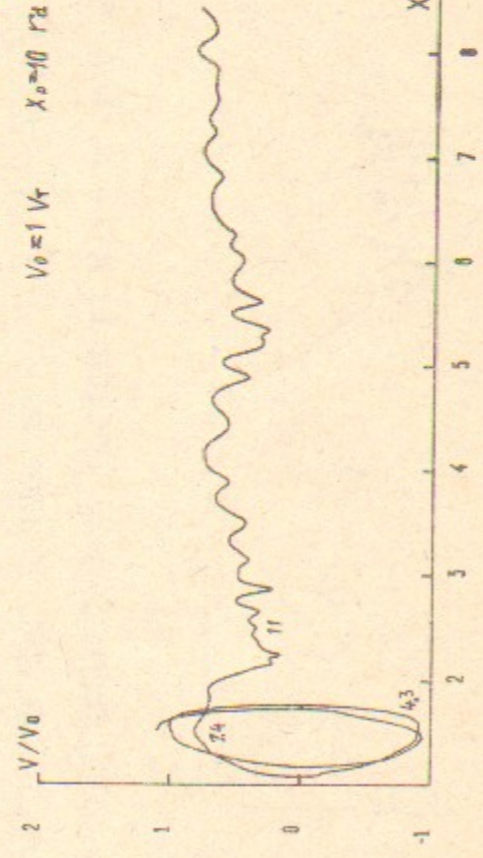


Рис. 23в. Случай 3-3. Группа 2; $N = 3$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 23г. Случай 3-3. Группа 2; $N = 5$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. $V_0/V_T = 1,194$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

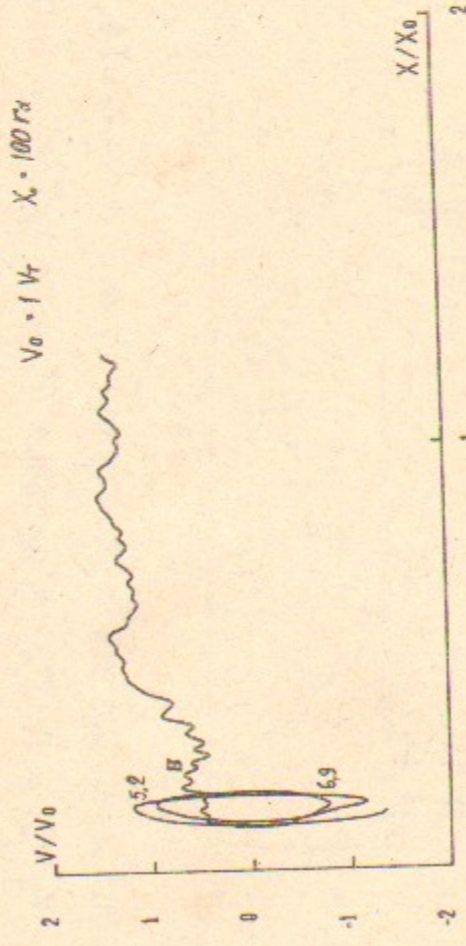
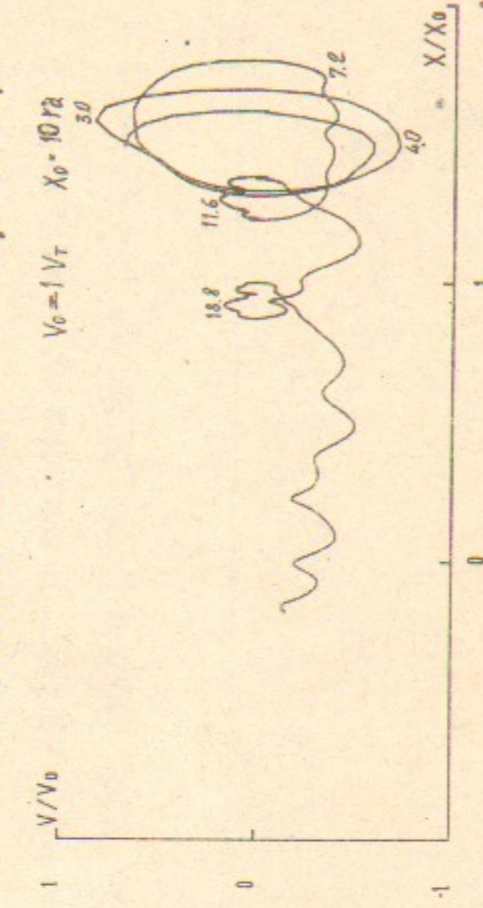
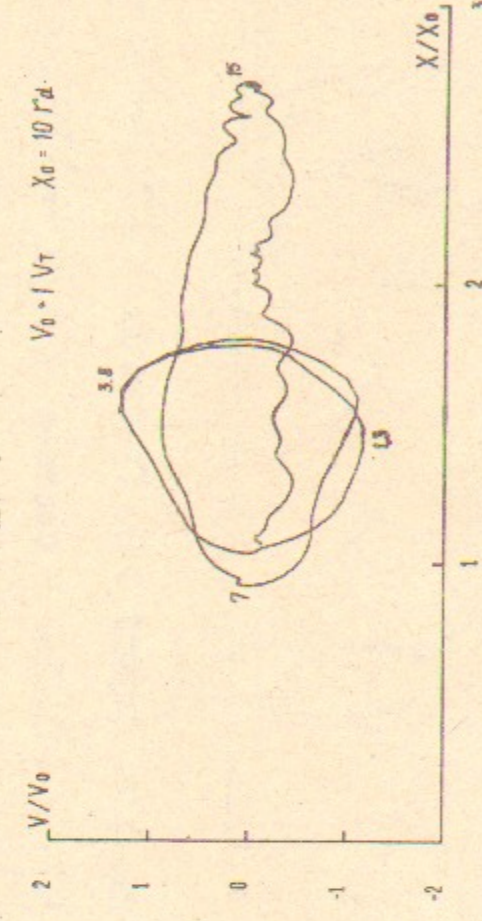


Рис. 24а. Случай 3-3. Группа 2; $N = 6$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 24б. Случай 3-3. Группа 2; $N = 9$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. $V_0/V_T = -1,257$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

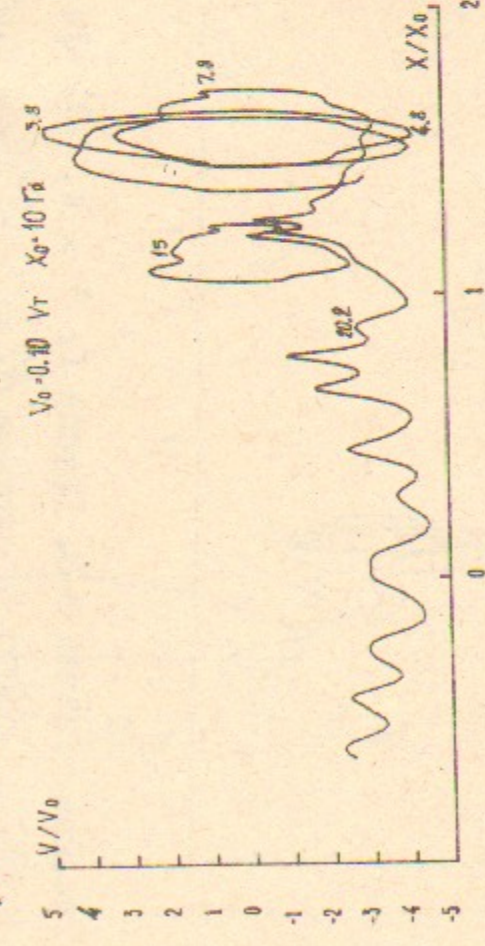
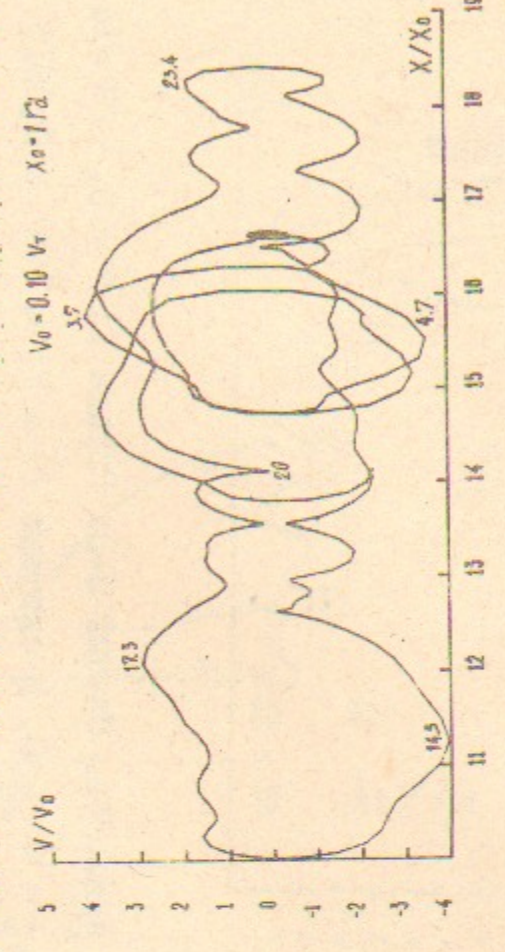
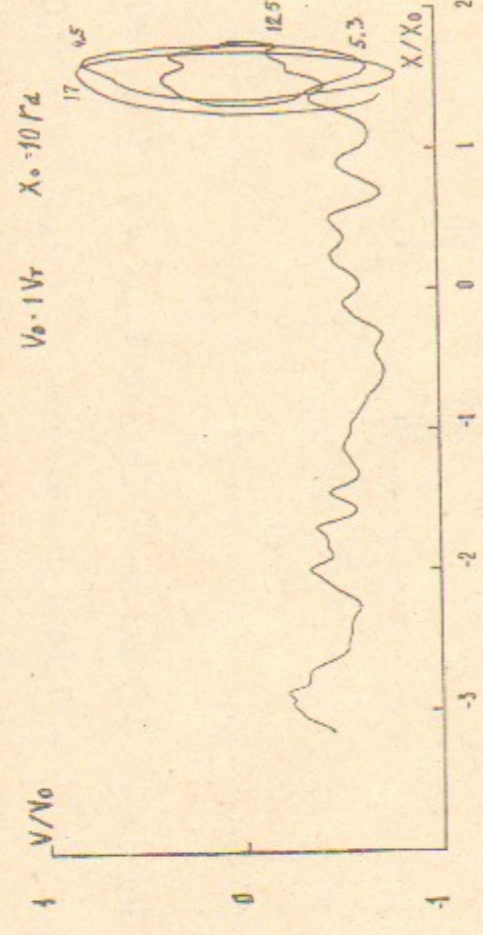


Рис. 24в. Случай 3-3. Группа 1; $N = 2$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 24г. Случай 3-3. Группа 1; $N = 3$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. $V_0/V_T = -0,210$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.



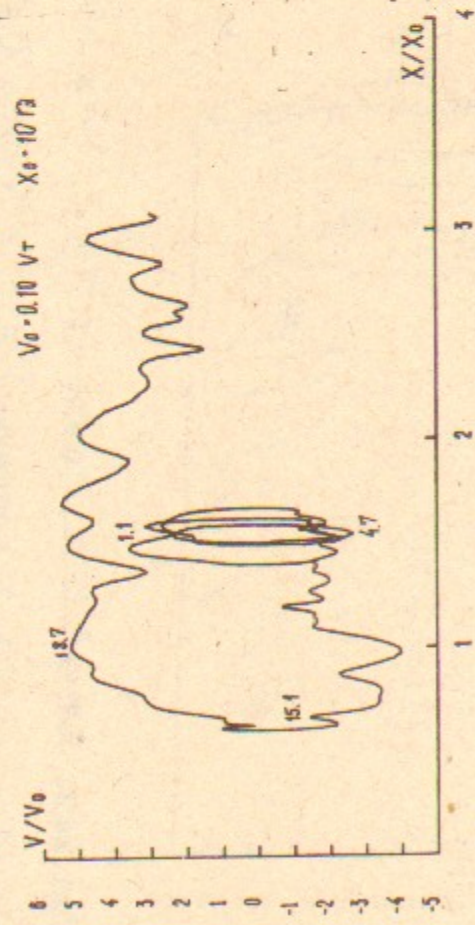


Рис. 25а. Случай 3-3. Группа I; $N = 4$, $\chi_0/r_0 = 14,3$. Рис. 25б. Случай 3-3. Группа I; $N = 5$, $\chi_0/r_0 = 14,3$.
 $V_0/V_T = -0,070$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $V_0/V_T = 0$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

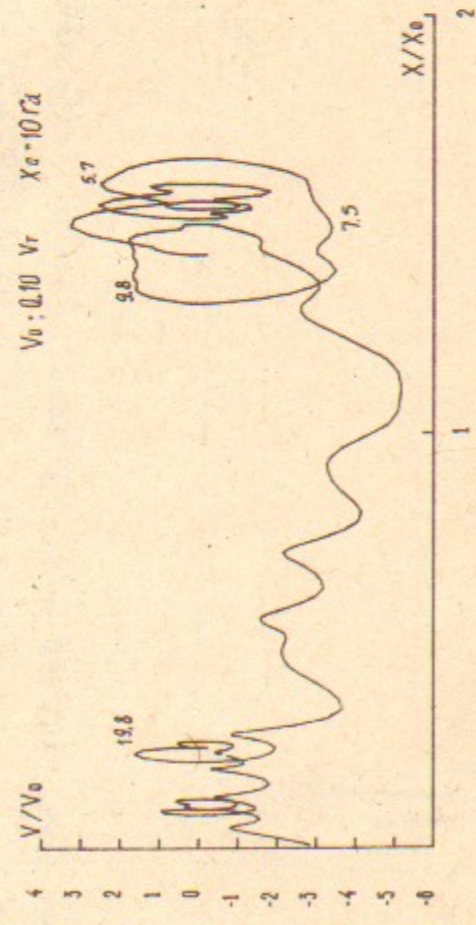


Рис. 25в. Случай 3-3. Группа I; $N = 6$, $\chi_0/r_0 = 14,3$. Рис. 25г. Случай 3-3. Группа I; $N = 7$, $\chi_0/r_0 = 0,0915$.
 $V_0/V_T = 0,070$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $V_0/V_T = 0,140$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$.

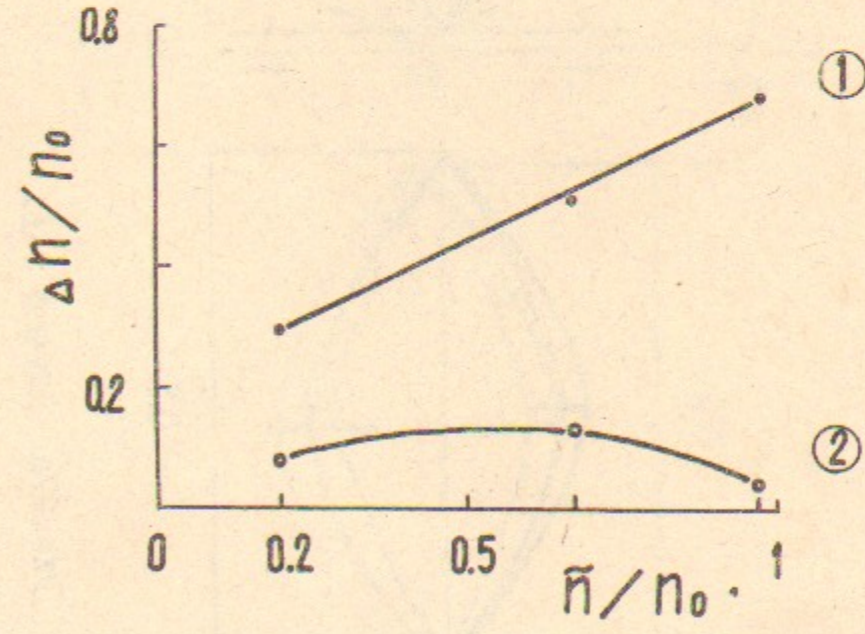
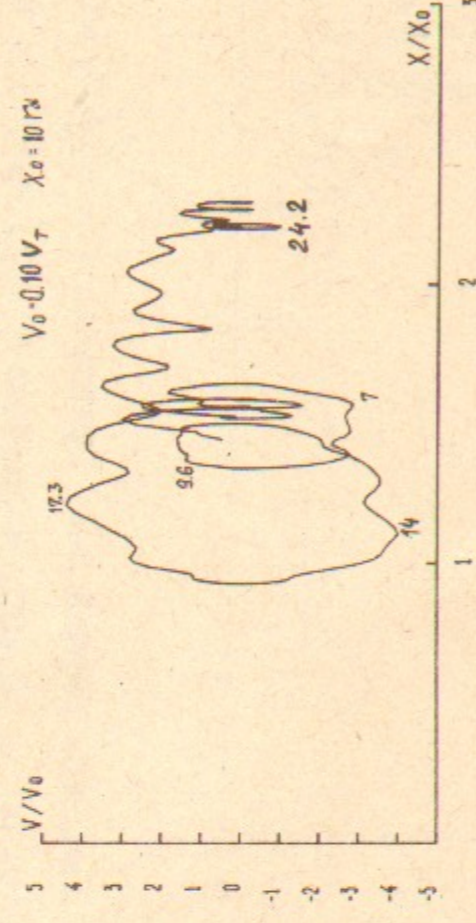
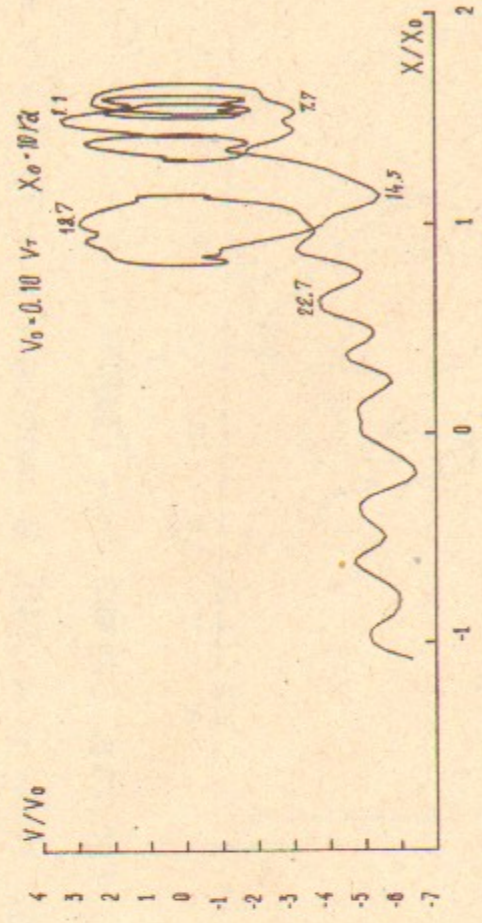


Рис. 26б.

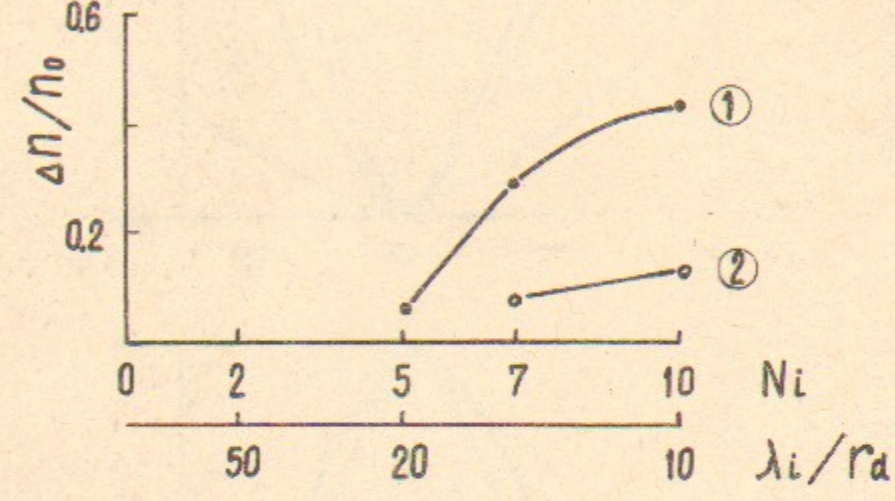


Рис. 26а.

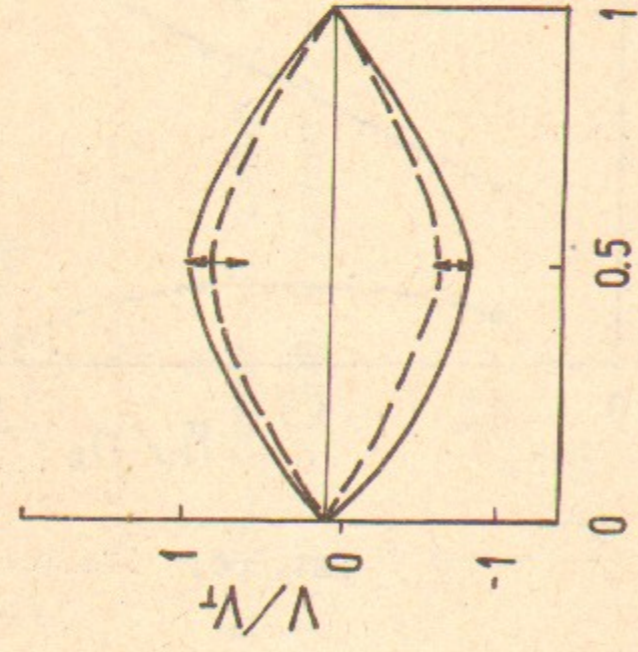


Рис. 27а. Случай 2-1.

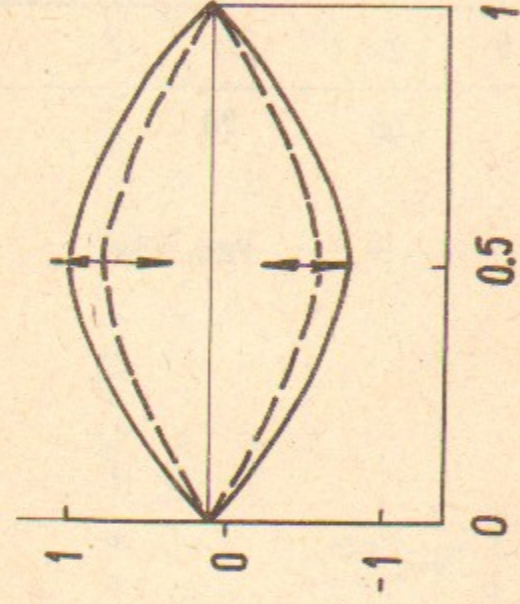


Рис. 27б. Случай 3-1.

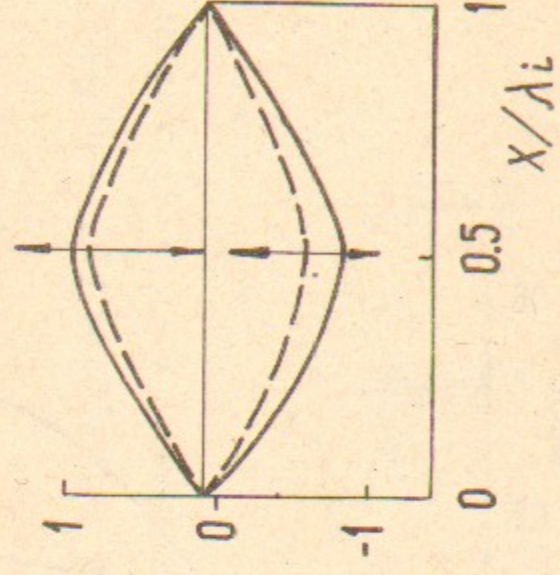


Рис. 27в. Случай 4-1.

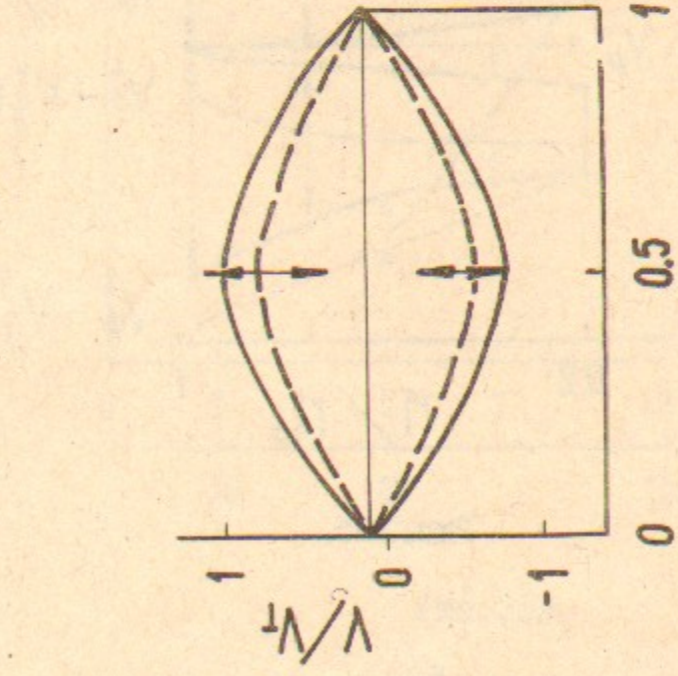


Рис. 27б. Случай 3-1.

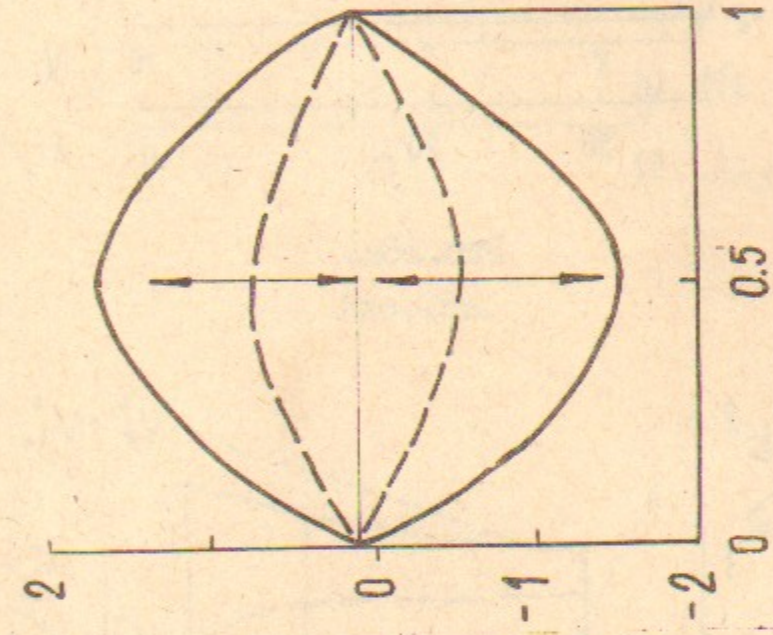


Рис. 27г. Случай 3-2.

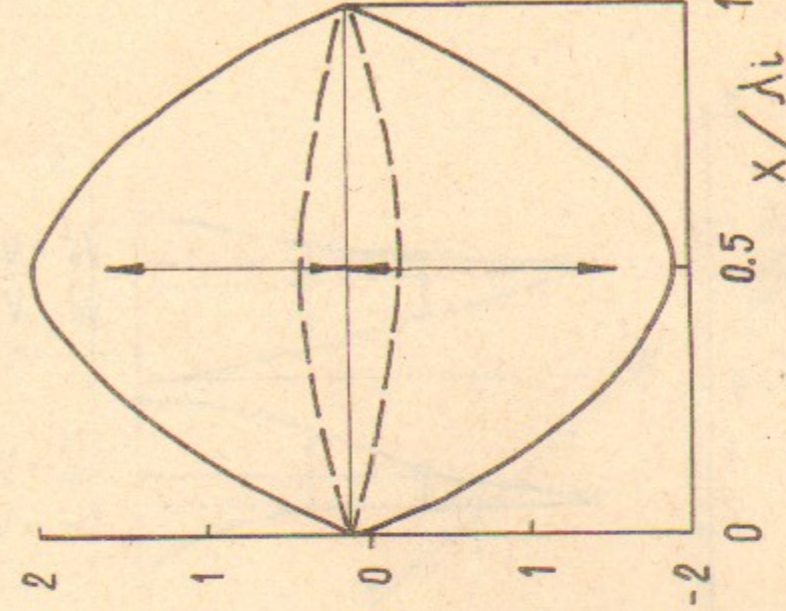


Рис. 27д. Случай 3-3.

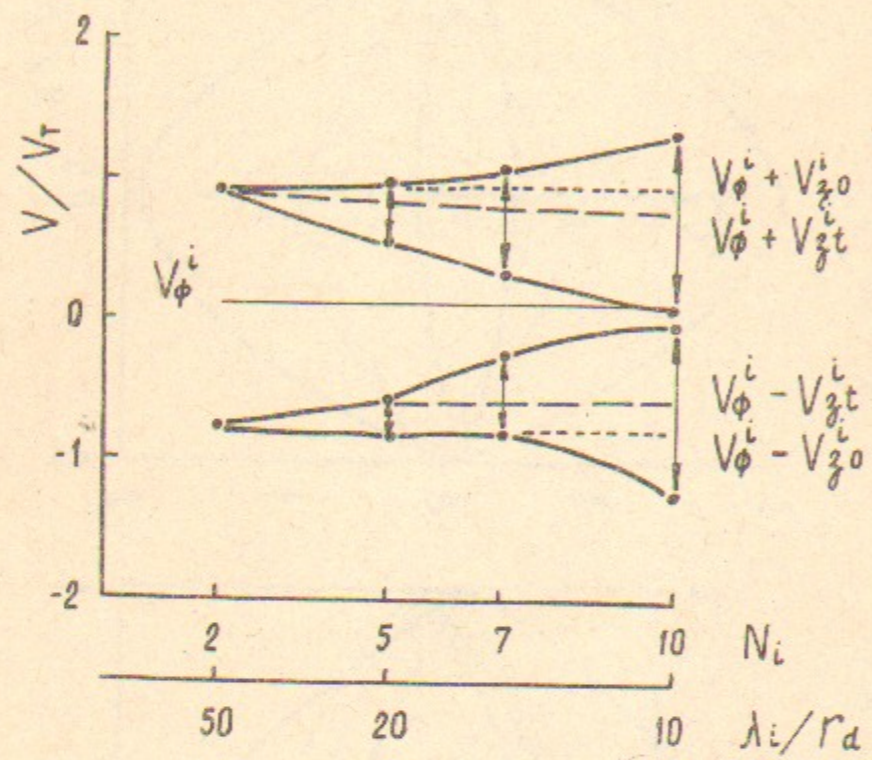


Рис. 28а.

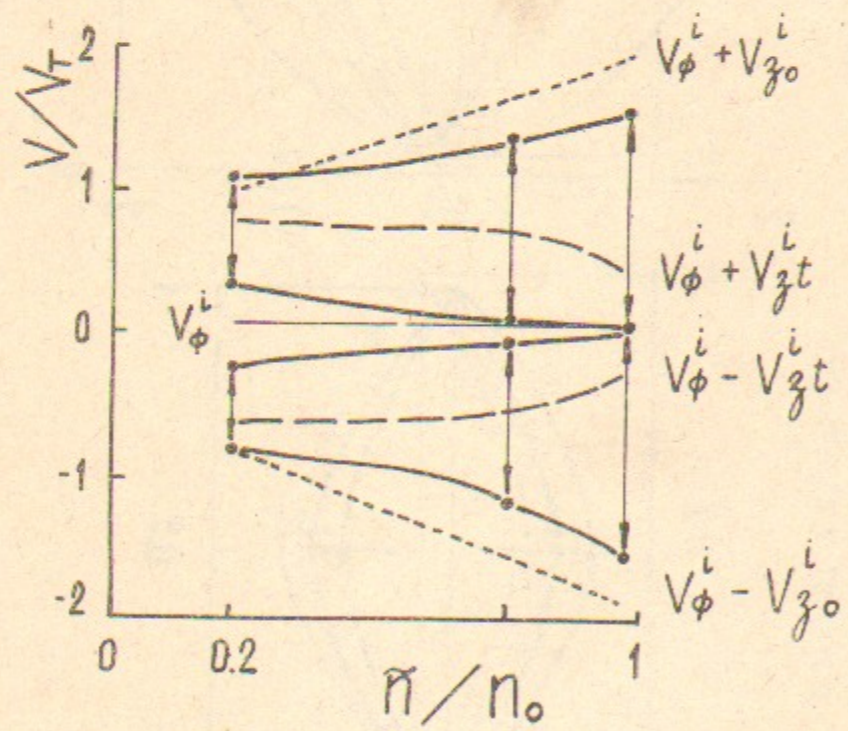


Рис. 28б.

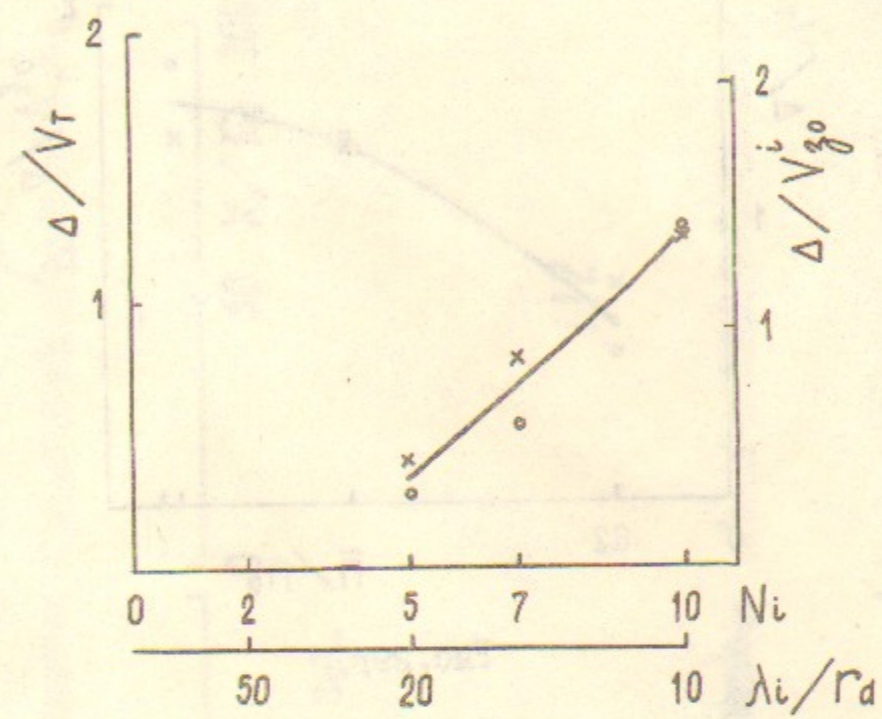


Рис. 29а.

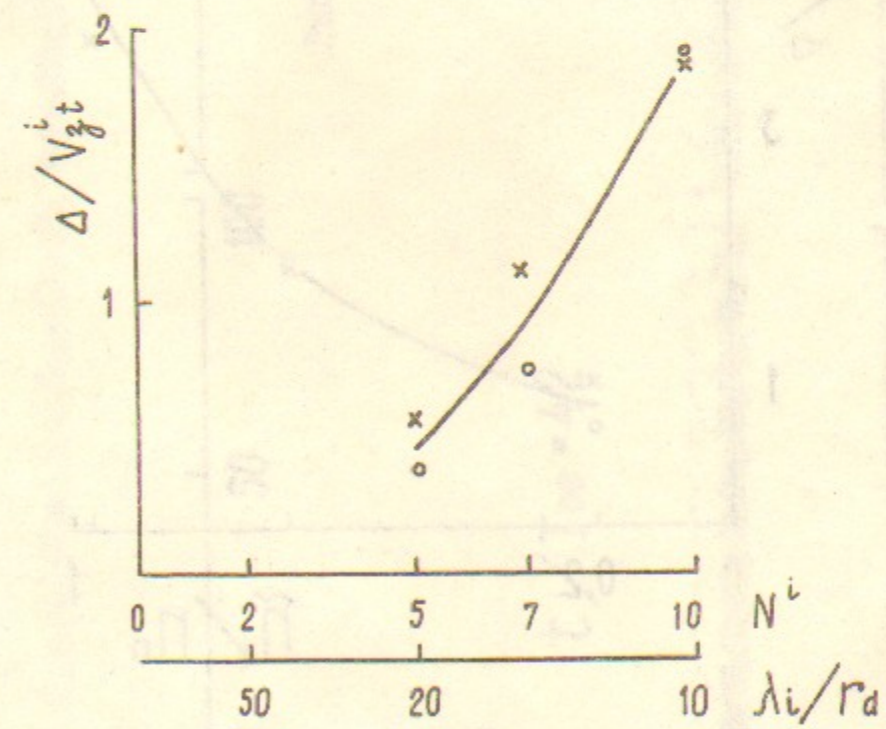


Рис. 29б.

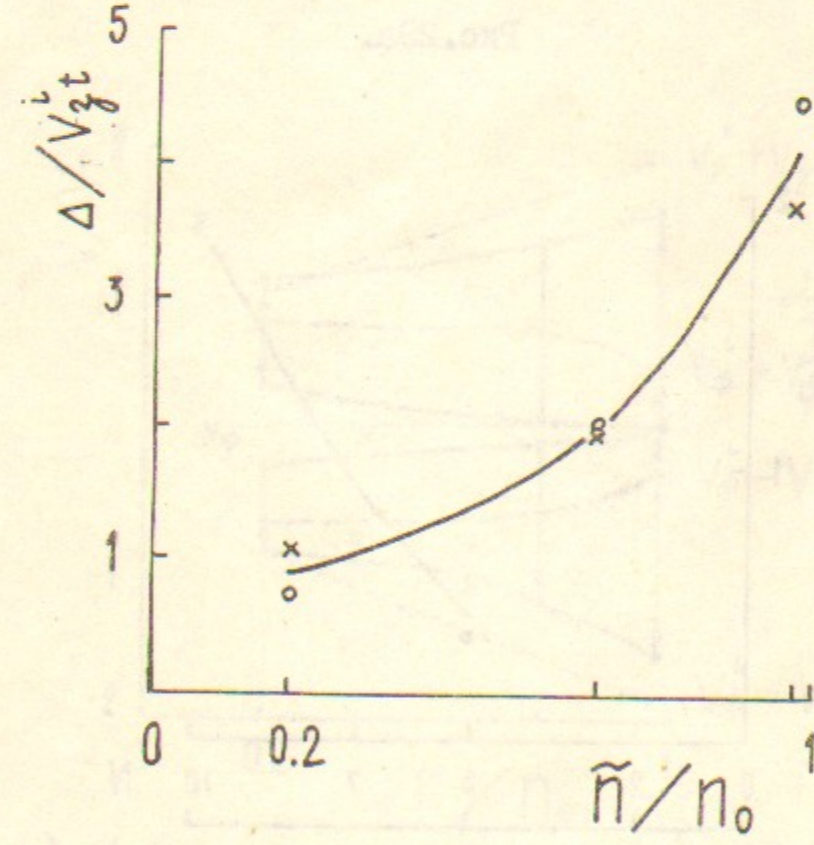


Рис. 29д.

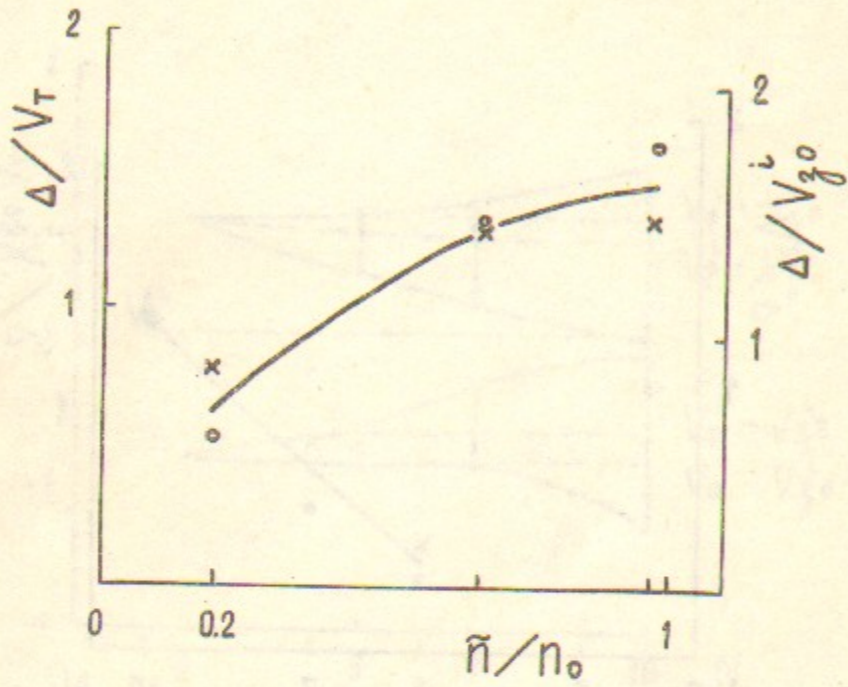


Рис. 29г.

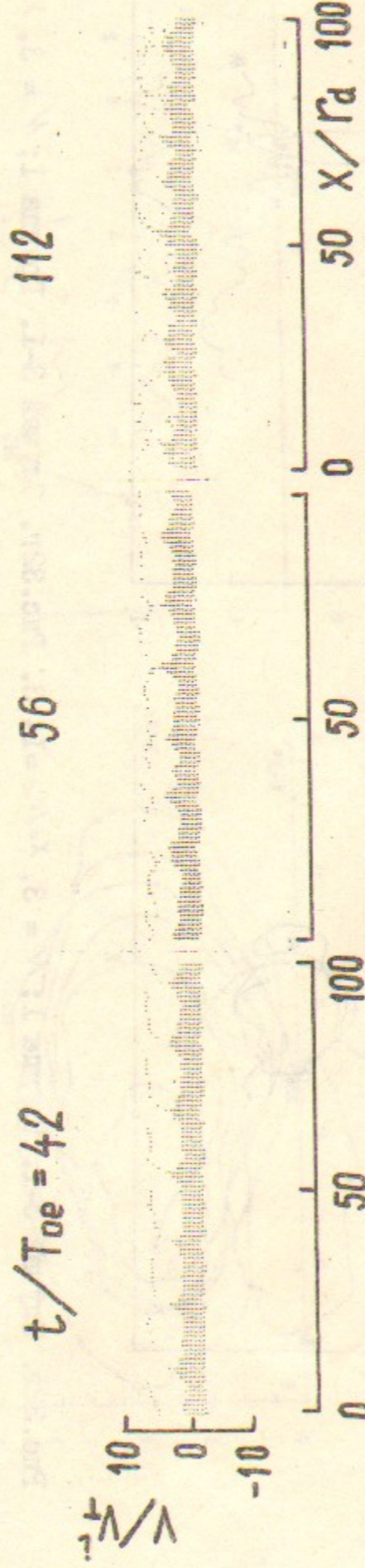


Рис. 30. Случай 3-Г.

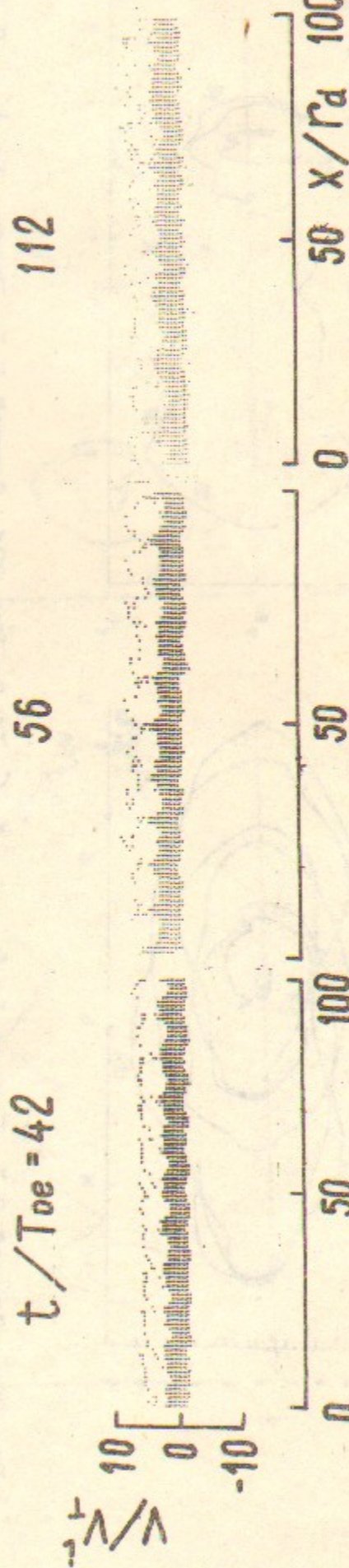


Рис. 31. Случай 4-Г.

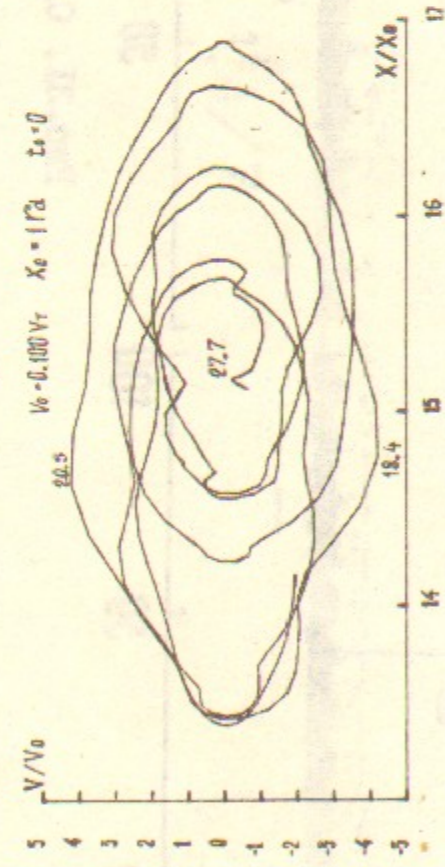


Рис. 32а. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 3$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 32б. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 3$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.
 В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$, $t_0 = 0$.

86

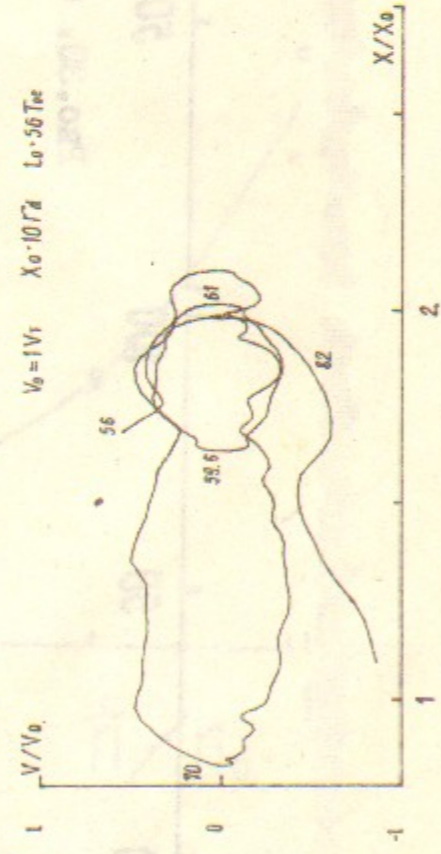


Рис. 32в. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 3$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 32г. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 3$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.
 В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$, $t_0/T_{oe} = 56$.

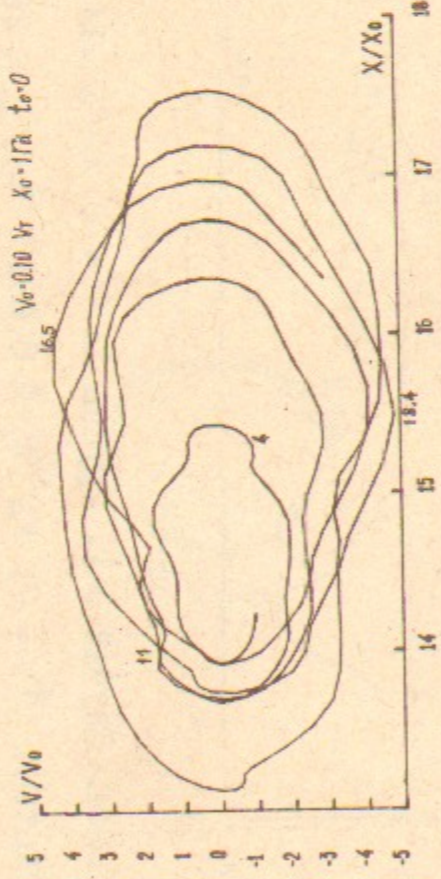
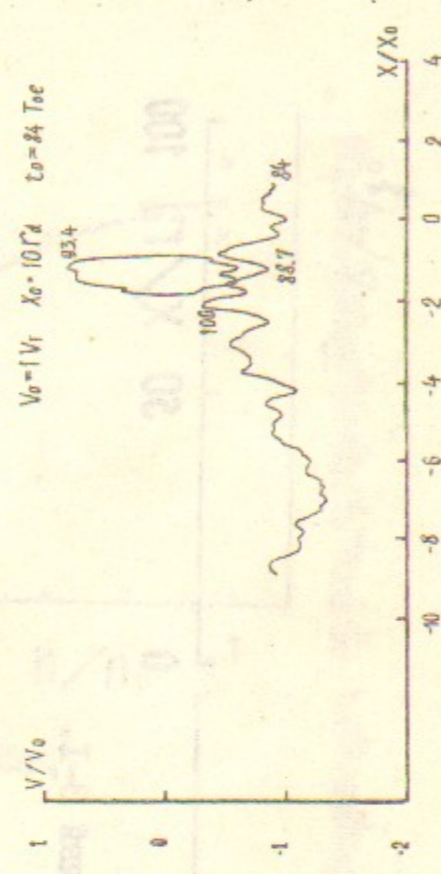
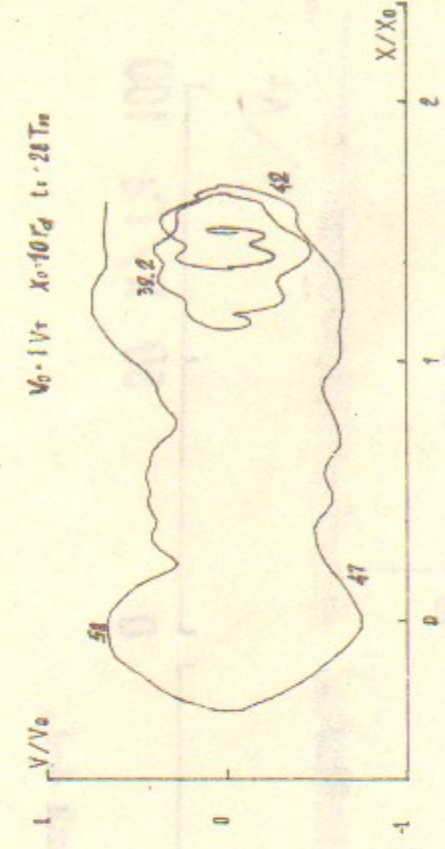


Рис. 33а. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 6$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 33б. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 6$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.
 В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$, $t_0 = 0$.

87

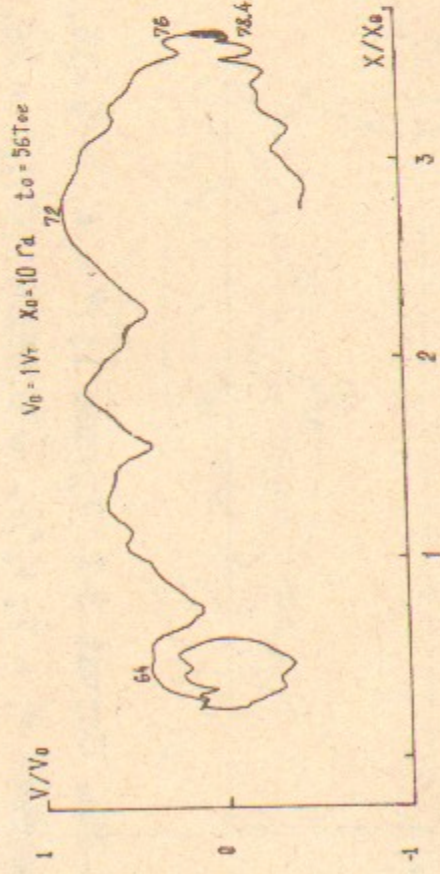


Рис. 33в. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 6$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$. Рис. 33г. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 6$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.
 В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$, $t_0/T_{oe} = 56$.

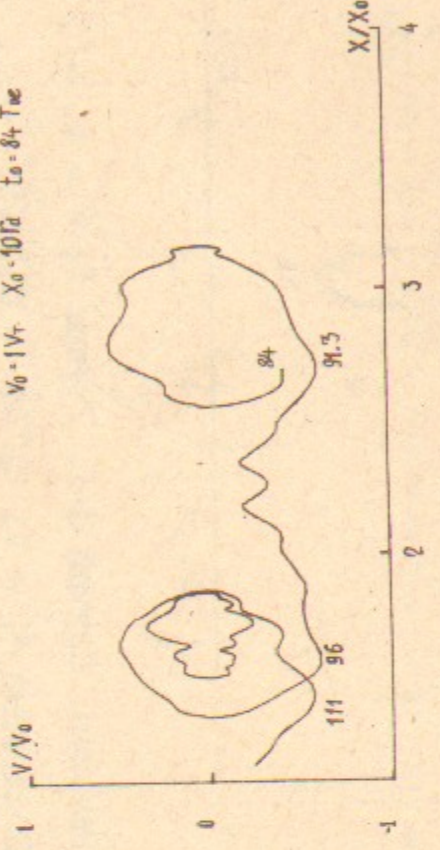
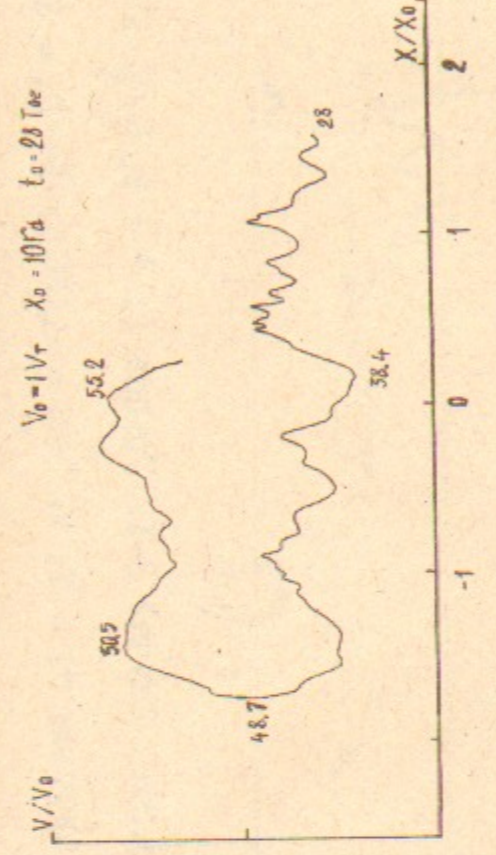
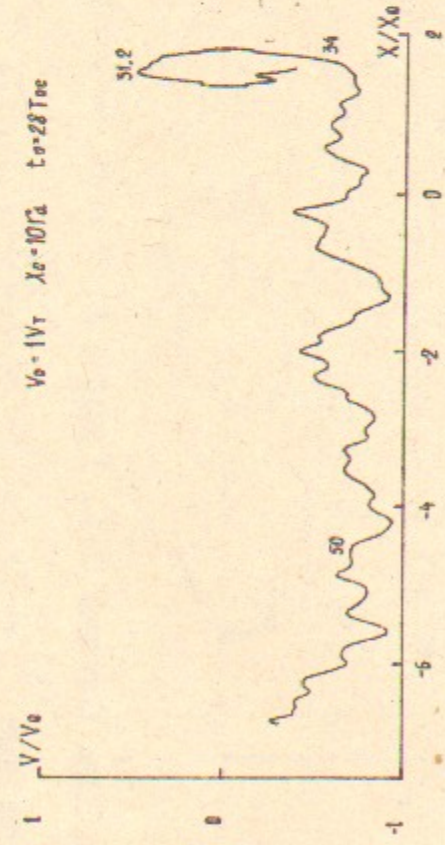


Рис. 33е. Случай 3-1. Группа I; $N_i = 6$, $\chi_0/\Gamma_d = 14,3$.
 В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$, $t_0/T_{oe} = 84$.



62
Рис. 34а. Случай 3-1. Группа 1; $N = 4$, $\chi_0/r_d = 14,3$.
В системе $N_i = 7$; $V_\phi^M/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 28$.

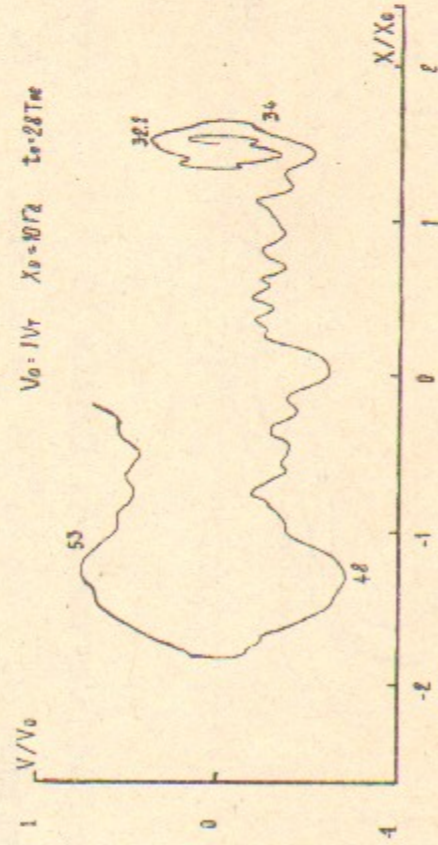


Рис. 34в. Случай 3-1. Группа 1; $N = 8$, $\chi_0/r_d = 14,3$.
В системе $N_i = 7$; $V_\phi^M/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 28$.

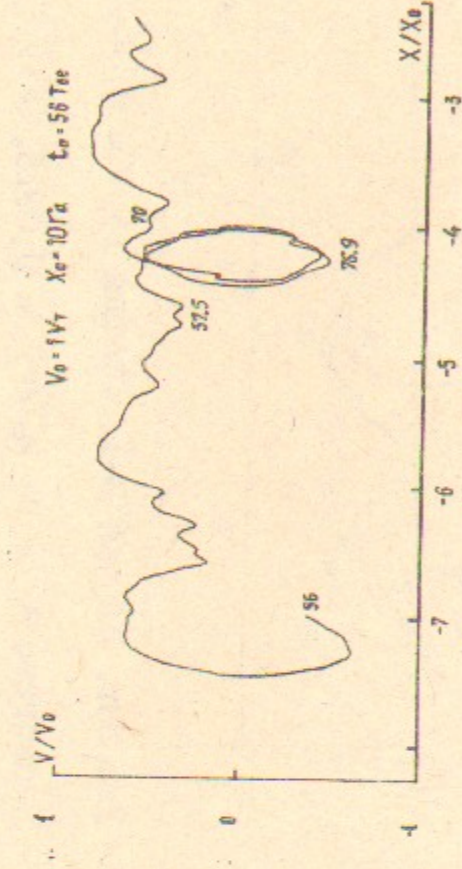


Рис. 34б. Случай 3-1. Группа 1; $N = 4$, $\chi_0/r_d = 14,3$.
В системе $N_i = 7$; $V_\phi^M/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 56$.

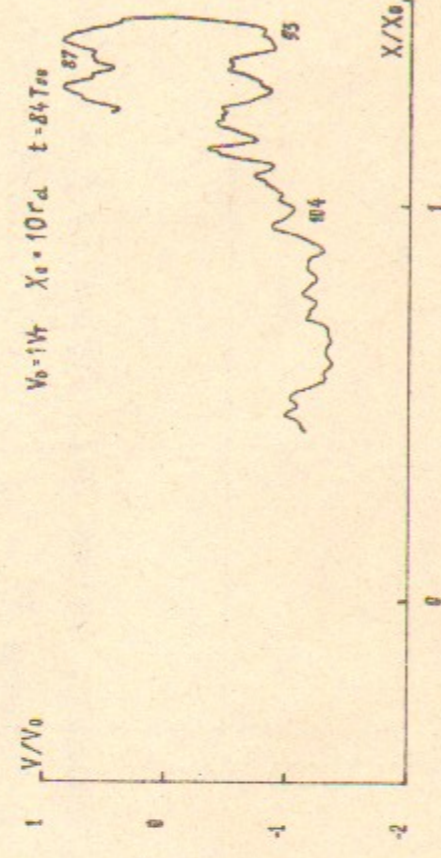
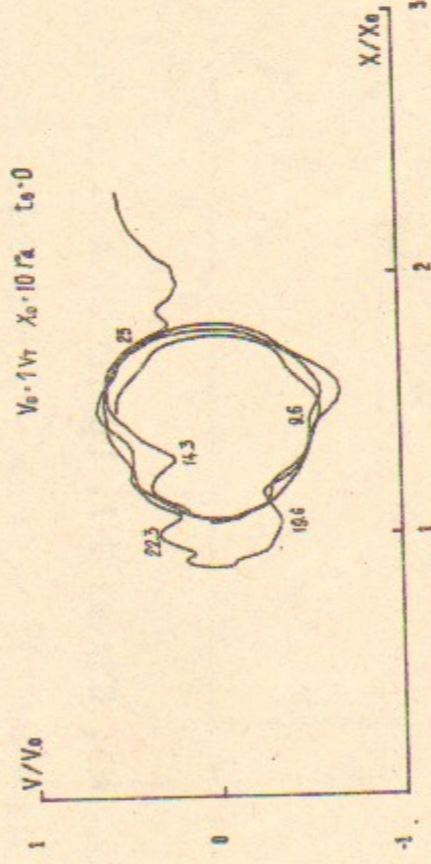


Рис. 34г. Случай 3-1. Группа 1; $N = 8$, $\chi_0/r_d = 13,3$.
В системе $N_i = 7$; $V_\phi^M/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 84$.



63
Рис. 35а. Случай 3-1. Группа 2; $N = 2$, $\chi_0/r_d = 14,3$.
В системе $N_i = 7$; $V_\phi^M/V_T = 0,0915$. $t_0 = 0$.

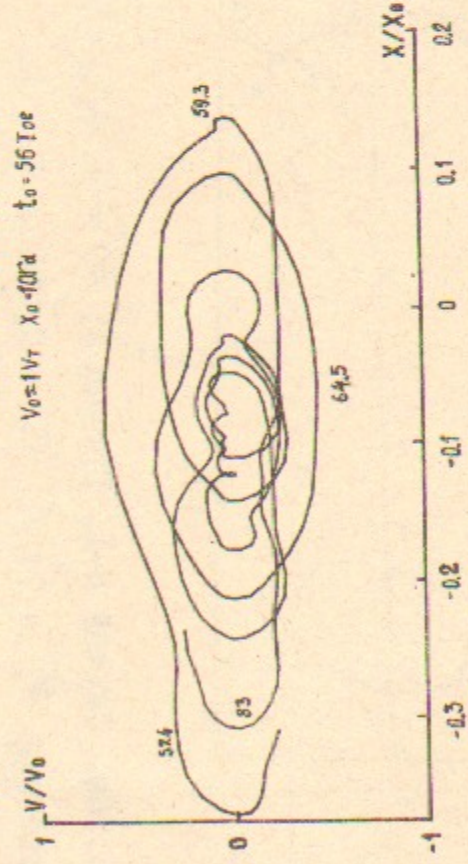


Рис. 35в. Случай 3-1. Группа 2; $N = 2$, $\chi_0/r_d = 14,3$.
В системе $N_i = 7$; $V_\phi^M/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 56$.

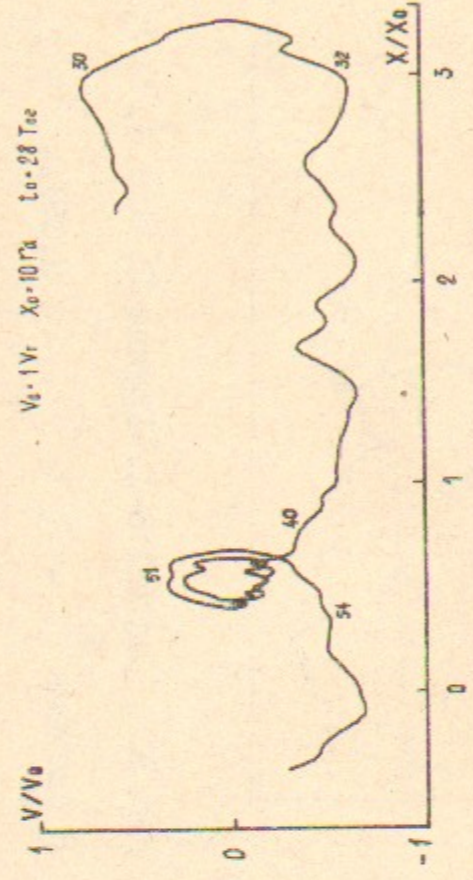


Рис. 35б. Случай 3-1. Группа 2; $N = 2$, $\chi_0/r_d = 14,3$.
В системе $N_i = 7$; $V_\phi^M/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 28$.

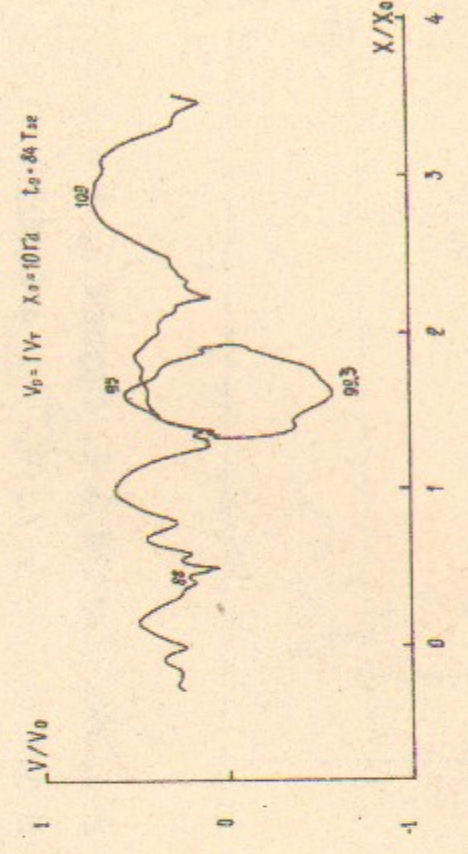


Рис. 35г. Случай 3-1. Группа 2; $N = 2$, $\chi_0/r_d = 14,3$.
В системе $N_i = 7$; $V_\phi^M/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 84$.

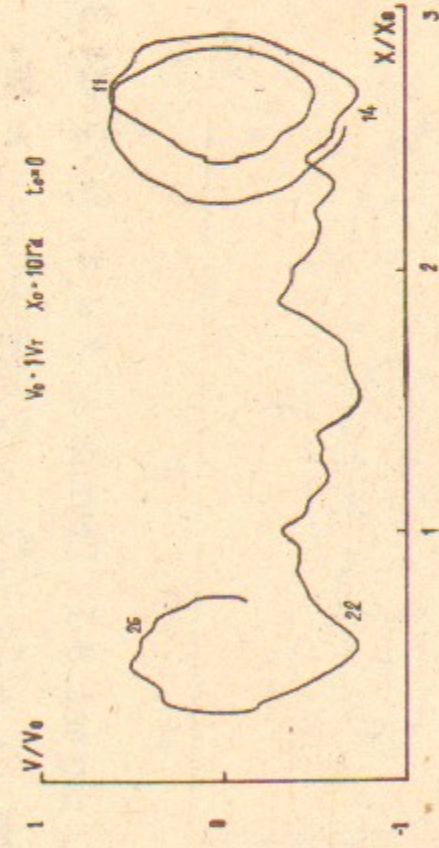


Рис. 36а. Случай 3-1. Группа 2; $N = 6$, $X_0/r_d = 14,3$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $t_0 = 0$.

84

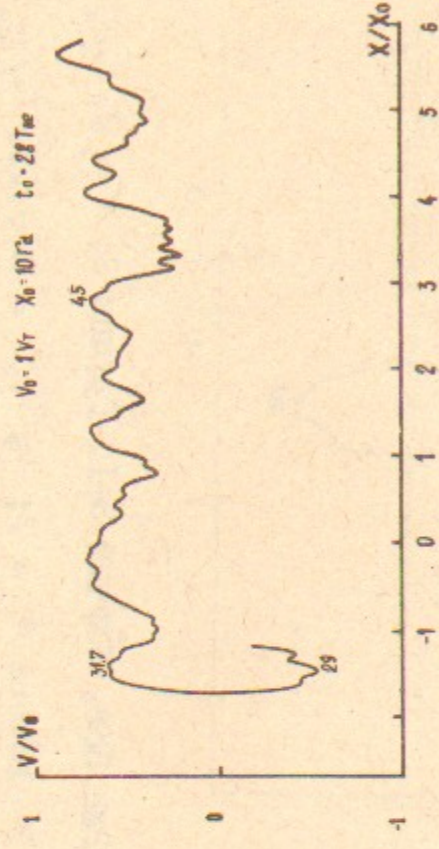


Рис. 36б. Случай 3-1. Группа 2; $N = 6$, $X_0/r_d = 14,3$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 28$.

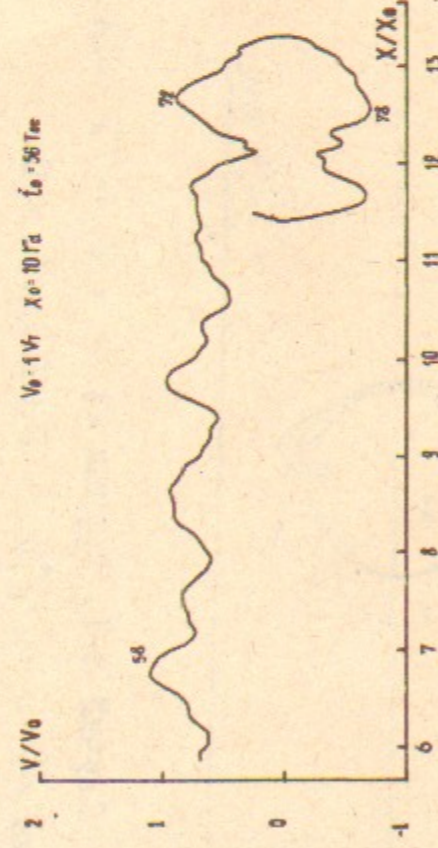
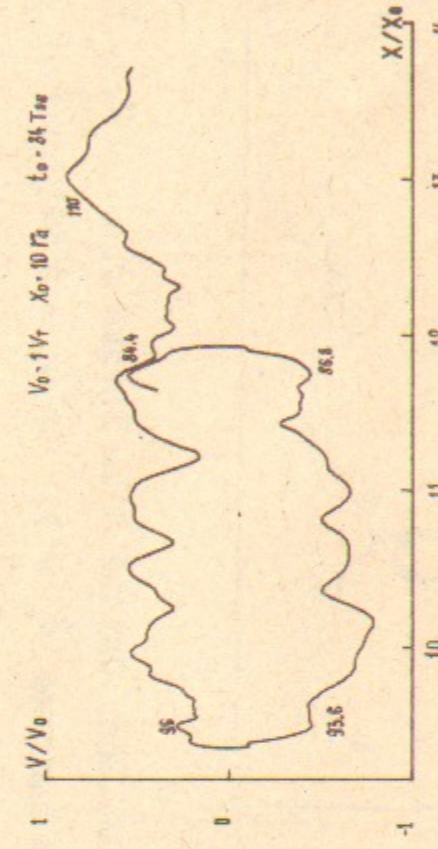


Рис. 36в. Случай 3-1. Группа 2; $N = 6$, $X_0/r_d = 14,3$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 56$.



В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 84$.

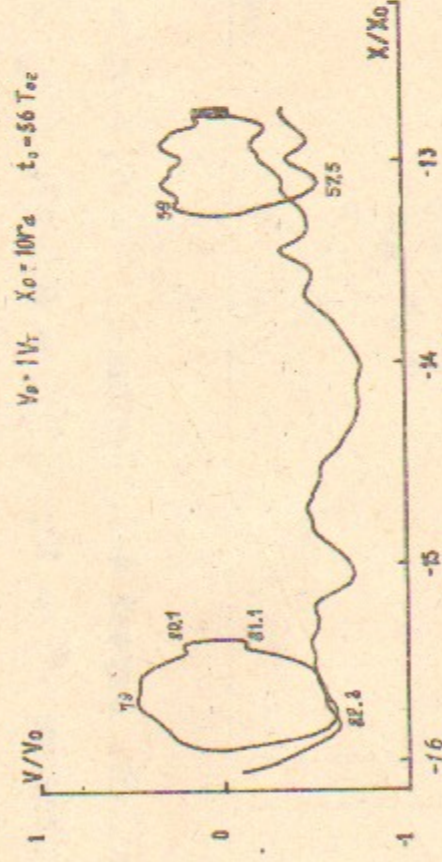


Рис. 37а. Случай 3-1. Группа 2; $N = 1$, $X_0/r_d = 14,3$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 56$.

85

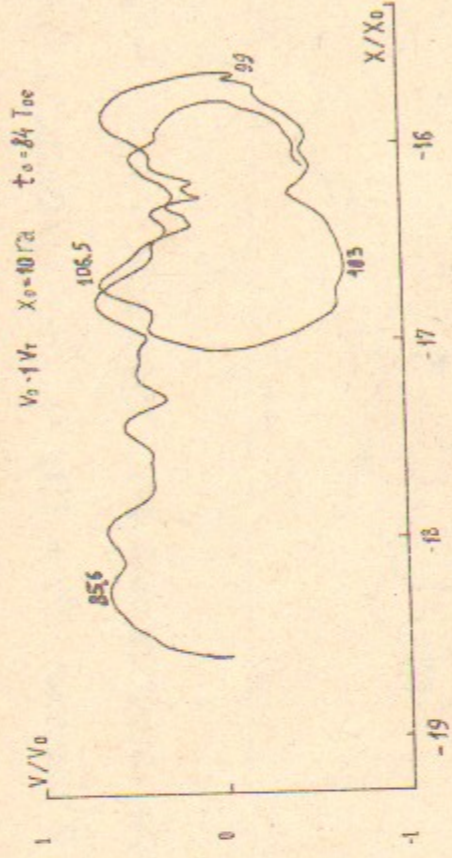


Рис. 37б. Случай 3-1. Группа 2; $N = 1$, $X_0/r_d = 14,3$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 84$.

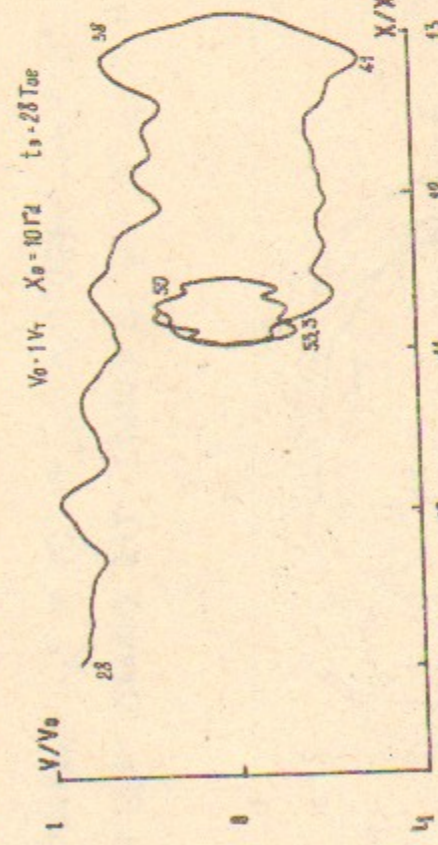
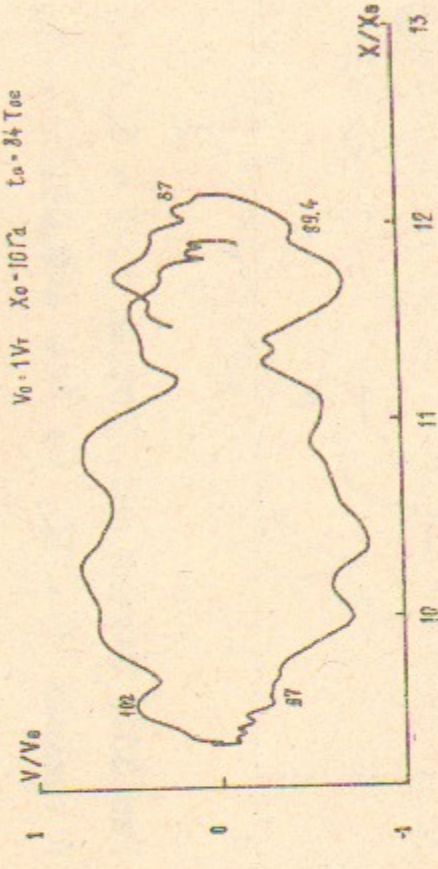


Рис. 37в. Случай 3-1. Группа 2; $N = 1$, $X_0/r_d = 14,3$. В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 28$.



В системе $N_i = 7$; $V_\phi^N/V_T = 0,0915$. $t_0/T_{oe} = 84$.

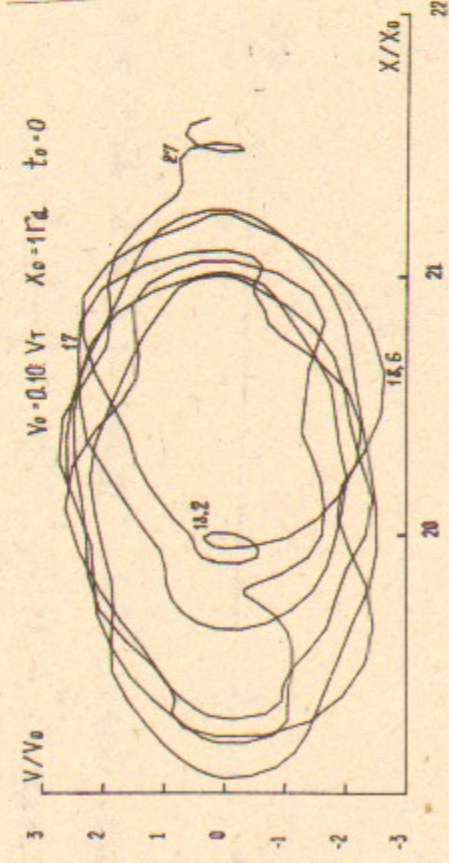


Рис.38а. Случай 4-1. Группа 2; $N = 5$, $X_0/r_d = 20$. Рис.38б. Случай 4-1. Группа 2; $N = 5$, $X_0/r_d = 20$.
 В системе $N_i = 10$, $V_\phi^N/V_T = 0,0847$, $t_0 = 0$.

86

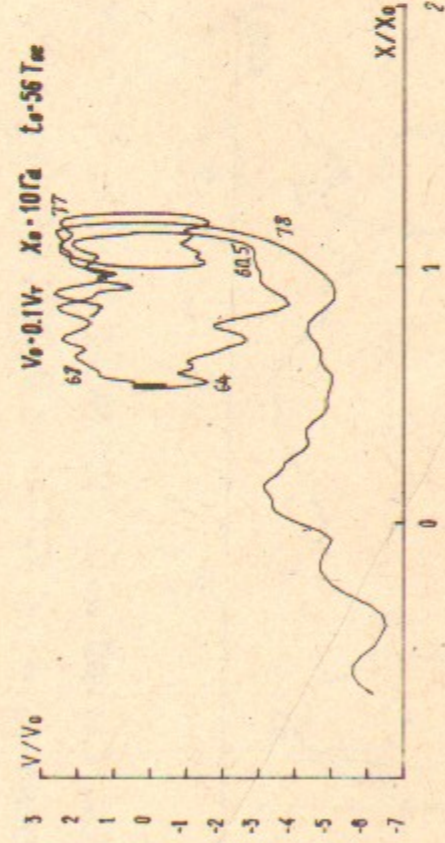


Рис.38в. Случай 4-1. Группа 1; $N = 5$, $X_0/r_d = 20$. Рис.38г. Случай 4-1. Группа 2; $N = 5$, $X_0/r_d = 20$.
 В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$, $t_0/T_{oe} = 56$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$, $t_0/T_{oe} = 84$.

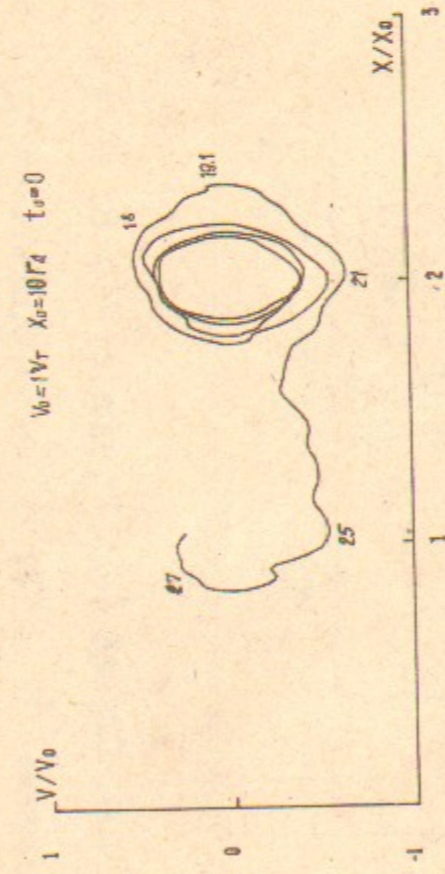
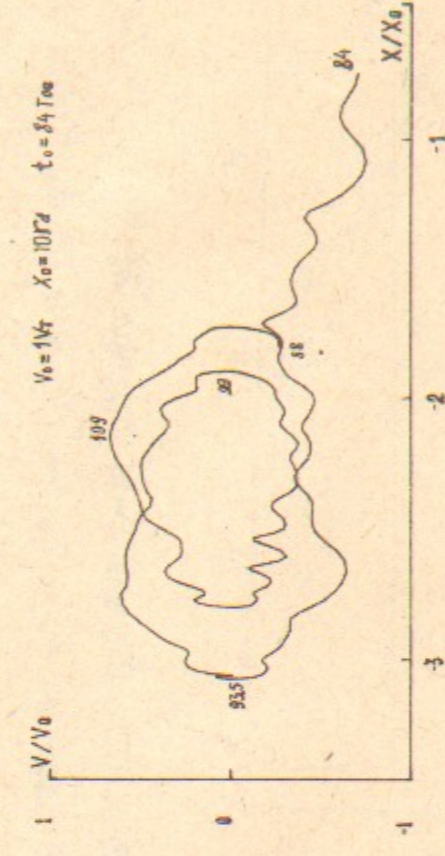
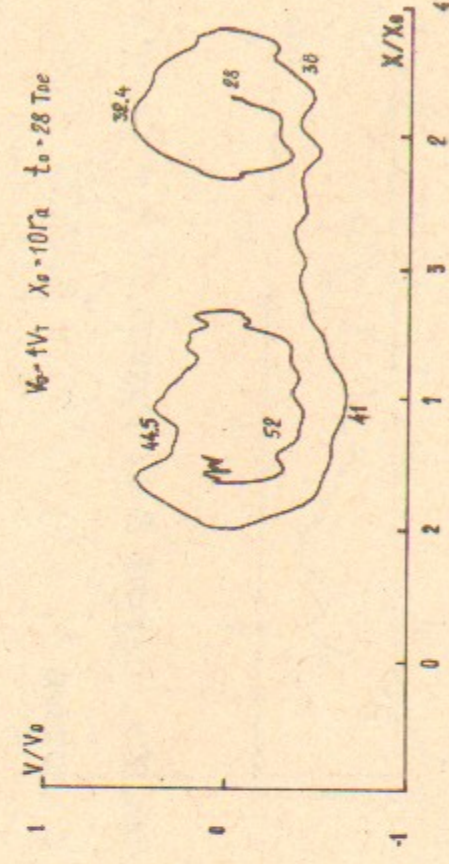


Рис.39а. Случай 4-1. Группа 2; $N = 9$, $X_0/r_d = 20$. Рис.39б. Случай 4-1. Группа 2; $N = 9$, $X_0/r_d = 20$.
 В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$, $t_0 = 0$.

87

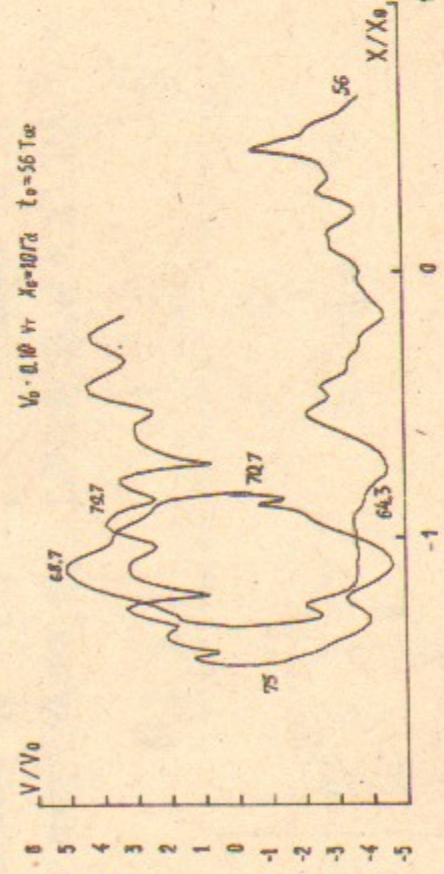
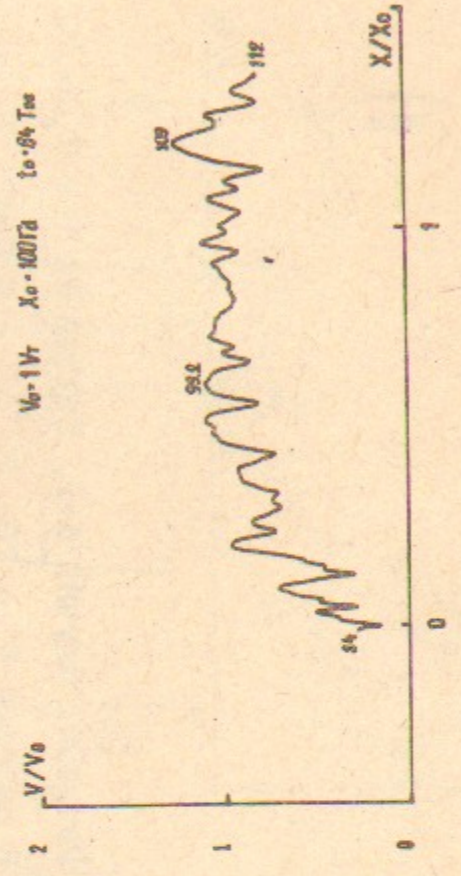
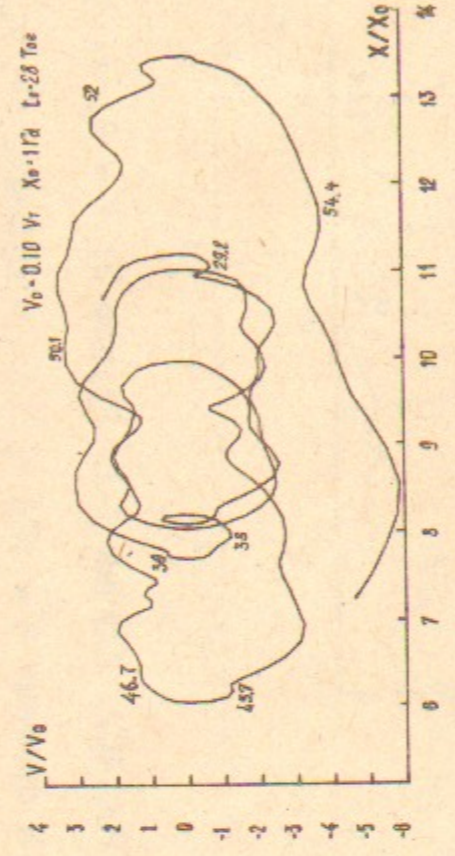


Рис.39в. Случай 4-1. Группа 2; $N = 9$, $X_0/r_d = 20$. Рис.39г. Случай 4-1. Группа 2; $N = 9$, $X_0/r_d = 20$.
 В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$, $t_0/T_{oe} = 56$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$, $t_0/T_{oe} = 84$.



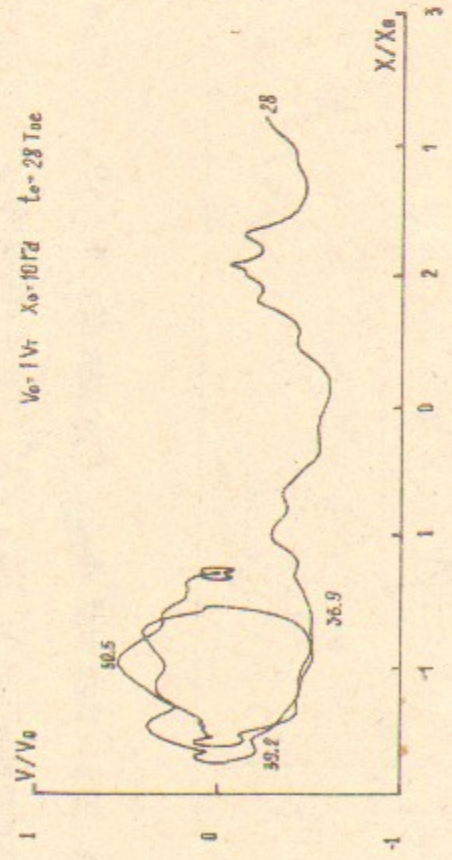


Рис.40а. Случай 4-1. Группа 2; $N = 7$, $\chi_0/r_d = 20$. Рис.40б. Случай 4-1. Группа 2; $N = 7$, $\chi_0/r_d = 20$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$. $t_0/T_{oe} = 28$.

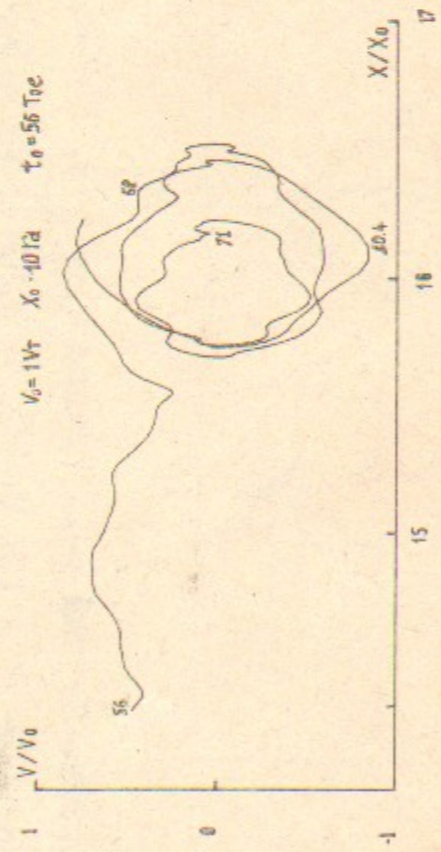
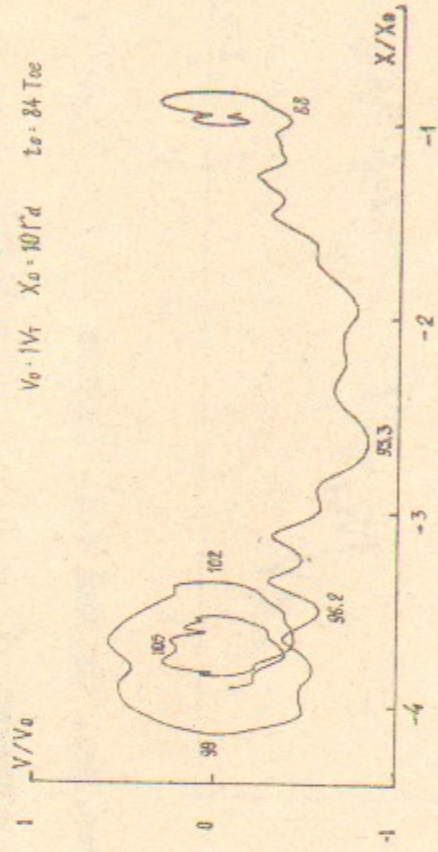


Рис.40в. Случай 4-1. Группа 2; $N = 8$, $\chi_0/r_d = 20$. Рис.40г. Случай 4-1. Группа 2; $N = 8$, $\chi_0/r_d = 20$. В системе $N_i = 10$; $V_\phi^N/V_T = 0,0847$. $t_0/T_{oe} = 56$.

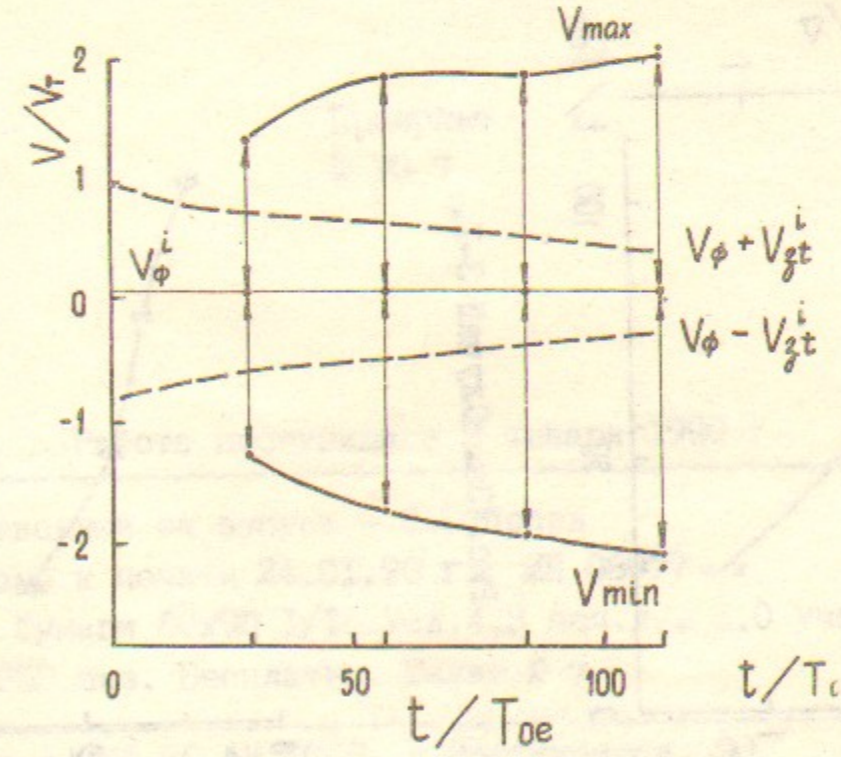
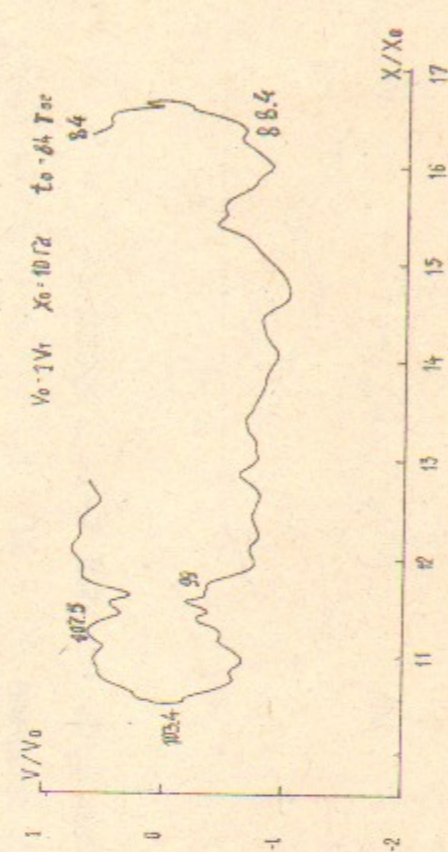


Рис.42. Случай 4-1.

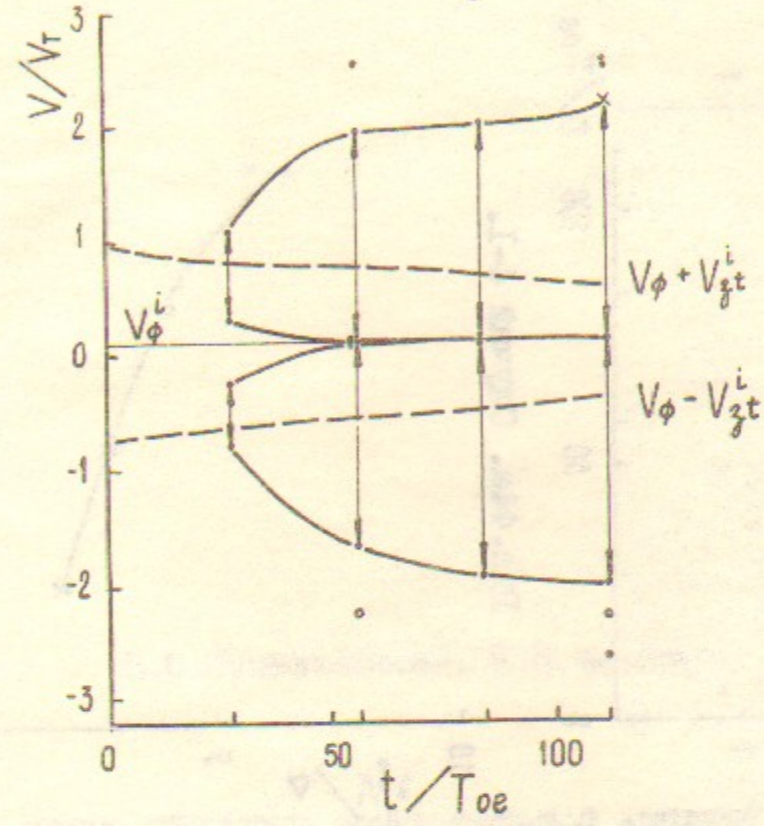


Рис.41. Случай 3-1.

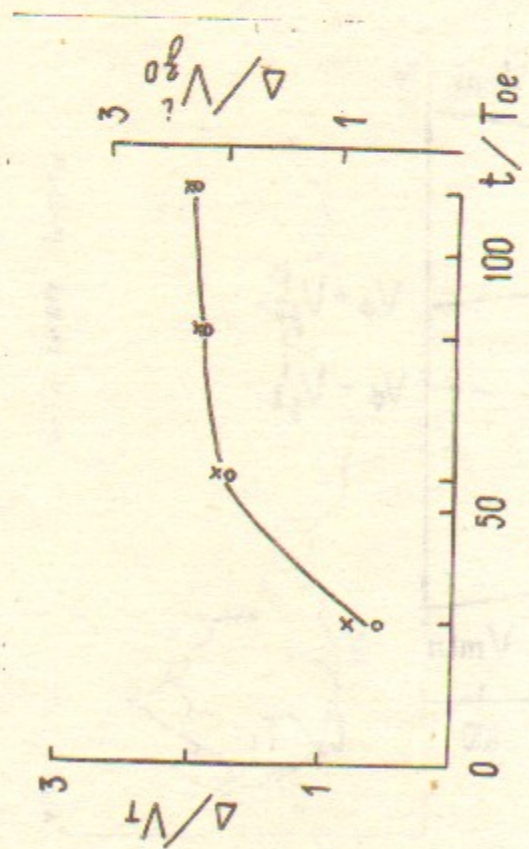


Рис.43а. Случай 3-1.

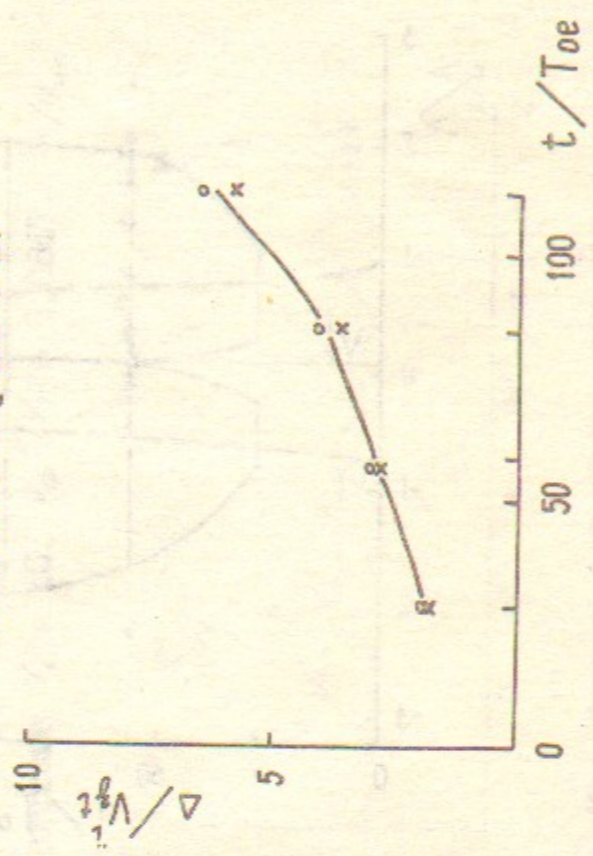


Рис.44а. Случай 4-1.

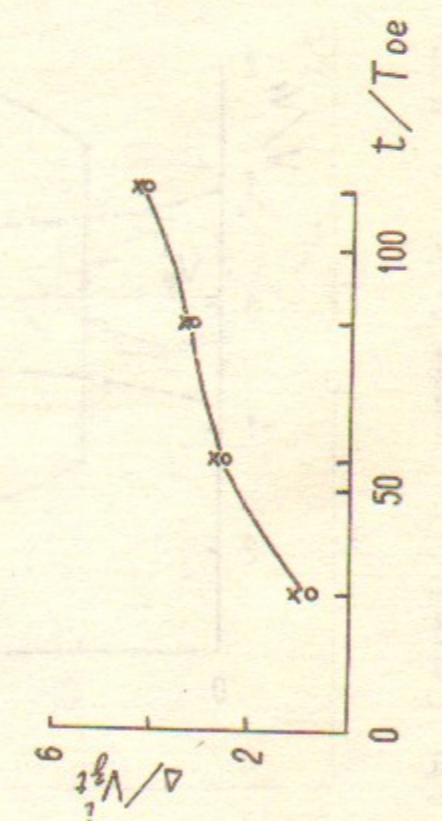


Рис.43б. Случай 3-1.

Рис.44б. Случай 4-1.

Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин

ИОННО-ЗВУКОВЫЕ ВОЛНЫ БОЛЬШОЙ АМПЛИТУДЫ.
СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ. I.

Препринт
№ 90-7

Работа поступила - 8 января 1990 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов
Подписано к печати 24.01.90 г. МН 08077
Формат бумаги 60x90 I/16 Усл.4,3 печ.л., 3,0 учетно-изд.л.
Тираж 250 экз. Бесплатно. Заказ № 7

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90