

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ВОЛНЫ.
СОЛИТОНЫ И СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ.

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 эффектов при развитии неустойчивости ленгмюровской волны малой амплитуды $E_0^2/8\pi nT < k_0 r_d$, $E_0^2/8\pi nT > \frac{m}{M} > (k_0 r_d)^2$. Рассматривается стоячая одномерная ленгмюровская волна с параметрами $E_0^2/8\pi nT = 4 \cdot 10^{-2}$; $\lambda/r_d = 100$; $V_\phi/V_T = 16$; $N_e = L/\lambda = 1$. Неустойчивость этой волны (модуляционная неустойчивость и конверсия) приводит к возбуждению ее гармоник и формированию квазистационарных ленгмюровских солитонов /1/.

Показано, что стохастические эффекты проявляются в развитии стохастических слоев на фазовой плоскости около сепаратрис основных гармоник ленгмюровской волны $N_e = 2$ и 4 и в развитии сильной стохастической неустойчивости в районе пересекающихся областей захвата гармоник $N_e = 4-3$ и $N_e = 4-10$.

INSTABILITY OF A LANGMUIR WAVE.
SOLITONS AND STOCHASTIC PHENOMENA.

N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin

ABSTRACT

The numerical experiments (PIC-method) were made to study the stochastic phenomena by the instability of small amplitude Langmuir wave $E_0^2/8\pi nT < k_0 r_d$, $E_0^2/8\pi nT > \frac{m}{M} > (k_0 r_d)^2$.

One-dimensional, standing Langmuir wave with the parameters $E_0^2/8\pi nT = 4 \cdot 10^{-2}$; $\lambda/r_d = 100$; $V_{ph}/V_T = 16$; $N_e = \lambda/\lambda = 1$ was studied. The instability of this wave (modulational instability and conversion) leads to the excitation of the wave modes and to the formation of quasistationary Langmuir solitons /1/.

The stochastic instability leads to the development of the stochastic layers on the phase plane near the separatrix of the main Langmuir wave modes $N_e = 2$ and 4 and to the development of the large scale stochasticity in the region of the crossing trapping regions of the modes $N_e = 4-3$ and $N_e = 4-10$.

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ВОЛНЫ. СОЛИТОНЫ
И СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ.

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

Ранее нами были проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию неустойчивости одномерных стоячих /1,2/ и бегущих /3-5/ волн с параметрами $E_0^2/8\pi nT > \frac{m}{M} > (k_0 r_d)^2$ в бесстолкновительной максвелловской плазме ($\frac{M}{m} = 10^2$; $T_e/T_i = 30$). Было показано, что при развитии неустойчивости основную роль играют модуляционная неустойчивость и конверсия волны на возмущениях плотности. Модуляционная неустойчивость приводит к модуляции волны и образованию впадин плотности, а в дальнейшем к локализации и концентрации поля во впадинах. В спектральном описании это эквивалентно возбуждению более и более коротковолновых гармоник ленгмюровской волны и ионно-звуковых волн. Конверсия приводит к дополнительной модуляции волны /6/. В спектральном описании конверсия проявляется в возбуждении гармоник ленгмюровской волны прямых $k = k_e + \beta k_i$ и обратных $k = k_e - \beta k_i$ волн ($k = 2\pi/\lambda$; $\beta = 1, 2, 3, \dots$) /6,7/.

Было показано /1,3/, что в области начальных параметров $E_0^2/8\pi nT < k_0 r_d$ развитие неустойчивости приводит к формированию квазистационарных солитонов, амплитуда и форма которых незначительно меняются во времени. В области $E_0^2/8\pi nT > k_0 r_d$ неустойчивость приводит к коллапсу /1,3,4/: энергия поля концентрируется во впадинах плотности, размер области концентрации уменьшается с течением времени, а глубина впадин и плотность энергии растут. Концентрация поля (перекатка энергии в более и более коротковолновые гармоники) продолжается пока не начнется затухание поля. Показано, что затухание поля обусловлено ускорением небольшого числа электронов ($\Delta n/n_0 \sim 10\%$) до скоростей, значительно превышающих тепловую. Был исследован механизм ускорения электронов и затухания поля /2,5/ и показано, что он связан с развитием сильной стохастической неустойчивости движения части электронов. Эта неустойчивость развивается, когда выполнен критерий Чирикова /8/: на фазовой плоскости пересекаются области захвата (точнее, стохастические слои) гармоник модуляционной неустойчивости и конверсии. Странствуя по

областям захвата этих гармоник, некоторые электроны ускоряются до больших скоростей, что и приводит к затуханию поля.

Эффекты такого типа не наблюдались в области начальных параметров $E_0^2/8\pi nT < k_0 r_d$, когда развитие неустойчивости приводит к формированию солитонов. Однако, можно предполагать, что стохастические эффекты будут проявляться и здесь. Действительно, известно, что даже при взаимодействии двух волн развивается стохастическая неустойчивость - в ограниченной области фазового пространства формируется стохастический слой /8-15/. При формировании солитонов возбуждается несколько гармоник, так что можно ожидать развития стохастической неустойчивости и здесь.

Целью настоящей работы является изучение стохастических эффектов в случае стоячих солитонов, развитие которых было описано в работе /1/. Показано, что стохастические эффекты и в этом случае играют роль - стохастическая неустойчивость приводит к формированию стохастических слоев в районе областей захвата основных гармоник модуляционной неустойчивости и конверсии. В ограниченной области фазового пространства - в районе областей захвата некоторых коротковолновых гармоник - с течением времени развивается сильная стохастическая неустойчивость. Однако, в исследованном интервале времени $\sim 200 T_{oe}$ ($T_{oe} = 2\pi/\omega_{oe}$) разные области стохастического движения не пересекаются. Кроме того, в них не попадает заметного числа электронов, так как границы стохастических слоев лежат в области $v > 2v_T$ или $v \gg 2v_T$, так что затухание должно быть малым. В нашей модели функция распределения обрезана на скоростях $v \sim \pm 2v_T$, так что в область стохастического движения электроны вообще не попадают и затухания практически нет.

Нашей главной целью в настоящей работе была задача понять механизм стохастических явлений и тенденции их развития. Данные о границах и ширине стохастических слоев имеют качественный характер, поскольку из-за малой амплитуды основной волны и ее гармоник можно опасаться, что при развитии стохастической неустойчивости некоторую роль могут играть шумы.

Численный эксперимент выполнялся методом частиц в ячейках. Рассматривалась одномерная система длиной $L/r_d = 100$ с перио-

дическими граничными условиями. Для электронов и ионов задавалось максвелловское распределение по скоростям с отношением температур $T_e/T_i = 30$ и отношением масс $M/m = 10^2$. Из-за ограниченности числа счетных частиц ($N^e = N^i = 10^4$) функции распределения электронов и ионов обрезаны на скорости $v \sim \pm 2v_T$ и $v \sim \pm 2v_T^i$ соответственно. Для снижения начального уровня шумов использовался метод "спокойного старта".

Ранее в работе /1/ изучалось развитие неустойчивости стоячей ленгмювской волны. В начальный момент в этой работе задавалась ленгмювская волна с амплитудой $E_0 = 11$ (E нормировано на mr_d/T_{oe}^2); $E_0^2/8\pi nT = 4 \cdot 10^{-2}$; $\lambda/r_d = 100$, $v_\phi/v_T = 16,1$; номер гармоники $N_e = L/\lambda = 1$. Назовем этот случай - случай I-0. Развитие неустойчивости этой волны за $t/T_{oe} \sim 20-30$ приводит к формированию солитонов /1/.

В настоящей работе исследуется развитие стоячих солитонов в течение довольно длительного времени $t/T_{oe} \sim 200$. В начальный момент задается набор гармоник, соответствующий солитонам, которые возбуждаются в случае I-0 /1/ к $t/T_{oe} \sim 30$, когда достигается квазистационарное состояние. В работе /1/ было показано, что в этом случае дальнейшее развитие в течение $t/T_{oe} \sim 30-60$ практически не отличается от случая I-0.

В начальный момент времени в случае I-1 задаются стоячие волны $N_e = 1$ и 2 и бегущие ионно-звуковые волны $N_i = 1; 2$ и 3. В случае I-2 кроме того задается гармоника $N_e = 4$. Отметим, что в случае I-1 гармоника $N_e = 4$ (так же как и более высокие гармоники в случаях I-1 и I-2) возбуждается в результате развития неустойчивости ленгмювской волны. В динамическом описании такой набор гармоник соответствует солитонам с распределением поля и плотности, показанным на Рис.1. Параметры гармоник приведены в таблице I. Относительные фазы гармоник ленгмювских волн показаны на Рис.2, где представлены области захвата бегущих волн, составляющих стоячую волну (показана полуплоскость $v > 0$). Фаза обратных волн выбрана так, чтобы в $t = 0$ поле было максимально, а возмущение скорости было равно нулю.

Для исследования стохастических эффектов задавались группы пробных частиц ($e = m = 0$, e/m то же, что у электронов) в разных областях фазового пространства в районе областей захвата гармоник $N_e = 1; 2$ и 4 ($v_\phi^N > 0$). Схема расположения

Таблица I.

Начальные параметры.

$N_{e,i}$	I_e	$2e$	$4e^x$	I_i	$2i$	$3i$
λ^N/α	100	50	25	100	50	33,3
V_ϕ^N/V_T	16,088	8,182	4,358	0,0998	0,0992	0,0983
$E^N(e), \tilde{n}^N/n_0(i)$	10,04	3,20	0,51	0,0132	0,00955	0,00525
V_β^N/V_T	2,844	1,134	0,321	0,230	0,195	0,145
$(V_\phi^N + V_\beta^N)/V_T$	18,932	9,317	4,678	0,329	0,294	0,243
$(V_\phi^N - V_\beta^N)/V_T$	13,244	7,048	4,037	-0,129	-0,095	-0,047
T_B^N/T_{0e}	11,2	14,0	24,8	139	82	73

 x - случай I-2. e, i - ленгмювская или ионно-звуковая волна; $2E^N$ - амплитуда стоячей волны; \tilde{n}^N - амплитуда ионно-звуковой волны; E^N нормировано на $m\Gamma_d/T_{0e}^2$; $V_\beta^N = 2\sqrt{e\phi^N}/m$; $T_B^N = \frac{2\lambda^N}{V_\beta^N}$

пробных частиц показана на Рис.3а-в, начальные координаты x_0 и скорости v_0 приведены в таблице 2 и 3. В районе области захвата $N_e = 1$ задана одна группа I с x_0, v_0 внутри области захвата. В районе $N_e = 2$ заданы группа I с x_0, v_0 внутри области захвата $N_e = 2$, группы 2 и 3 с x_0, v_0 вне области захвата, а также группы 4 и 5 с x_0, v_0 в узле сепаратрисы с $v_0 > 0$ и $v_0 < 0$. В районе $N_e = 4$ в случае I-I задаются группы 2 и 3 с x_0, v_0 в узле сепаратрисы (гармоника $N_e = 4$ в этом случае возбуждается в результате развития неустойчивости основной волны). В случае I-2, когда $N_e = 4$ задана в $t = 0$, задается группа I с x_0, v_0 внутри области захвата. Она подразделяется на группы частиц, близких к центру - группа Ia, или близких к сепаратрисе - группы Ib; Ic.

При исследовании стохастических эффектов изучалось поведение групп пробных частиц с близкими начальными x_0, v_0 на фазовой плоскости и траектории движения частиц на фазовой плоскости подобно тому, как это делалось в предыдущих работах [16, 17]. Изучение траекторий в лабораторной системе или в системе координат той или иной волны (обычно предполагалось $v_\phi = \text{const}$, в некоторых случаях учитывалось изменение $v_\phi^N(t)$) позволило четко различать регулярно движущиеся захваченные или пролетные частицы от частиц, движущихся стохастически (захват - пролет через случайные промежутки времени).

Отметим, что по техническим причинам траектория данной частицы выводится отдельными частями с интервалами времени $\Delta t/T_{0e} \sim 28$ ($t/T_{0e} \sim 0-28; 28-56$ и т.д.). В каждом интервале траектория строится в своих координатах x, v . Начальные для интервала моменты времени t_0 приведены на рисунках траекторий. На траекториях приведены цифры, показывающие момент t/T_{0e} , когда частица имеет данные x и v . Отметим также, что хотя мы используем периодические граничные условия $x'' + \alpha L = x''$ ($\alpha = 1, 2, 3, \dots$), на рисунках траекторий приведена "развернутая" шкала $x = x'' \pm \alpha L$, причем в $t = 0$ координата данной частицы $x = x_0$. В отличие от этого на рисунке распределения поля в разные моменты времени (Рис.4) приведена шкала $x = x''$.

Определялись границы стохастических слоев. Стохастический слой рассматривался как область на фазовой плоскости начальных x_0, v_0 , а также x, v в момент t частиц, движение

Таблица 2.

Начальные координаты пробных частиц в районе области захвата $N_e = I$ и $N_e = 2$.
Случай I-I.

$N_e = 1$. Узлы сепаратрис $x_1/r_d = 0$; $x_2/r_d = 100$; максимум $x_m/r_d = 50$.

$$(V_{\phi}^I + V_{y_0}^I)/V_T = 18,932; (V_{\phi}^I - V_{y_0}^I)/V_T = 13,244; V_{\phi}^I/V_T = 16,088.$$

$N_e = 2$. Узлы сепаратрис $x_1/r_d = 0$; $x_2/r_d = 50$; максимум $x_m/r_d = 25$.

$$(V_{\phi}^I + V_{y_0}^I)/V_T = 9,317; (V_{\phi}^I - V_{y_0}^I)/V_T = 7,048; V_{\phi}^I/V_T = 8,182.$$

N_e	Группа	Δn	x_0/r_d	V_0/V_T	$1. (V_0 - V_{\phi}^N)/V_{y_0}^N$	$2. (V_0 - V_{\phi}^N)/V_{y_0}^N$	x	Δn	x_0/r_d	V_0/V_T	$1. (V_0 - V_{\phi}^N)/V_{y_0}^N$	$2. (V_0 - V_{\phi}^N)/V_{y_0}^N$	x
I	I	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
I	I	1	1	2	2	2	2	3	4	4	4	5	5
30	30	60	60	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15
50	50	25	25	25	25	25	25	25	50	50	50	50	50
		18,78+13,53	9,317+7,048	10,45+9,43	6,93+5,91	9,55+8,21	8,117+6,875						
		0,95+-0,90	1,0+-1,0	2,0+1,1	-1,1+-2,0	1,2+0,03	-0,06+-1,15						
	I-7	2-6	1	7	8; 9 ^x	10 ^x ; 11							
		0,95+-0,84	0,97+-0,97	1,1	-1,1	0,78; 0,11	-0,14; -0,90						

x - Случай I-2.

Δn - число частиц в группе; V_0 - невозмущенная начальная скорость; $V_{y_0}^N = 2\sqrt{\epsilon y_0^N}$;

N - номер траектории.

1. - для частиц в группе;

2. - для частиц с траекториями.

Таблица 3.

Начальные координаты пробных частиц в районе области захвата $N_e = 4$. Случай I-2.

$N_e = 4$. Узлы сепаратрис $x_1/r_d = 25$; $x_2/r_d = 50$; максимум $x_m/r_d = 37,5$.

$$(V_{\phi}^{IV} + V_{y_0}^{IV})/V_T = 4,678; (V_{\phi}^{IV} - V_{y_0}^{IV})/V_T = 4,037; V_{\phi}^{IV}/V_T = 4,358.$$

Группа	I	Ia	Ib	Ic	2	3
Δn	90	70	10	10	10	10
x_0/r_d	37,5	37,5	37,5	37,5	50	50
V_0/V_T	4,670+4,044	4,581+4,122	4,670+4,598	4,116+4,044	4,647+4,361	4,329+4,043
1. $(V_0 - V_{\phi}^{IV})/V_{y_0}^{IV}$	0,97+-0,98	0,69+-0,73	0,97+0,75	-0,75+-0,98	0,90+0,01	-0,09+-0,98
N	I-7	2-6	I	7	8 ^x	9 ^x
2. $(V_0 - V_{\phi}^{IV})/V_{y_0}^{IV}$	0,83+-0,80	0,55+-0,55	0,83	-0,80	0,41	-0,58

x - Случай I-I.

Δn - число частиц в группе; V_0 - невозмущенная начальная скорость; $V_{y_0}^{IV} = 2\sqrt{\epsilon y_0^{IV}}$;

N - номер траектории.

1. - для частиц в группе;

2. - для частиц с траекториями.

которых имеет стохастический характер. Полные границы слоев $V_0(x_0)$ не определялись. Определялись отдельные точки на этой кривой — верхние и нижние границы V_0 (внутренние и внешние относительно соответствующей области захвата) в максимуме сепаратрисы $x_0 = x_m$ и в узле $x_0 = x_1$. В некоторых случаях внешние границы слоя определялись по максимальной V_{max} и минимальной V_{min} в данный момент t скорости частиц, движущихся стохастически.

На Рис.4 показано распределение поля $E(x)$ в разные моменты времени до $t/T_{oe} \sim 200$. Видно, что солитоны сохраняются, хотя форма их несколько меняется во времени — энергия то перекачивается в один из солитонов, то вновь распределяется примерно равномерно. Возможной причиной этого является возбуждение и периодическое изменение во времени гармоник конверсии, амплитуда которых в отсутствие затухания меняется как функция Бесселя порядка β $E_\beta^N/E_0 = J_\beta(\frac{1}{2} \frac{\tilde{n}}{n_0} \omega_{oe} t)$, $\beta = 1, 2, 3, \dots$ /6,7/.

В рассматриваемом случае можно ожидать возбуждения довольно широкого спектра гармоник конверсии. Так прямая волна $N_e = 1$ на возмущении плотности $N_i = 1$ дает гармоники конверсии $N_e + \beta N_i = 2; 3; 4, \dots$ и $N_e - \beta N_i = -(1; 2; 3, \dots)$ обратная волна — гармоники $N_e + \beta N_i = 1; 2; 3, \dots$ и $N_e - \beta N_i = -(2; 3; 4, \dots)$. Действительно, анализ спектров E^N в разные t показывает, что помимо основных гармоник модуляционной неустойчивости $N_e = 2; 4; 8, \dots$ возбуждаются также гармоники $N_e = 3; 5; 6, \dots$. Гармоники конверсии так же как и гармоники модуляционной неустойчивости должны быть стоячими волнами. Анализ изменения амплитуды E^N в течение периода T_{oe} в разные t показывает, что для гармоник $N_e \sim 1-10$ E^N в течение T_{oe} меняется периодически вплоть до $t/T_{oe} \sim 200$, свидетельствуя, что эти гармоники являются стоячими волнами. Амплитуда гармоник $N_e \approx 15$ в течение T_{oe} меняется случайным образом, показывая, что эти гармоники имеют шумовой характер.

Основную опасность в настоящей работе представляют шумы. Из Рис.4 видно, что шумы, проявляющиеся в изрезанности $E(x)$, нарастают уже к $t/T_{oe} \sim 30-50$. Амплитуда шумовых пиков достигает 20-30% амплитуды солитона. Ширина шумовых пиков свидетель-

ствует о возбуждении коротковолновых гармоник $N_e > 15-20$, что соответствует результатам анализа спектров. Сильно изрезано также распределение плотности $\tilde{n}(x)$. Здесь амплитуда шумов сравнима с амплитудой начальной $\tilde{n}(x)$. Ширина шумовых пиков свидетельствует о возбуждении коротковолновых гармоник $N_i > 20-25$. Можно надеяться, что коротковолновые шумы не скажутся существенно на движении частиц с достаточно большими скоростями в районе областей захвата гармоник $N_e = 1; 2; 4$. Ниже мы приведем некоторые данные, свидетельствующие о том, что шумы не играют особенной роли при развитии стохастических эффектов в районе областей захвата гармоник $N_e = 1; 2; 4$. Однако, значительный уровень шумов все-таки вызывает некоторые сомнения в результатах, так что их следует расценивать как имеющие качественный характер.

Коротковолновые шумы заведомо должны влиять на движение частиц в районе областей захвата гармоник ионно-звуковой волны $N_i = 1, 2, 3$ с малыми V_ϕ^i . Действительно, анализ поведения группы пробных частиц и траекторий частиц с x_0, v_0 внутри области захвата $N_i = 1$ и 2 показывает, что практически все частицы выходят из захвата к $t/T_{oe} \sim 30-40$, когда нарастают шумы. В дальнейшем наблюдается перемешивание частиц по энергии, диффузия частиц на фазовой плоскости, причем часть частиц с малыми $v_0/v_T < 0,1-0,3$ ускоряется до $v/v_T \sim \pm 2$. Для проверки является ли это физическим эффектом или обусловлено шумами, рассматривался случай 1-3. В случае 1-3 в плазме с неподвижными ионами задавалась одна стоячая волна $N_e = 1$ с параметрами случая 1-1, но не задавались другие гармоники N_e и ионно-звуковые волны. Изучалась та же группа пробных, что и в случае 1-1. Известно /13-16/, что в стоячей волне малой амплитуды стохастические явления наблюдаются только в районе сепаратрис прямой и обратной волны. В области малых $v \ll v_\phi$ движение электронов должно быть регулярным. Оказывается, что в случае 1-3 события развиваются так же, как и в случае 1-1 — наблюдается диффузия частиц на фазовой плоскости, ускорение до $v/v_T \sim \pm 2$, перемешивание по энергии. Поскольку шумы в случаях 1-3 и 1-1 практически одинаковы, очевидно, что наблюдаемые эффекты определяются шумами.

Стохастическая неустойчивость движения электронов в стоячей волне малой амплитуды приводит к формированию стохастичес-

кого слоя в районе сепаратрис прямой и обратной волны /I3-I6/. Оценить ширину слоя для стоячих волн с параметрами наших гармоник $N_e = 1, 2, 4$ можно, экстраполируя кривую, построенную по результатам численных экспериментов для волн большей амплитуды /I4-I6/ (отметим, что результаты наших численных экспериментов /I6/ совпадают с результатами /I4, I5/). Такая экстраполяция дает

N_e	I	2	4
Δ_1/V_3^N	$1,4 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$
Δ_2/V_3^N	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-3}$

Δ_1, Δ_2 - ширина верхнего и нижнего стохастического слоя для прямой волны с $V_\phi^N > 0$.

Видно, что ширина слоя, обусловленного стоячей волной, для всех гармоник очень мала. В случаях I-1, I-2, когда одновременно возбуждено несколько гармоник с более близкими V_ϕ^N ($V_\phi^I, V_\phi^{II}, V_\phi^{IV}$), чем в стоячей волне (V_ϕ^N и $-V_\phi^N$), можно ожидать, что ширина слоя будет возрастать, причем чем меньше ΔV_ϕ^N , тем большую ширину слоя можно ожидать.

Для исследования стохастических эффектов изучалось движение пробных частиц с x_0, v_0 в районе областей захвата гармоник $N_e = 1$ (случай I-1), $N_e = 2$ (случай I-1), $N_e = 4$ (случай I-1 и I-2).

$N_e = 1$. Исследование движения пробных частиц группы I с x_0, v_0 внутри области захвата $N_e = 1$ показывает, что все частицы группы остаются захваченными до $t/T_{oe} \sim 200$, включая частицы с v_0 , близкими к сепаратрисе. Типичная траектория захваченной гармоникой $N_e = 1$ частицы показана на Рис.5 (учтено небольшое изменение фазовой скорости V_ϕ^I).

То, что мы не обнаружили траекторий стохастического характера, свидетельствующих об образовании стохастического слоя стоячей волны $N_e = 1$, не вызывает удивления, так как мы не ставили целью обнаружение тонких стохастических эффектов. В частности v_0 крайних в группе I частиц отстоят от сепаратрисы на $\Delta v/V_3^I \sim (5-10) \cdot 10^{-2} \gg \Delta_{1,2}/V_3^I \sim (1-2) \cdot 10^{-2}$, так что мы и не должны видеть траектории стохастического характера. Нам больше интересовало, не дадут ли шумы какого-то грубого стохастического эффекта. Полученный результат показывает, что та-

кого эффекта нет, так что шумы не оказывают существенного влияния на движение частиц в этой области фазового пространства.

$N_e = 2$. Анализ движения на фазовой плоскости пробных частиц группы I с x_0, v_0 внутри области захвата $N_e = 2$ показывает, что до $t/T_{oe} \sim 200$ сохраняется компактная группа. Значительная часть частиц, в том числе некоторые частицы с v_0 , близкими к сепаратрисе, остается захваченной в течение $t/T_{oe} \sim 200$. Характерная траектория захваченной частицы $N = 6$ с v_0 , близкой к сепаратрисе, показана на Рис.6. Отметим, что V_ϕ^{II} несколько меняется в $t/T_{oe} \sim 0-112$, а позже остается постоянной

t/T_{oe}	0-28	28-56	56-84	84-112	112-196
V_ϕ^{II}/V_T	8,150	8,125	8,109	8,087	8,087

(V_ϕ^{II} подбиралась так, чтобы траектория захваченной частицы $N = 6$ оставалась в своей длине волны). Существование захваченных частиц, подобных частице $N = 6$, позволяет сделать вывод, что и в этой области фазового пространства шумы не играют существенной роли.

Некоторые частицы из группы I, например; частица $N = 2$ Рис.7, выходят из захвата. Траектории частиц, вышедших из захвата, имеют вид, характерный для частиц, движущихся стохастически. Эти частицы то захватываются, то выходят из захвата и становятся пролетными через случайные промежутки времени, траектории частиц с близкими x_0, v_0 различаются и расходятся на фазовой плоскости /I6, I7/. Характерный пример представляет частица $N = 2$ Рис.7. Эта частица выходит из захвата уже к $t/T_{oe} \sim 5-6$ и становится пролетной (Рис.7а), в $t/T_{oe} \approx 70$ она снова захватывается (Рис.7б), в $t/T_{oe} \approx 95$ выходит из захвата с $v > V_\phi^{II}$, в $t/T_{oe} \approx 110$ захватывается в соседнюю длину волны (Рис.7в,г), а в $t/T_{oe} \approx 135$ выходит из захвата с $v < V_\phi^{II}$ и остается пролетной.

С течением времени число частиц группы I, вышедших из захвата и участвующих в стохастическом движении, возрастает, но остается небольшим (Рис.8а). Вышедшие из захвата частицы с близкими начальными координатами раскидываются по фазовой плоскости.

Частицы групп 2-5 с x_0, v_0 вне области захвата $N_e = 2$ в основном движутся как пролетные, но движение некоторых из них

приобретает стохастический характер — траектория частицы пересекает фазовую скорость V_{ϕ}^{II} , в дальнейшем частица то захватывается, то становится пролетной. Характерным примером являются частицы $N = 7$ из группы 3 (Рис.9) и $N = 9$ из группы 4 в узле сепаратрисы (Рис.10). Частица $N = 7$ с $X_0 = X_m$ и $V_0 < (V_{\phi}^{\text{II}} - V_{\beta}^{\text{II}})$ сначала пролетная, затем в $t/T_{oe} \approx 12$ захватывается в соседнюю длину волны (Рис.9а,б), остается захваченной до $t/T_{oe} \approx 140$ (Рис.9в), а затем выходит из захвата с $V > V_{\phi}^{\text{II}}$ и становится пролетной (Рис.9г). Частица $N = 9$ с $X_0 = X_2$ и $V_0 > V_{\phi}^{\text{II}}$ вначале пролетная (Рис.10а), в $t/T_{oe} \approx 30$ захватывается (Рис.10б), в $t/T_{oe} \approx 56$ выходит из захвата с $V > V_{\phi}^{\text{II}}$ и становится пролетной, а в $t/T_{oe} \approx 80$ вновь захватывается (Рис.10в,г) и остается захваченной до $t/T_{oe} \sim 200$.

В стохастическом движении участвует всего одна частица ($\Delta n/n_0 = 0,1$) из группы 2 и две частицы ($\Delta n/n_0 = 0,2$) из группы 3, но заметное число частиц из групп 4 и 5. Число этих частиц возрастает со временем, что видно из Рис.8б,в.

Оказывается, что начальные X_0, V_0 частиц из групп 1,2 и 3, движущихся стохастически, лежат вблизи сепаратрисы, а X_0, V_0 частиц из групп 4 и 5 — вблизи V_{ϕ}^{II} . Таким образом существует область начальных координат в фазовом пространстве, в которой движение частиц является стохастическим, так что в районе сепаратрисы $N_e = 2$ формируется стохастический слой.

Границы стохастического слоя определялись таким же способом, как в работах /16,17/. Для определения границ слоя в узле сепаратрисы определялись предельные V_0 частиц, траектории которых к данному моменту времени пересекают V_{ϕ}^{II} в группе 4 (верхняя граница) и в группе 5 (нижняя граница). Развитие стохастического слоя в узле можно видеть по Рис.11, где показана зависимость от времени верхней и нижней границы слоя, а также по Рис.12а,б, где показана зависимость от времени ширины слоя Δ/V_T и $\Delta/V_{\beta}^{\text{II}}$ (Δ_1, Δ_2 — ширина верхнего и нижнего слоя).

Для определения внутренних границ слоя в максимуме сепаратрисы на $X_0 = X_m$ определялись предельные V_0 частиц группы 1, вышедших из захвата к данному моменту t . Для определения внешних границ определялись предельные V_0 частиц, траектории которых пересекают V_{ϕ}^{II} в группе 2 (верхняя граница) и в группе 3 (нижняя граница). На Рис.13 приведены кривые $V_{\phi}^{\text{II}} + V_{\beta}^{\text{II}}$ и $V_{\phi}^{\text{II}} - V_{\beta}^{\text{II}}$ в зависимости от времени и показаны внутренние и

внешние границы стохастического слоя на $X_0 = X_m$. Видно, что слой сосредоточен вблизи сепаратрисы.

Как было показано в работе /17/, внешние границы стохастического слоя можно определять также по $V_{\text{max}}, V_{\text{min}}$ частиц, движущихся стохастически, поскольку траектории этих частиц лежат в пределах стохастического слоя. На Рис.14 приведены кривые $V_{\phi}^{\text{II}} + V_{\beta}^{\text{II}}$ и $V_{\phi}^{\text{II}} - V_{\beta}^{\text{II}}$ и показаны $V_{\text{max}}, V_{\text{min}}$ частиц группы 1, вышедших из захвата, и частиц групп 4 и 5, траектории которых пересекали V_{ϕ}^{II} . Сравнение Рис.13 и 14 показывает, что $V_{\text{max}}, V_{\text{min}}$ лежат в пределах или вблизи границ стохастического слоя, определенных по предельным V_0 , так что внешние границы, определенные разными способами, согласуются.

Ширина стохастического слоя на $X_0 = X_m$ возрастает с течением времени (Рис.15а,б), но даже в $t/T_{oe} \sim 200$ слой занимает незначительную часть области захвата. Это хорошо видно из Рис.13-15 и из Рис.16а-г, где показаны области захвата $N_e = 2$ в разные моменты времени. На Рис.16 отмечены внутренние и внешние границы слоя на $X = X_m$ и в узлах, пунктиром показаны внешние границы слоя, стрелкой — ширина слоя на $X = X_m$.

На Рис.11 и 14 показаны точки случая I-I, а также случая I-0. Напомним, что в случае I-0 в $t = 0$ задается только стоячая волна $N_e = 1$, а ее гармоники и гармоники ионно-звуковой волны развиваются в результате неустойчивости волны $N_e = 1$. Из Рис.11,14 видно, что ширина слоя в узле несколько больше в случае I-0, но сравнима со случаем I-I, а $V_{\text{max}}, V_{\text{min}}$ в случаях I-0 и I-I близки. Это показывает, что стохастические эффекты в обоих случаях развиваются примерно одинаково, так что результаты, полученные в случае I-I, можно относить и к случаю I-0. Напомним, что ранее /1/ было показано, что развитие солитона в случаях I-0 и I-I примерно одинаково.

$N_e = 4$. Эта область фазового пространства исследовалась в случае I-I, когда гармоника $N_e = 4$ в $t = 0$ не задана, но возбуждается при развитии модуляционной неустойчивости и конверсии, и в случае I-2, когда $N_e = 4$ задана в $t = 0$. Было проверено, что изменение амплитуды $N_e = 4$ во времени в случаях I-I и I-2 различается незначительно. В случае I-I задавались группы пробных частиц 2 и 3, в случае I-2 — группа 1.

Недостатком случая I-2 является то, что фаза волны несколько сбивается в $t/T_{oe} \sim 15-25$, повидимому, из-за развития гар-

моники конверсии $N_e = 4$. В результате значительная часть частиц группы I (примерно половина группы Ia с $v_0 > v_{\phi}^{IV}$), оказавшихся в это время вблизи границы захвата, выходит из захвата. Однако, остальные частицы группы I продолжают двигаться как захваченные и начинают выходить из захвата значительно позже. Так частица $N = 7$ из группы Ic (Рис.17) выходит из захвата в $t/T_{oe} \approx 85$, а частица $N = 1$ из группы Ib (Рис.18) - в $t/T_{oe} \approx 120$. Траектории частиц, вышедших из захвата, указывают на стохастический характер их движения. Так частица $N = 7$, совершив $\sim 2,5$ оборота, выходит из захвата в $t/T_{oe} \approx 85$ (на Рис.17а показана последняя половина оборота) и становится пролетной с $v < v_{\phi}^{IV}$, опять захватывается в $t/T_{oe} \approx 110$ (Рис.17б), совершив примерно один оборот, выходит из захвата и вновь захватывается в соседнюю длину волны (Рис.17б,в), где остается захваченной до $t/T_{oe} \sim 200$ (Рис.17г). Частица $N = 1$ захвачена до $t/T_{oe} \sim 120$. За это время она совершает около четырех оборотов (на Рис.18а показан примерно один оборот в $t/T_{oe} \sim 28-56$). В $t/T_{oe} \approx 120-130$ частица $N = 1$ становится пролетной с $v < v_{\phi}^{IV}$ (Рис.18б) и в дальнейшем то захватывается ($t/T_{oe} \sim 145-160$ Рис.18в; $t/T_{oe} \sim 170-185$ Рис.18г), то становится пролетной (Рис.18в,г).

С течением времени число частиц вышедших из захвата и участвующих в стохастическом движении, растет (Рис.19а). К $t/T_{oe} \approx 80$ выходит из захвата большая часть частиц группы I.

Частицы групп 2 и 3 с x_0, v_0 вне области захвата $N_e = 4$ вначале движутся как пролетные, но с течением времени движение некоторых из них приобретает стохастический характер - траектория частицы пересекает фазовую скорость v_{ϕ}^{IV} , в дальнейшем частица то захватывается, то становится пролетной. Характерным примером является частица $N = 8$ из группы 2 (Рис.20). Эта частица сначала пролетная с $v > v_{\phi}^{IV}$, в $t/T_{oe} \approx 30$ она захватывается, пересекая v_{ϕ}^{IV} , и совершив примерно половину оборота, выходит из захвата в $t/T_{oe} > 50$, становится пролетной с $v < v_{\phi}^{IV}$ (Рис.20а), вновь захватывается в $t/T_{oe} \approx 100$ (Рис.20б), совершив примерно 1,5 оборота, выходит из захвата в 150 (Рис.20в), становится пролетной и вновь захватывается в $t/T_{oe} \approx 180$ (Рис.20г).

Число частиц из групп 2 и 3, пересекающих v_{ϕ}^{IV} и участвующих в стохастическом движении, растет со временем. В $t/T_{oe} > 80$

(группа 3) - 140 (группа 2) большая часть частиц этих групп участвует в стохастическом движении (Рис.19в,г).

Для определения границ стохастического слоя в узле сепаратрисы определялись предельные v_0 частиц, траектории которых к данному моменту времени пересекают v_{ϕ}^{IV} в группе 2 (верхняя граница) или в группе 3 (нижняя граница). Развитие стохастического слоя в узле можно видеть по Рис.21, где показана зависимость от времени верхней и нижней границы слоя, а также по Рис.22а,б, где показана зависимость от времени ширины слоя Δ/V_T и Δ/V_3^{IV} .

Сбой фазы гармоники $N_e = 4$ в случае I-2 не позволяет определить внутренние границы слоя в максимуме сепаратрисы на начальной стадии его развития. Однако из дальнейшего развития группы I видно, что к $t/T_{oe} \approx 80$ подавляющая часть частиц этой группы выходит из захвата, свидетельствуя, что к этому времени слой занимает всю область захвата, так что внутренние границы в $t/T_{oe} \approx 80$ можно положить равными v_{ϕ}^{IV} .

Для определения внутренних границ рассматривался случай I-4. В этом случае в $t = 0$ задавались те же гармоники N_e и N_i , что в случаях I-1 и I-2 и гармоника $N_e = 4$ с параметрами случая I-2, но сдвинутая по фазе на πr_d так, чтобы в $t/T_{oe} \sim 15-25$ не происходило сбоя фазы волны. Задавалась та же группа I пробных частиц, что и в случае I-2, но в другой длине волны - $x_0 = x_m = 76,5 r_d$.

Было найдено, что число частиц, выходящих из захвата в этом случае растет с течением времени (Рис.19б) подобно случаю I-2 (Рис.19а), хотя в случае I-4 выходят из захвата к $t/T_{oe} \sim 30$ частицы и с $v_0 > v_{\phi}^{IV}$ и с $v_0 < v_{\phi}^{IV}$.

Для определения внутренних границ слоя на $x_0 = x_m$ определялись предельные v_0 частиц группы I, вышедших из захвата к данному моменту времени. Эти внутренние границы показаны на Рис.23. Видно, что с течением времени предельные v_0 приближаются к фазовой скорости v_{ϕ}^{IV} и в $t/T_{oe} \sim 80$ становятся равными v_{ϕ}^{IV} . Таким образом, в $t/T_{oe} \approx 80$ слой занимает всю область захвата гармоники $N_e = 4$. Это согласуется с результатом полученным в случае I-2. При определении ширины слоя (Рис.24) до $t/T_{oe} \sim 80$ использовались внутренние границы, найденные в случае I-4, далее границы брались равными v_{ϕ}^{IV} .

Внешние границы стохастического слоя определялись по V_{max}

V_{min} частиц, участвующих в стохастическом движении в случаях I-1 и I-2. На Рис.23 приведены кривые $V_{\phi}^{IV} + V_{\beta}^{IV}$ и $V_{\phi}^{IV} - V_{\beta}^{IV}$ в зависимости от времени (сплошная кривая - случай I-2, пунктир - случай I-1) и показаны V_{max} , V_{min} частиц группы I, вышедших из захвата, и частиц групп 2 и 3, траектории которых пересекли V_{ϕ}^{IV} . Этот Рис. служит также для сравнения случаев I-1 и I-2. Из Рис.23 видно, что кривые $V_{\phi}^{IV} \pm V_{\beta}^{IV} = f(t)$ в случаях I-1 и I-2 различаются незначительно. Максимальные и минимальные скорости частиц также близки. За границы слоя мы принимали максимальные V_{max} (точки из группы I) и минимальные V_{min} (точки из группы I).

На Рис.24а,б показана зависимость от времени ширины стохастического слоя в максимуме сепаратрисы $x_0 = x_m - \Delta/V_T$ и Δ/V_{β}^{IV} . На Рис.25 показаны области захвата $N_e = 4$ в разные моменты времени, отмечены границы слоя на $x = x_m$ и в узлах, пунктиром показаны внешние границы слоя, стрелкой - ширина слоя на $x = x_m$.

На Рис.21 и 23 показаны точки случая I-0 (на Рис.23 приведены не все точки случая I-0, чтобы не загромождать Рис). Видно, что границы слоя гармоник $N_e = 4$ в узле и в максимуме сепаратрисы близки в случаях I-1, I-2 и I-0. Таким образом, стохастические эффекты и в этой области фазового пространства в случае I-0 развиваются так же, как и в случаях I-1, I-2.

Из Рис.23-25 видно, что в $t/T_{oe} > 80-100$ ширина стохастического слоя быстро растет, причем слой заметно несимметричен $\Delta_2 > \Delta_1$. Анализ спектров $E^N(t)$ позволяет предположить, что возможной причиной этого является возбуждение гармоник конверсии и развитие сильной стохастической неустойчивости в районе их областей захвата. Действительно, конверсия приводит к возбуждению гармоник $N_e + \beta N_i \geq 3$ с V_{ϕ}^N , близкими к V_{ϕ}^{IV} .

На Рис.26 показаны границы областей захвата $V_{\phi}^N + V_{\beta}^N$ и $V_{\phi}^N - V_{\beta}^N$ в зависимости от времени для гармоник $N_e = 3-6, 8, 10$ и нанесены V_{max} , V_{min} , соответствующие внешним границам слоя $N_e = 4$. Из Рис.26 видно, что область захвата $N_e = 4$ с течением времени начинает пересекаться с областями захвата гармоник $N_e = 3$ и $N_e = 5$, начинают пересекаться и области захвата гармоник $N_e = 5-10$. Пересечение областей захвата указывает на возможность развития сильной стохастической неустойчивости движения электронов, при которой электроны странствуют по

пересекающимся областям захвата. Действительно, V_{max} , V_{min} частиц, движущихся стохастически, в $t/T_{oe} > 50(V_{min}) - 100(V_{max})$ попадают в области захвата гармоник конверсии (Рис.26).

Развитие сильной стохастической неустойчивости подтверждается и траекториями частиц. Действительно, некоторые частицы группы I, выйдя из захвата $N_e = 4$, странствуют по областям захвата $N_e = 4-3$ или $N_e = 4-10$. Характерным примером является частица $N = 5$ из группы Ia (Рис.27). Эта частица вначале захвачена гармоникой $N_e = 4$ (Рис.27а), но в $t/T_{oe} \approx 35-40$ выходит из захвата и в дальнейшем остается пролетной относительно $N_e = 4$ с $V < V_{\phi}^{IV}$ (Рис.27б) и странствует по областям захвата гармоник $N_e = 5-8$. Так в $t/T_{oe} \approx 85$ частица $N = 5$ захватывается гармоникой $N_e = 5$ и совершив \sim половину оборота выходит из захвата с $V < V_{\phi}^V$ (Рис.27в), в $t/T_{oe} \approx 120$ она захватывается гармоникой $N_e = 6$ (Рис.27г), в $t/T_{oe} \approx 130$ - гармоникой $N_e = 7$ (Рис.27д), в $t/T_{oe} \approx 135-150$ - гармоникой $N_e = 8$ (Рис.27е), а затем вновь возвращается в область захвата гармоник $N_e = 7$ (Рис.27ж) и становится пролетной, переходя временами то в область захвата $N_e = 7$, то в область захвата $N_e = 6$ (Рис.27з).

Таким образом, развитие стохастического слоя гармоник $N_e = 4$ сопровождается развитием сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата гармоник $N_e = 4-3$ и $N_e = 4-10$. Подобно работе /17/ можно считать, что область сильной стохастической неустойчивости, относится к стохастическому слою гармоник $N_e = 4$.

Мы изучали стохастические слои гармоник $N_e = 2$ и 4 только на полуплоскости $V > 0$. Естественно ожидать, что в области обратных волн на полуплоскости $V < 0$ все явления повторяются симметрично и стохастические слои гармоник $N_e = 2$ и 4 с $V_{\phi}^N < 0$ точно так же развиваются во времени, как и для гармоник с $V_{\phi}^N > 0$.

Вернемся к полуплоскости $V > 0$. На Рис.28 показаны $V_{\phi}^N \pm V_{\beta}^N = f(t)$ и границы стохастических слоев гармоник $N_e = 2$ и 4, на Рис.29 - области захвата и границы слоев в $t/T_{oe} \sim 200$ для гармоник $N_e = 1, 2$ и 4. Из Рис.28,29 видно, что к $t/T_{oe} \sim 200$ граница стохастического слоя $N_e = 2$ лежит далеко от сепаратрисы $N_e = 1$, границы слоев $N_e = 2$ и $N_e = 4$ сближаются. Поскольку мы наблюдаем переходную стадию развития

стохастического слоя, можно ожидать, что ширина слоев $N_e = 2$ и 4 будет продолжать расти. Это может привести к сильной стохастической неустойчивости в районе областей захвата $N_e = 2-4$. Как видно из Рис. 28, 29 нижняя граница слоя $N_e = 4$ в $t/t_{oe} \sim 200$ близка к $v/v_T \sim 2$, так что, если слой будет продолжать расти, она будет смещаться в область $v/v_T < 2$.

Развитие стохастических эффектов должно приводить к затуханию поля. В нашей модели функция распределения по скоростям обрезана на $v \sim 2v_T$, так что в области $v > 2v_T$ электронов нет, нет и затухания. В случае полной максвелловской функции распределения стохастизация движения электронов хвоста $v > 2v_T$ в стохастических слоях гармоник $N_e = 2$ и 4 должна привести к небольшому затуханию. Отметим, что ширина слоев в этом случае может расти несколько быстрее из-за модуляции амплитуды гармоник при движении захваченных частиц /18/. Приближение нижней границы стохастического слоя $N_e = 4$ (области сильной стохастической неустойчивости) к $v \sim 2v_T$ означает, что в сильной стохастической неустойчивости будет участвовать значительное число электронов, что может привести к заметному затуханию гармоник и, следовательно, солитонов.

Такая тенденция сближает рассматриваемый здесь случай со случаями коллапса, рассмотренными нами ранее /2,5/. Действительно, в случаях коллапса было показано, что затухание связано с развитием сильной стохастической неустойчивости движения электронов в области пересекающихся областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости и конверсии, когда граница этой области приближается к $v/v_T \sim 2$. Ускорение небольшого числа электронов, странствующих по областям захвата, до больших скоростей и приводит к быстрому затуханию.

Близость этих случаев обусловлена выбором параметров солитона в настоящей работе. Однако можно ожидать, что при других параметрах, например, меньших амплитудах или больших фазовых скоростях начальной волны стохастические слои гармоник модуляционной неустойчивости и конверсии будут сосредоточены в районе их сепаратрис и не будут пересекаться, так что солитоны будут только незначительно затухать при развитии стохастических слоев.

ЛИТЕРАТУРА:

1. N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin. Plasma Phys. 23, 35, 1981.
Препринты ИЯФ СО АН СССР № 78-19, № 78-76, 1978.
J. Physique 40, suppl. au N 7, с.7-631, 1979 (Proc. XIV ICPiG, Grenoble, 1979).
2. N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin. Phys. Lett. 112A, 330, 1985.
Препринт ИЯФ СО АН СССР № 84-149, 1984.
3. Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин. Физика плазмы 7, 383, 1981.
Препринты ИЯФ СО АН СССР № 77-15; № 77-39, 1977; № 78-17; № 78-76, 1978.
Proc. XIII ICPiG, v.2, p.831, Berlin, 1977.
J. Physique 40, suppl. au N 7, с.7-633, 1979 (Proc. XIV ICPiG, Grenoble, 1979).
4. N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin. Comments Plasma Phys. 6, 21, 1980.
5. Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин. Препринт ИЯФ СО АН СССР № 84-150, 1984.
Proc. XVII ICPiG, v.1, p.73, Budapest, 1985.
Взаимодействие электромагнитных излучений с плазмой, стр.221, Ташкент, 1985.
6. N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin. Physica Scripta 24, 566, 1981.
Препринты ИЯФ СО АН СССР № 81-43, № 81-88; № 81-89, 1981; № 82-53, 1982.
7. P.K. Kaw, A.T. Lin, J.M. Dawson Phys. Fluids 16, 1967, 1973.
8. Г.М. Заславский, Б.В. Чириков. УФН 105, 3, 1971.
B.V. Chirikov. Phys. Reports 52, 263, 1979.
Б.В. Чириков. Вопросы теории плазмы, выпуск 13, Энергоатомиздат, Москва, 1984.
9. Г.М. Заславский. Стохастичность динамических систем, Наука, Москва, 1984.
10. А. Дихтенберг, М. Либерман. Регулярная и стохастическая динамика, Мир, Москва, 1984.
11. Г.М. Заславский, Н.Н. Филоненко. ЖЭТФ 54, 1590, 1968.
12. A.V. Rechester, T.H. Stix. Phys. Rev. A19, 1656, 1979.
13. D.F. Escandé. Phys. Reports 121, 165, 1985.

14. G.Schmidt Comments Plasma Phys. 7, 87, 1982.
 15. W.Rozmus, W.Tighe, A.A.Offenberger, K.Estabrook. Phys. Fluids 28, 920, 1985.
 16. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. Препринты ИЯФ СО АН СССР № 86-153, № 86-154, № 86-155, 1986.
 17. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. Препринты ИЯФ СО АН СССР № 88-139, № 88-163, 1988; № 89-36, № 89-106, № 89-155, 1989.
 18. A.Murakami, Y.Nomura, H.Momota. J.Phys. Soc.Japan 51, 4053, 1982.

Подписи к рисункам:

- Рис.1. Распределение поля $E(x)$ и возмущения плотности $\tilde{n}(x)$. $t = 0$.
 $E_0/(mrd/T_{oe}^2) = 11,5$; $\tilde{n}_0/n_0 = 1,75 \cdot 10^{-2}$.
- Рис.2. Области захвата гармоник ленгмюровской волны $N_e = 1$; 2 и 4. $t = 0$. Полуплоскость $v > 0$.
- Рис.3. Область захвата гармоник ленгмюровской волны и начальные x_0 , v_0 пробных частиц (схема).
 а. $N_e = 1$; б. $N_e = 2$; в. $N_e = 4$.
 ①, ②, ... - номер группы; 1, 2, ... - номер траектории.
- Рис.4. Распределение поля $E(x)$ в разные моменты времени. Случай I-I.
 E нормировано на mrd/T_{oe}^2
- Рис.5-7. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости.
 Рис.5. Группа I в области захвата $N_e = 1$; $N = 1$.
 Рис.6. Группа I в области захвата $N_e = 2$; $N = 6$.
 Рис.7. Группа I в области захвата $N_e = 2$; $N = 2$.
 Траектории в системе волны N_e : $X = x - v_{\phi}^N t$; $V = v - v_{\phi}^N$.
 Цифры на траектории - моменты времени, когда частица имеет данные x и v .
- Рис.8. Зависимость от времени числа частиц $\Delta n/n_0$. Район области захвата $N_e = 2$.
 а. Группа I, Δn частиц, вышедших из захвата ($x < x_1$; $x > x_2$); $n_0 = 60$.
 б. Группа 4, Δn частиц, пересекающих фазовую скорость v_{ϕ}^{II} ($v < v_{\phi}^{II}$); $n_0 = 15$.
 в. Группа 5, Δn частиц, пересекающих фазовую скорость v_{ϕ}^{II} ($v > v_{\phi}^{II}$); $n_0 = 15$.
- Рис.9-10. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. $N_e = 2$.
 Рис.9. Группа 3 вне области захвата $N_e = 2$; $N = 7$.
 Рис.10. Группа 4 в узле сепаратрисы $N_e = 2$; $N = 9$.
 Траектории в системе волны $N_e = 2$:
 $X = x - v_{\phi}^{II} t$; $V = v - v_{\phi}^{II}$.

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

Рис.11. Зависимость от времени границ стохастического слоя в узле сепаратрисы. $N_e = 2$.
 \circ — случай I-I; $+$ — случай I-0.

Рис.12. Зависимость от времени ширины стохастического слоя в узле сепаратрисы. $N_e = 2$.
 а. Δ/V_T ; б. Δ/V_3^H .
 Δ_1 — верхний слой; Δ_2 — нижний слой.

Рис.13. Зависимость от времени границ области захвата $V_\phi^H + V_3^H$ и $V_\phi^H - V_3^H$ и границ стохастического слоя в максимуме сепаратрисы. $N_e = 2$.
 Пунктир — границы стохастического слоя.

Рис.14. Зависимость от времени границ области захвата $V_\phi^H + V_3^H$ и $V_\phi^H - V_3^H$ и максимальных и минимальных скоростей пробных частиц. $N_e = 2$.
 \circ — группа I; \times — группы 4 и 5;
 $+$ — случай I-0, группы 4 и 5.

Пунктир — границы стохастического слоя из Рис.13.

Рис.15. Зависимость от времени ширины стохастического слоя в максимуме сепаратрисы. $N_e = 2$.
 а. Δ/V_T ; б. Δ/V_3^H .
 Δ_1 — верхний слой; Δ_2 — нижний слой.

Рис.16. Области захвата и границы стохастического слоя в разные моменты времени. $N_e = 2$.

Рис	а	б	в	г
t/T_{oe}	56	112	168	196

Пунктир — границы стохастического слоя.
 Стрелки — ширина стохастического слоя в максимуме сепаратрисы.

Рис.17-18. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. $N_e = 4$.

Рис.17. Группа Ic в области захвата $N_e = 4$; $N = 7$.

Рис.18. Группа Ib в области захвата $N_e = 4$; $N = 1$.

Траектории в системе волны $N_e = 4$: $X = x - v_\phi^{IV} t$; $V = v - v_\phi^{IV}$.

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

Рис.19. Зависимость от времени числа частиц $\Delta n/n_0$.
 Район области захвата $N_e = 4$.

а. Группа I, Δn частиц, вышедших из захвата ($x < x_1$; $x > x_2$); $n_0 = 90$.

б. Случай I-4, группа I, Δn частиц, вышедших из захвата ($x < x_1$; $x > x_2$); $n_0 = 90$.

в. Группа 2, Δn частиц, пересекающих фазовую скорость v_ϕ^{IV} ($v < v_\phi^{IV}$); $n_0 = 10$.

г. Группа 3, Δn частиц, пересекающих фазовую скорость v_ϕ^{IV} ($v > v_\phi^{IV}$); $n_0 = 10$.

Рис.20. Траектория пробной частицы (электрона) на фазовой плоскости. $N_e = 4$.

Группа 2 в узле сепаратрисы $N_e = 4$; $N = 8$.

Траектории в системе волны $N_e = 4$: $X = x - v_\phi^{IV} t$; $V = v - v_\phi^{IV}$.

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

Рис.21. Зависимость от времени границ стохастического слоя в узле сепаратрисы. $N_e = 4$.

\circ — случай I-I; $+$ — случай I-0.

Рис.22. Зависимость от времени ширины стохастического слоя в узле сепаратрисы. $N_e = 4$.

а. Δ/V_T ; б. Δ/V_3^{IV} .

Δ_1 — верхний слой; Δ_2 — нижний слой.

Рис.23. Зависимость от времени границ области захвата

$V_\phi^{IV} + V_3^{IV}$ и $V_\phi^{IV} - V_3^{IV}$ и максимальных и минимальных скоростей пробных частиц. $N_e = 4$.

\circ — группа I; \times — группы 2 и 3; $+$ — случай I-0, группы 2 и 3; \ominus — случай I-4, группа I.

Пунктир — и сплошная линия — $V_\phi^{IV} \pm V_3^{IV}$ в случаях I-I и I-2, пунктир — — — границы стохастического слоя.

Рис.24. Зависимость от времени ширины стохастического слоя в максимуме сепаратрисы. $N_e = 4$.

а. Δ/V_T ; Δ/V_z^{IV} .
 Δ_1 - верхний слой; Δ_2 - нижний слой.

Рис.25. Области захвата и границы стохастического слоя в разные моменты времени. $N_e = 4$.

Рис. а б в г
 t/T_{oe} 56 112 140 196

Пунктир - границы стохастического слоя.
 Стрелки - ширина стохастического слоя в максимуме сепаратрисы.

Рис.26. Зависимость от времени границ области захвата $V_{\phi}^N + V_z^N$ и $V_{\phi}^N - V_z^N$ гармоники $N_e = 4$ и гармоник конверсии $N_e = 3; 5; 6; 8; 10$ и максимальных и минимальных скоростей пробных частиц группы I.

Рис.27. Траектория пробной частицы (электрона) на фазовой плоскости в разных системах координат. $N_e = 4$.

Группа Ia в области захвата $N_e = 4; N = 5$.
 Траектории в системе волны N_e : $X = x - v_{\phi}^N t; V = v - v_{\phi}^N$

Рис. а б в г д е ж з
 N_e 4 4 5 6 7 8 7 7

Цифры на траектории - моменты времени, когда частица имеет данные X и V .

Рис.28. Зависимость от времени границ области захвата $V_{\phi}^N + V_z^N$ и $V_{\phi}^N - V_z^N$ и границ стохастических слоев в максимуме сепаратрисы. Гармоники $N_e = 2$ и 4.

Рис.29. Области захвата и границы стохастического слоя гармоник $N_e = 1, 2$ и 4 в $t/T_{oe} \sim 200$.

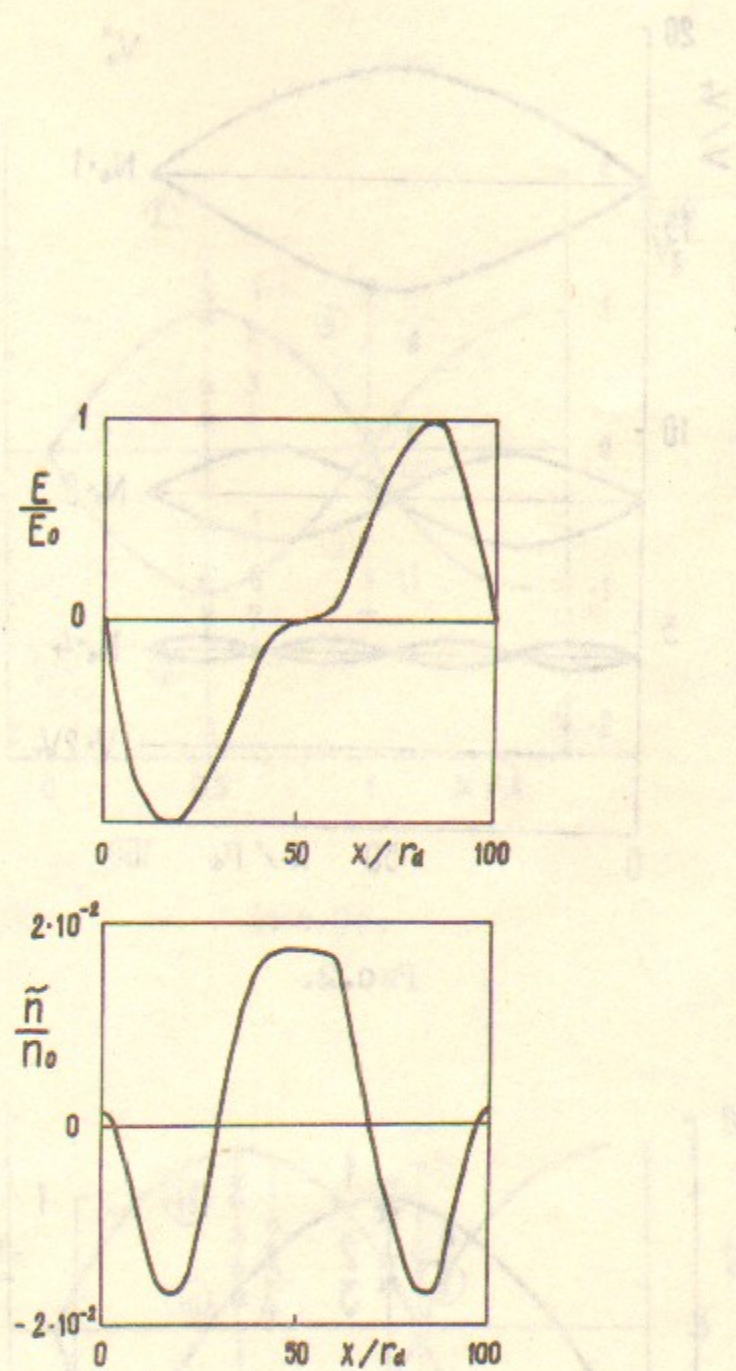


Рис. I.

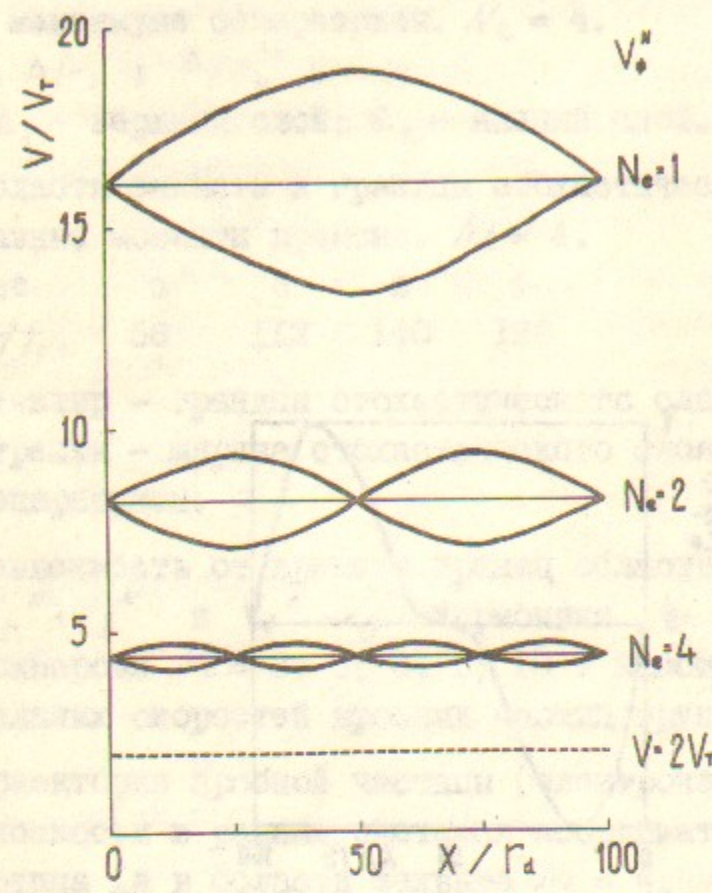


Рис.2.

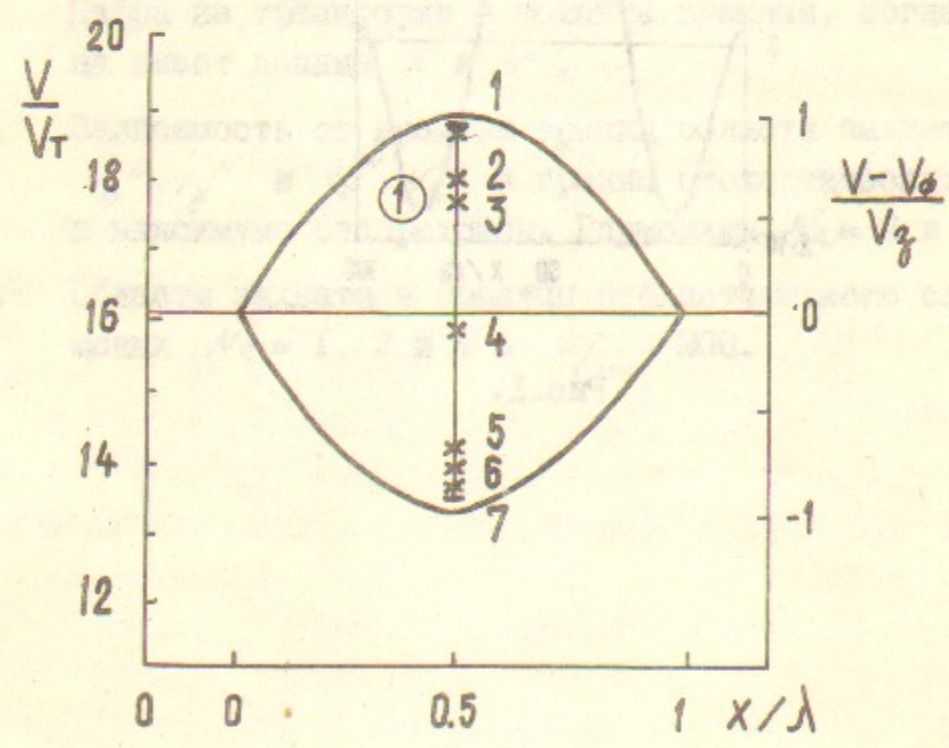


Рис.3а.

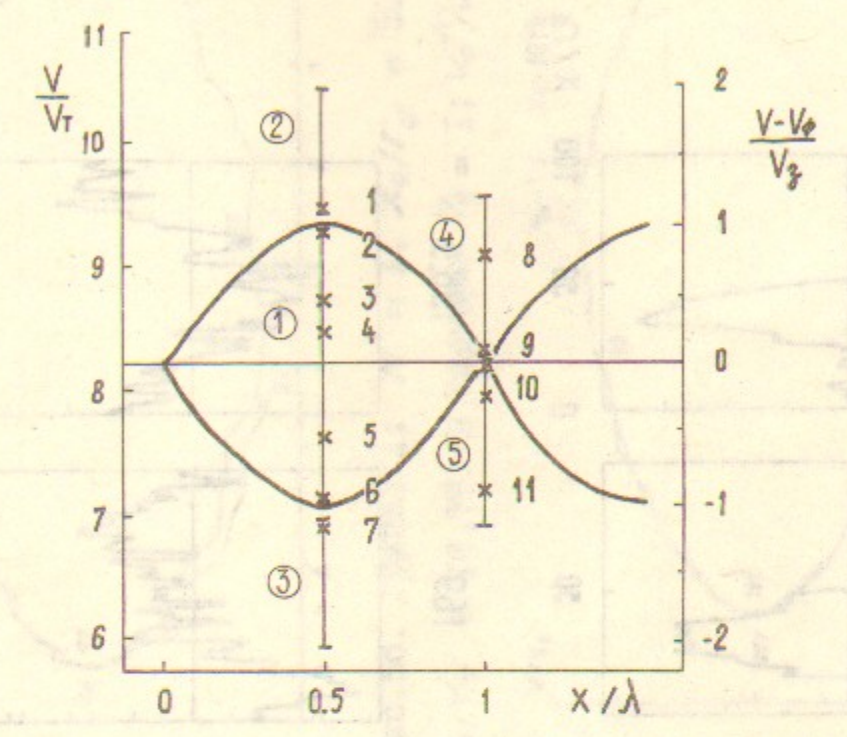


Рис.3б.

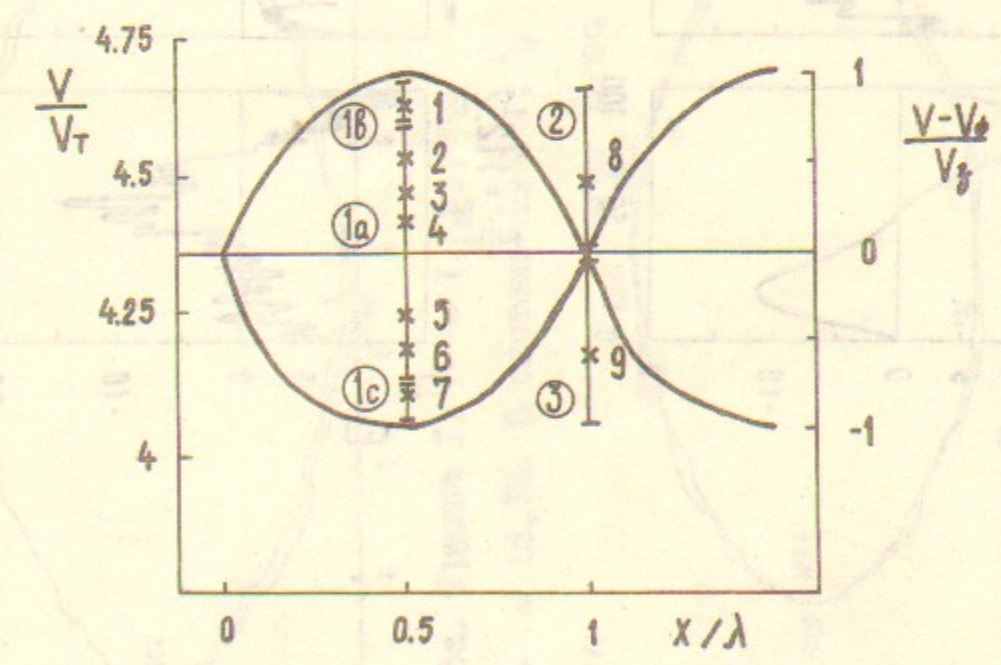


Рис.3в.

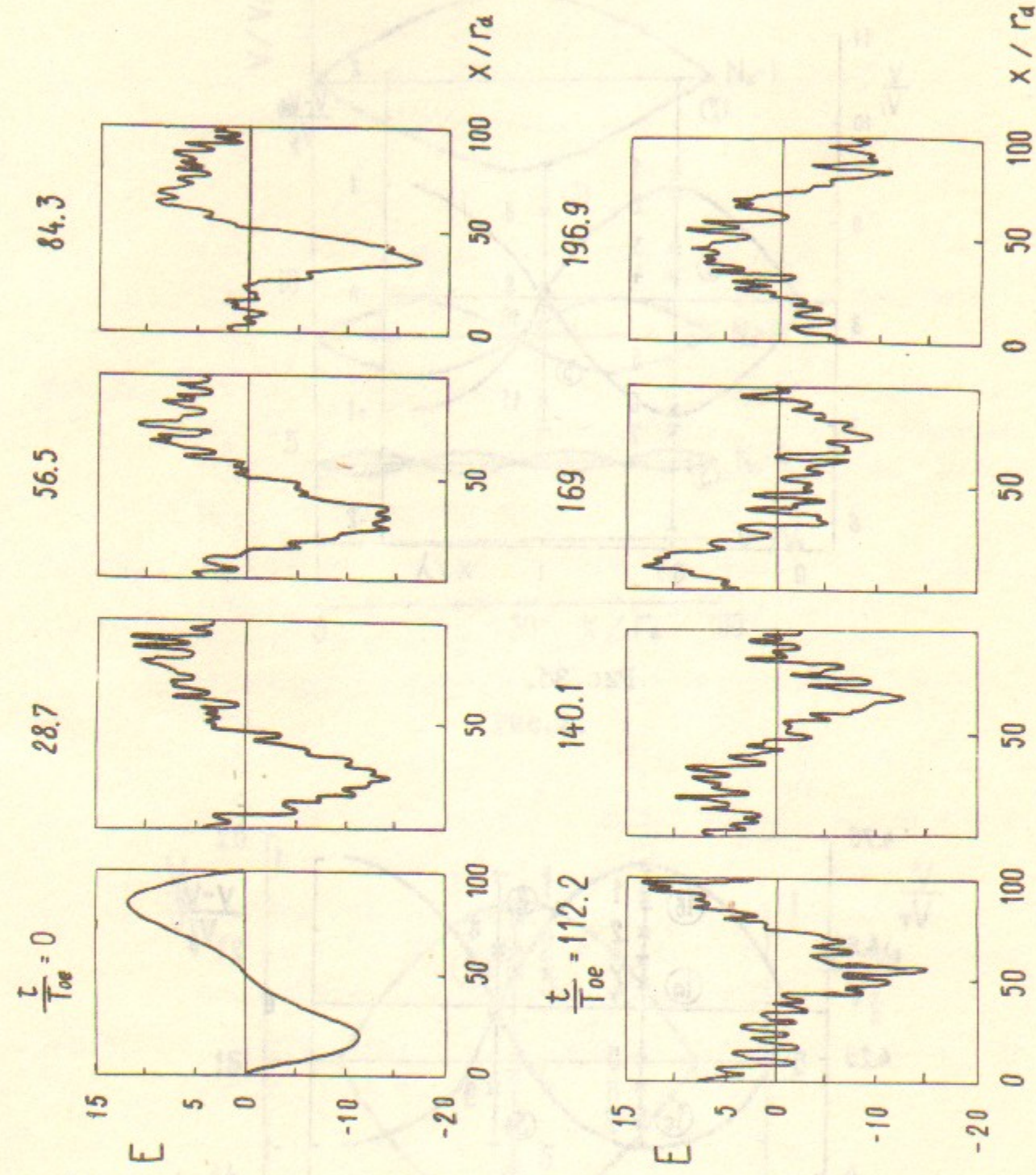


Рис.4.

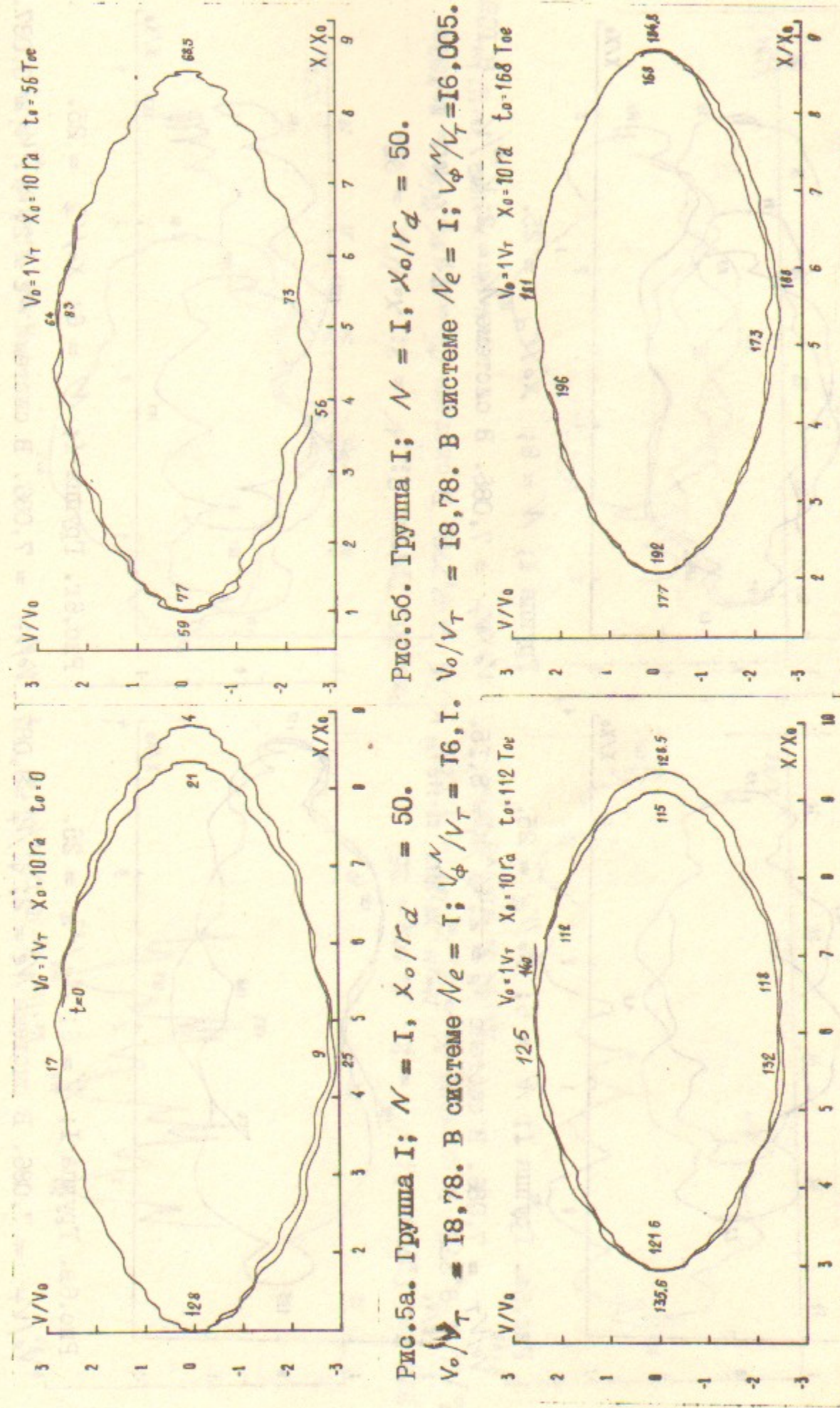


Рис.5а. Груша I; $N = 1$, $X_0/r_d = 50$.

$V_0/V_T = 18,78$. В системе $N_e = 1$; $V_\phi/V_T = 16,1$.

Рис.5б. Груша I; $N = 1$, $X_0/r_d = 50$.

$V_0/V_T = 18,78$. В системе $N_e = 1$; $V_\phi/V_T = 16,005$.

Рис.5в. Груша I; $N = 1$, $X_0/r_d = 50$.

$V_0/V_T = 18,78$. В системе $N_e = 1$; $V_\phi/V_T = 16,03$.

Рис.5г. Груша I; $N = 1$, $X_0/r_d = 50$.

$V_0/V_T = 18,78$. В системе $N_e = 1$; $V_\phi/V_T = 16,42$.

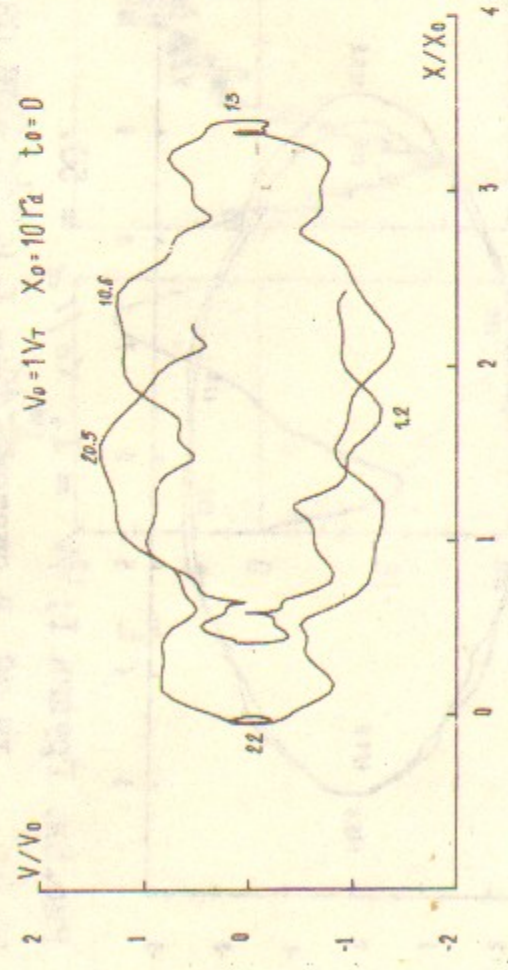


Рис.6а. Група I; $N = 6$; $X_0/r_d = 25$.

$V_0/V_T = 7,086$. В системі $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_T = 8,15$.

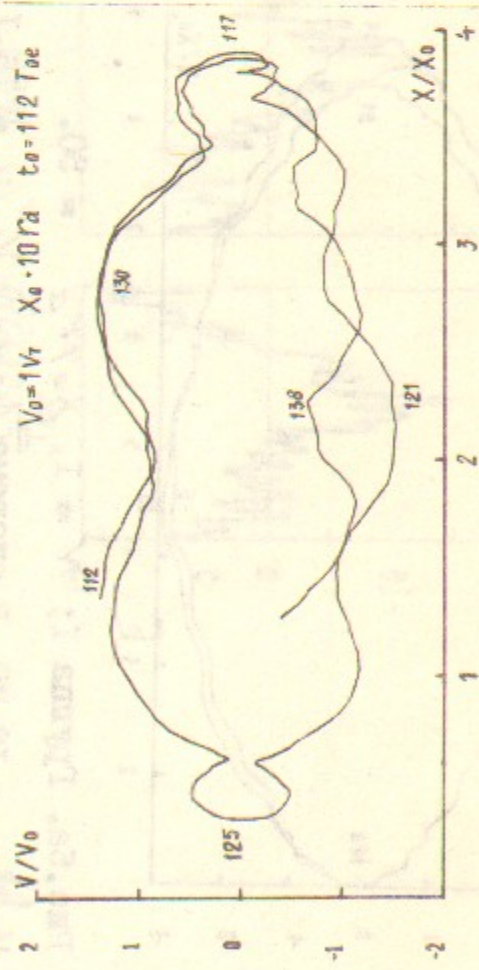
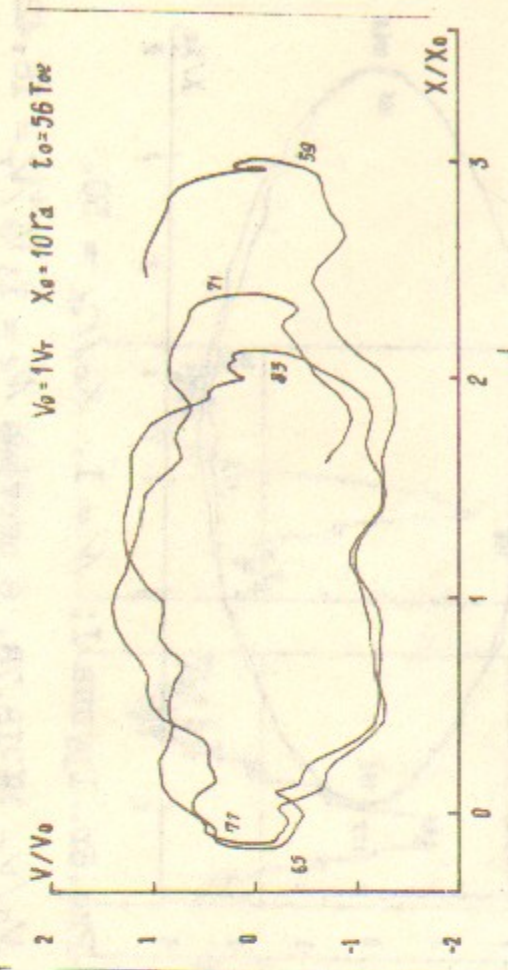


Рис.6в. Група I; $N = 6$; $X_0/r_d = 25$.

$V_0/V_T = 7,086$. В системі $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_T = 8,087$.



Група I; $N = 6$; $X_0/r_d = 25$.

$V_0/V_T = 7,086$. В системі $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_T = 8,109$.

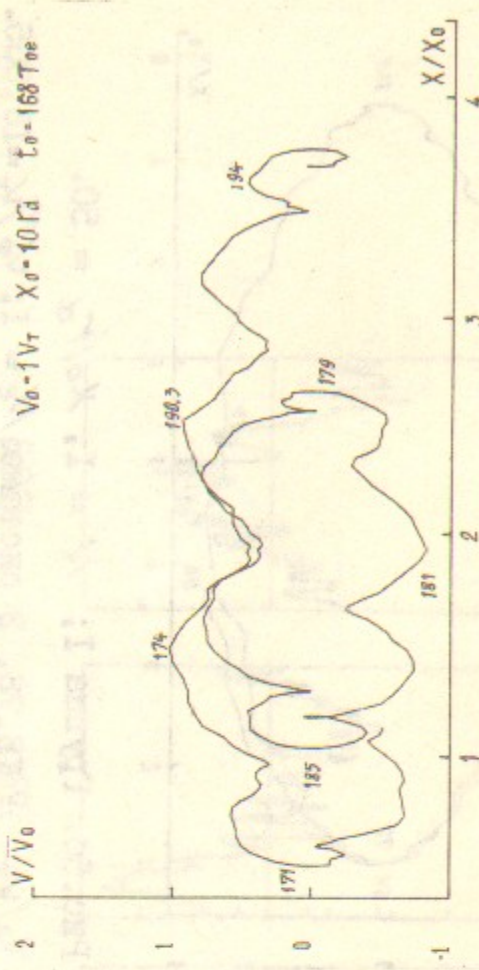


Рис.6г. Група I; $N = 6$; $X_0/r_d = 25$.

$V_0/V_T = 7,086$. В системі $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_T = 8,087$.

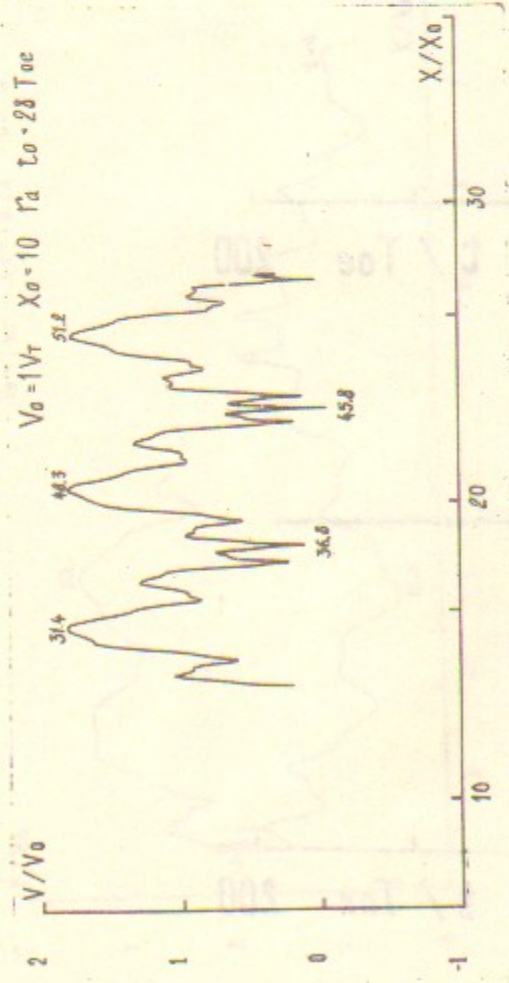


Рис.7а. Група I; $N = 2$; $X_0/r_d = 25$.

$V_0/V_T = 9,278$. В системі $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_T = 8,125$.

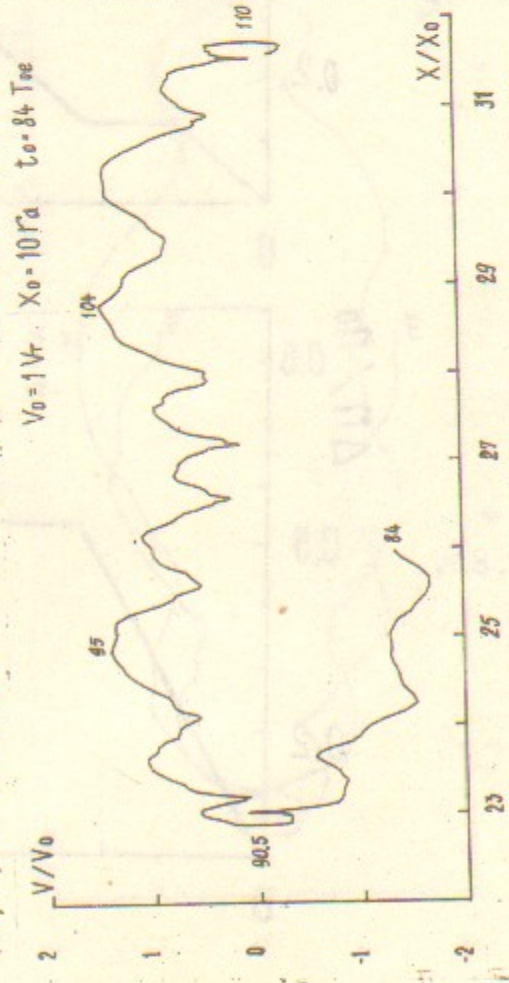


Рис.7б. Група I; $N = 2$; $X_0/r_d = 25$.

$V_0/V_T = 9,278$. В системі $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_T = 8,087$.

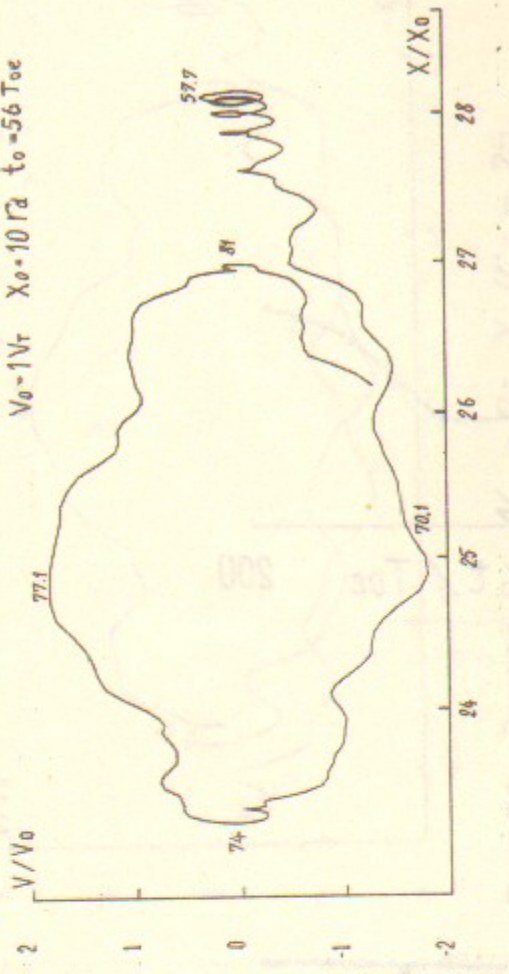


Рис.7б. Група 2; $N = 2$; $X_0/r_d = 25$.

$V_0/V_T = 9,278$. В системі $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_T = 8,109$.

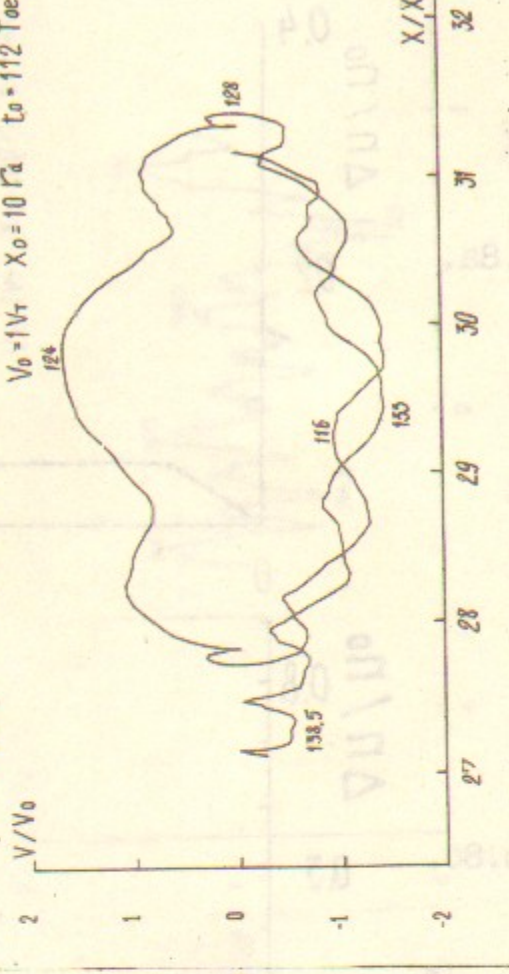


Рис.7г. Група 2; $N = 2$; $X_0/r_d = 25$.

$V_0/V_T = 9,278$. В системі $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_T = 8,087$.

Рис. 8а.

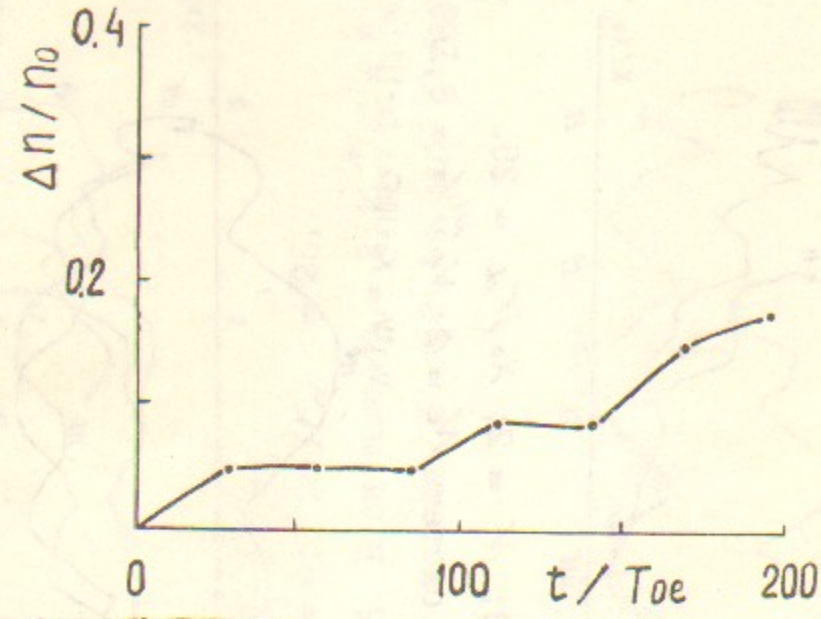


Рис. 8б.

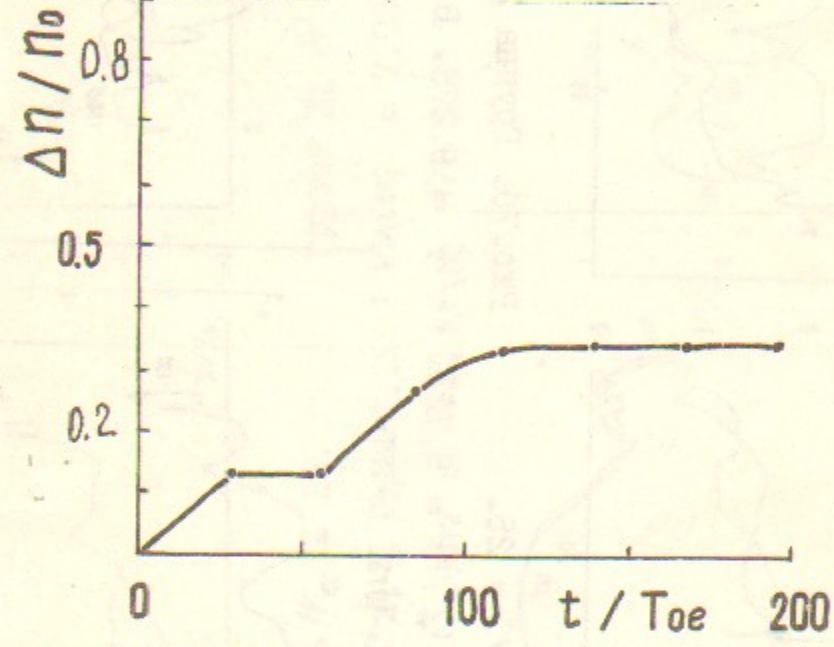


Рис. 8в.

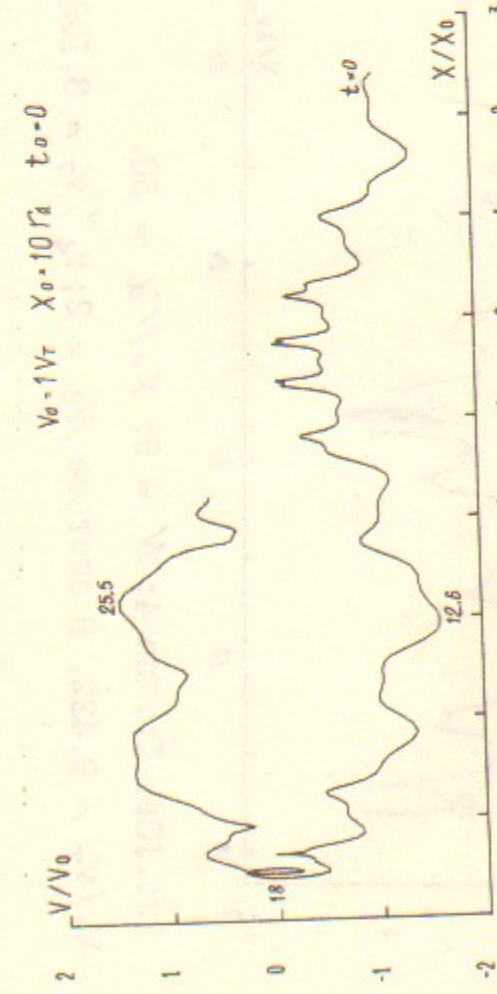
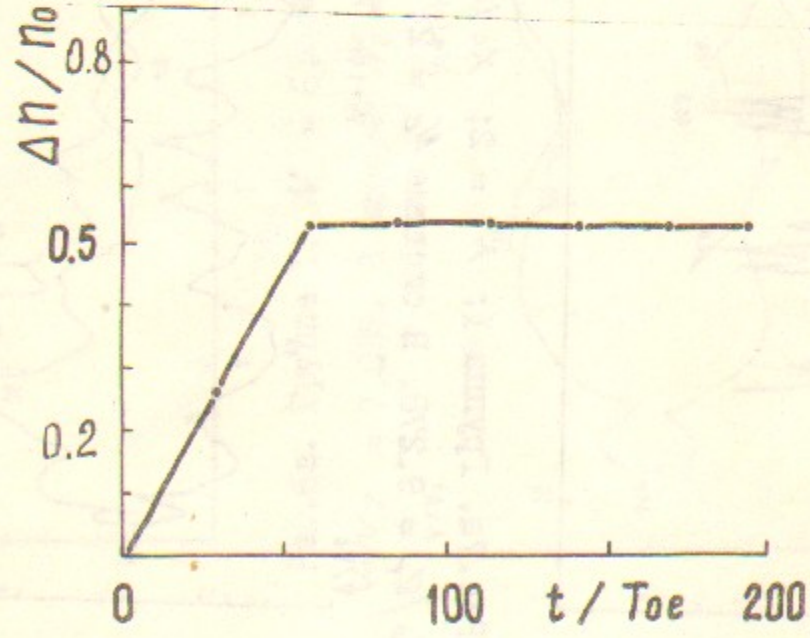


Рис. 9а. Группа 3; $N = 7$; $X_0/\Gamma_d = 25$.
 $V_0/V_\tau = 6,935$. В системе $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_\tau = 8,15$.

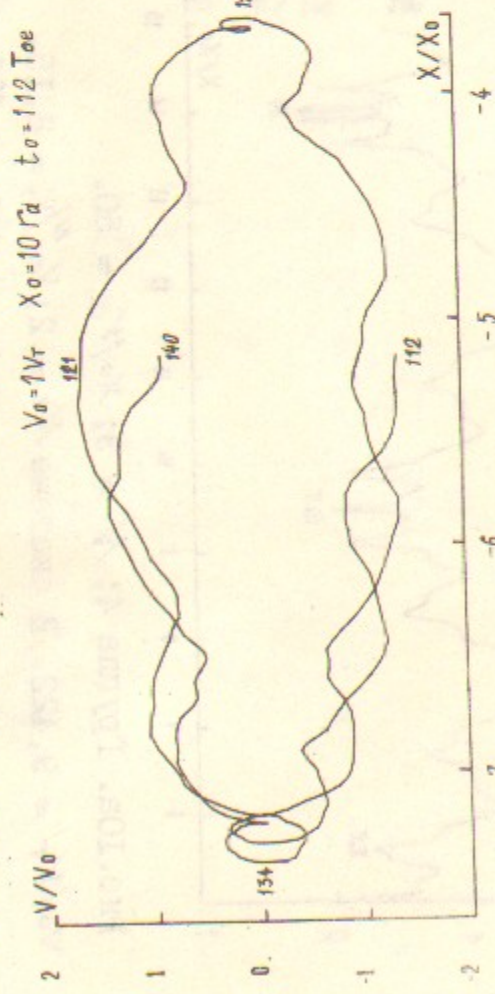


Рис. 9в. Группа 3; $N = 7$; $X_0/\Gamma_d = 25$.
 $V_0/V_\tau = 6,935$. В системе $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_\tau = 8,087$.

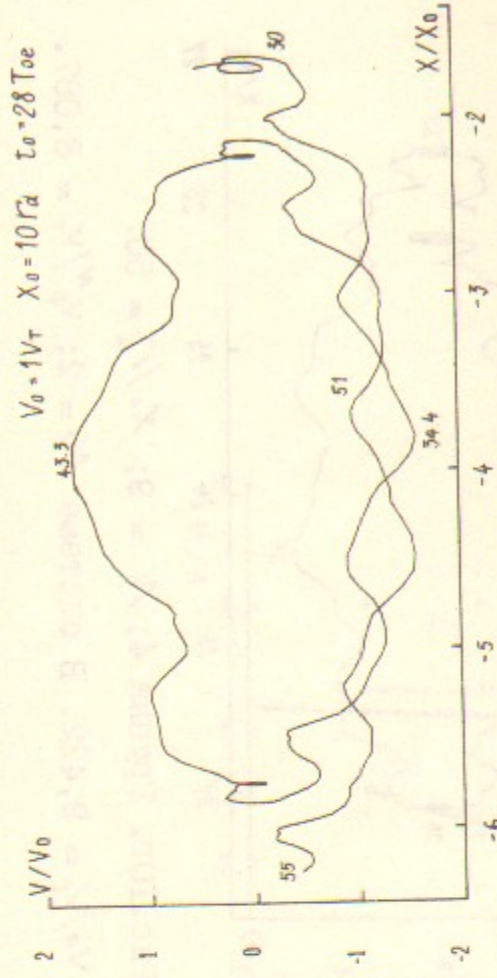


Рис. 9б. Группа 3; $N = 7$; $X_0/\Gamma_d = 25$.
 $V_0/V_\tau = 6,935$. В системе $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_\tau = 8,125$.

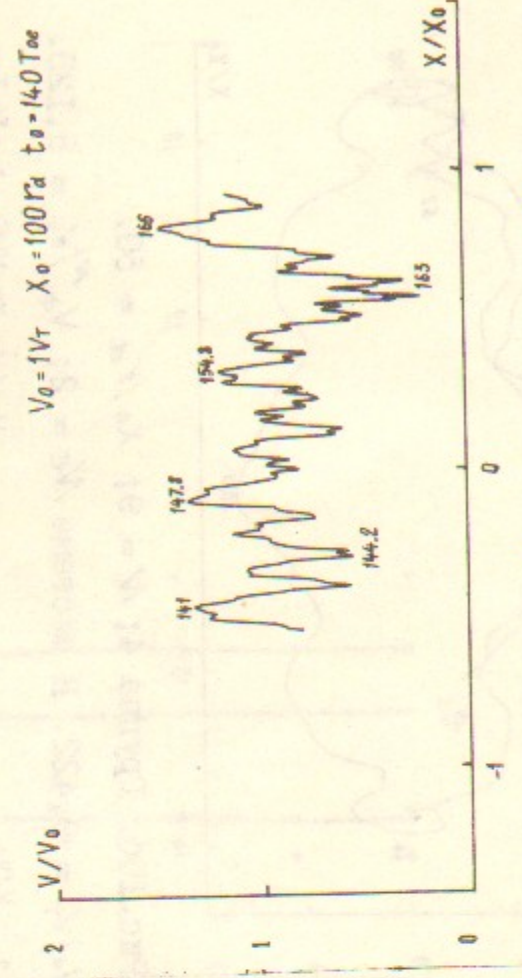


Рис. 9г. Группа 3; $N = 7$; $X_0/\Gamma_d = 25$.
 $V_0/V_\tau = 6,935$. В системе $N_e = 2$; $V_\phi^N/V_\tau = 8,087$.

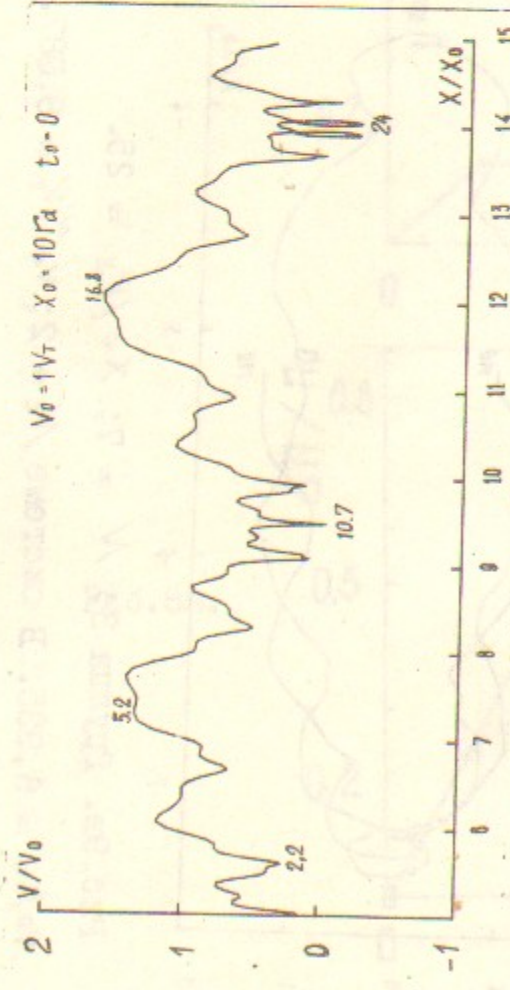


Рис. 10а. Группа 4; $N = 9$; $X_0/\Gamma_d = 50$.

$V_0/V_T = 9,422$. В системе $\mathcal{N}_e = 2$; $V_\Phi^M/V_T = 8,15$.

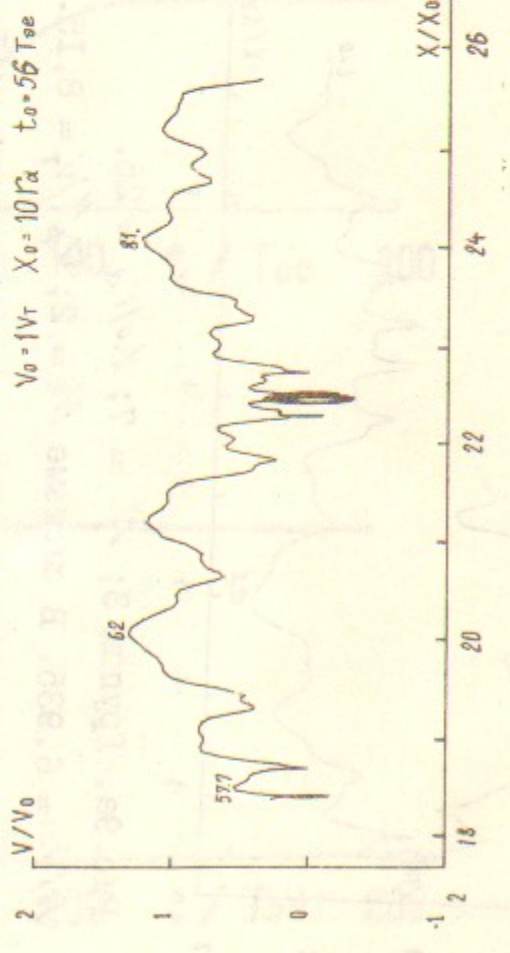


Рис. 10в. Группа 4; $N = 9$; $X_0/\Gamma_d = 50$.

$V_0/V_T = 9,422$. В системе $\mathcal{N}_e = 2$; $V_\Phi^M/V_T = 8,109$.

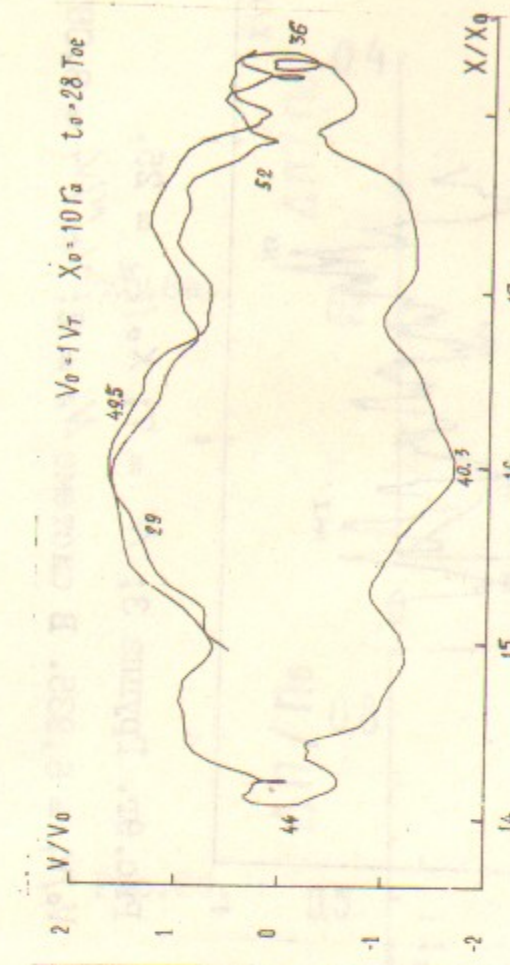


Рис. 10б. Группа 4; $N = 9$; $X_0/\Gamma_d = 50$.

$V_0/V_T = 9,422$. В системе $\mathcal{N}_e = 2$; $V_\Phi^M/V_T = 8,125$.

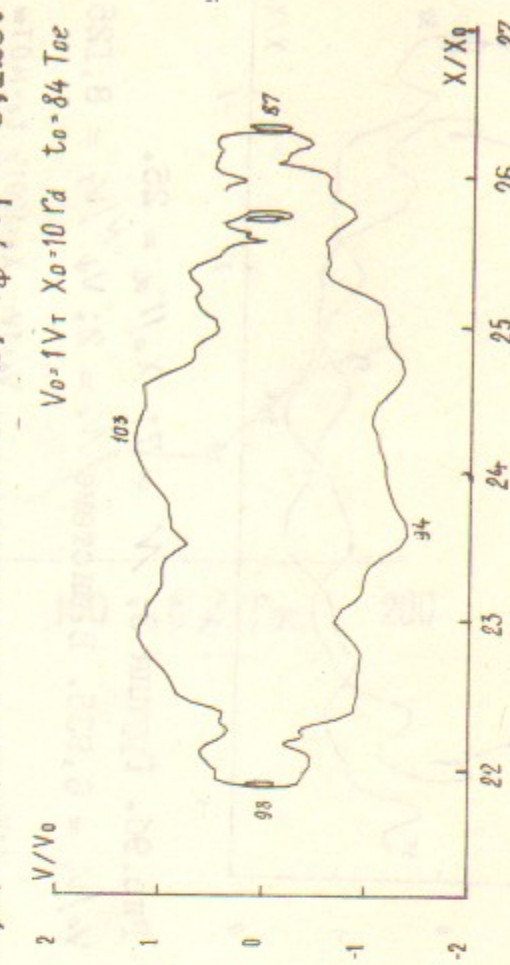


Рис. 10г. Группа 4; $N = 9$; $X_0/\Gamma_d = 50$.

$V_0/V_T = 9,422$. В системе $\mathcal{N}_e = 2$; $V_\Phi^M/V_T = 8,087$.

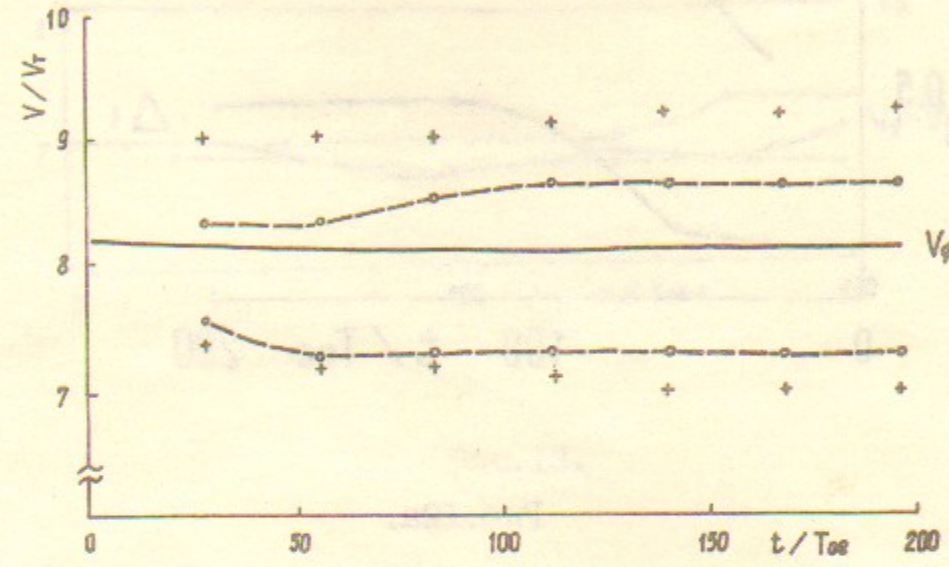


Рис. 11.

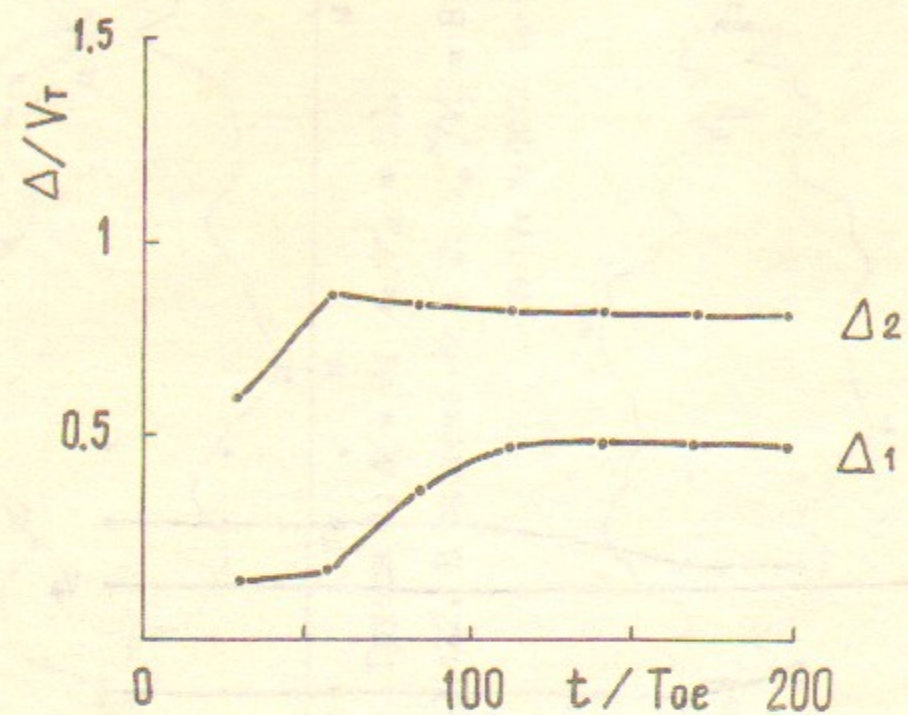


Рис. 12а.

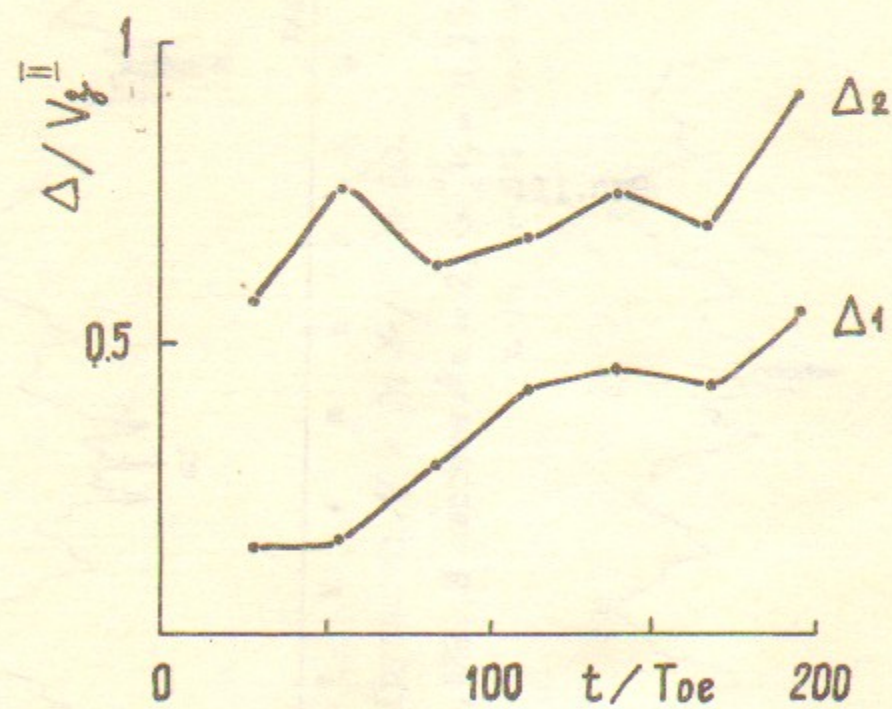


Рис. 12б.

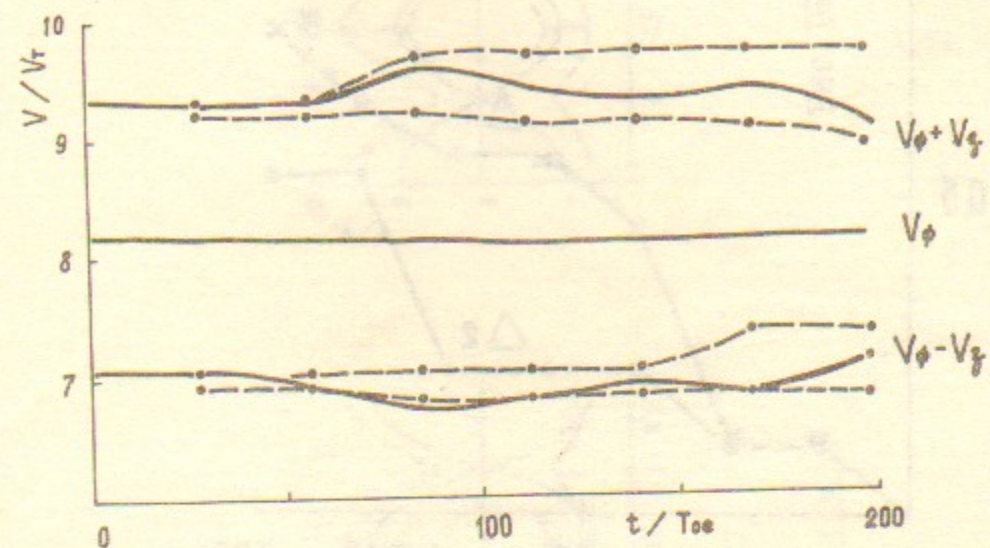


Рис. 13.

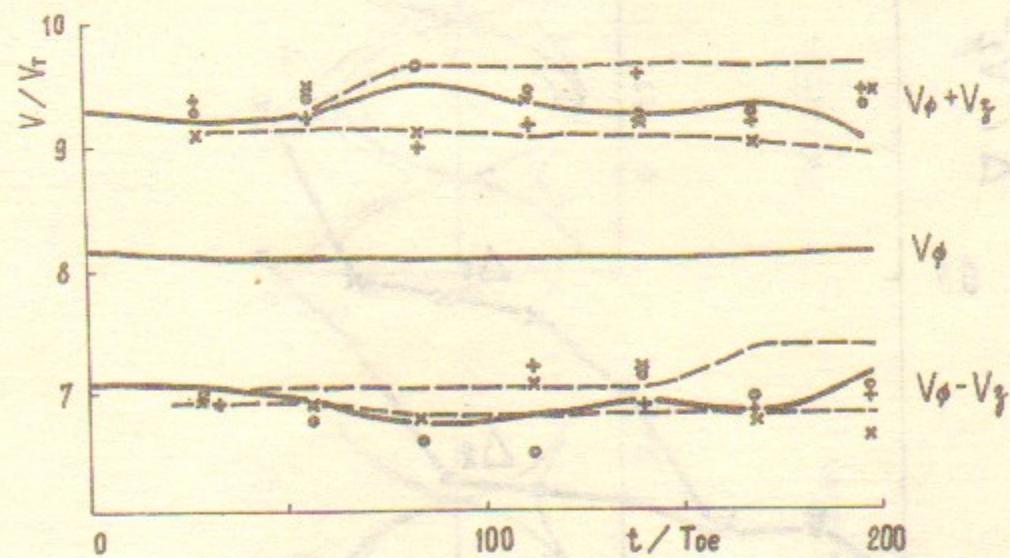


Рис. 14.

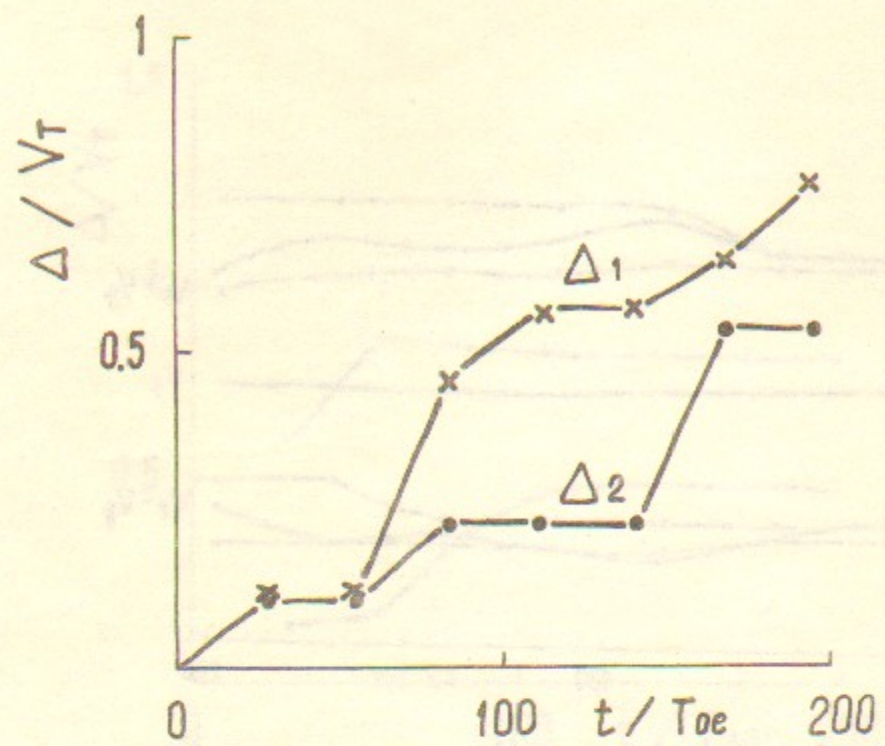


Рис. 15а.

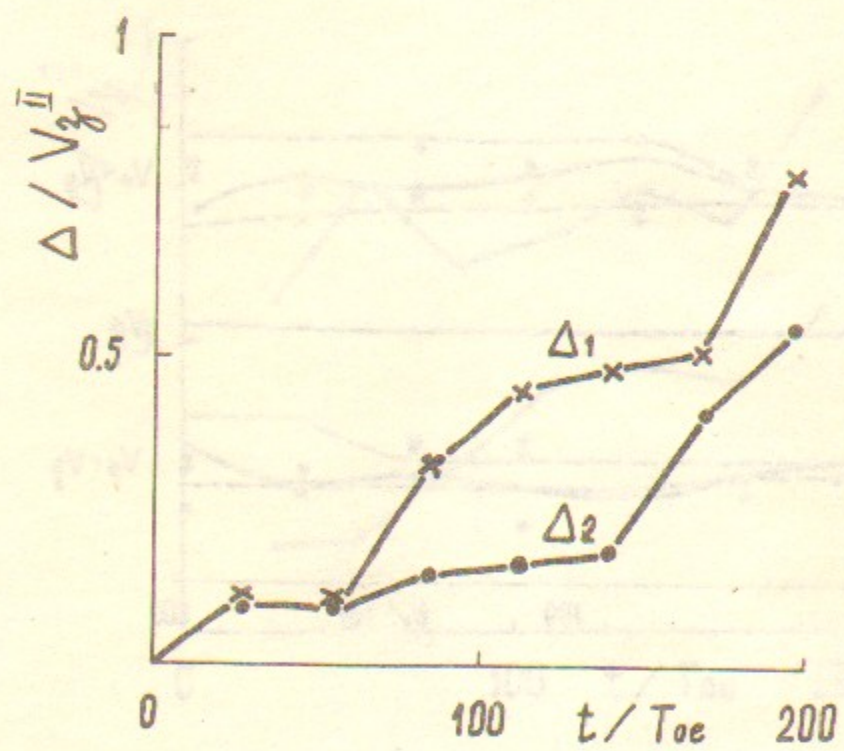


Рис. 15б.

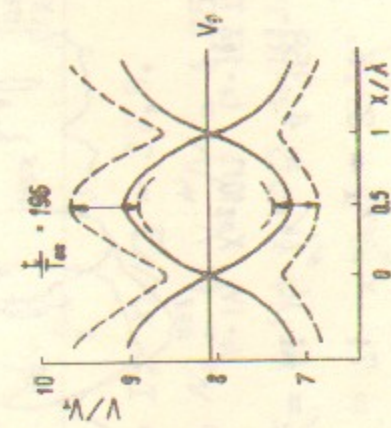


Рис. 16г.

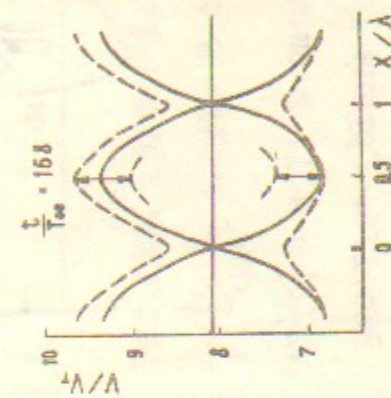


Рис. 16в.

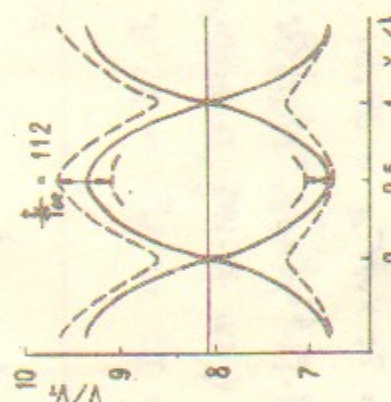


Рис. 16б.

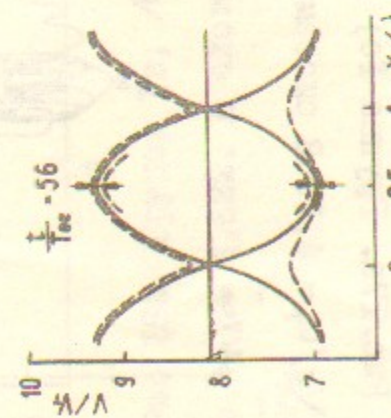


Рис. 16а.

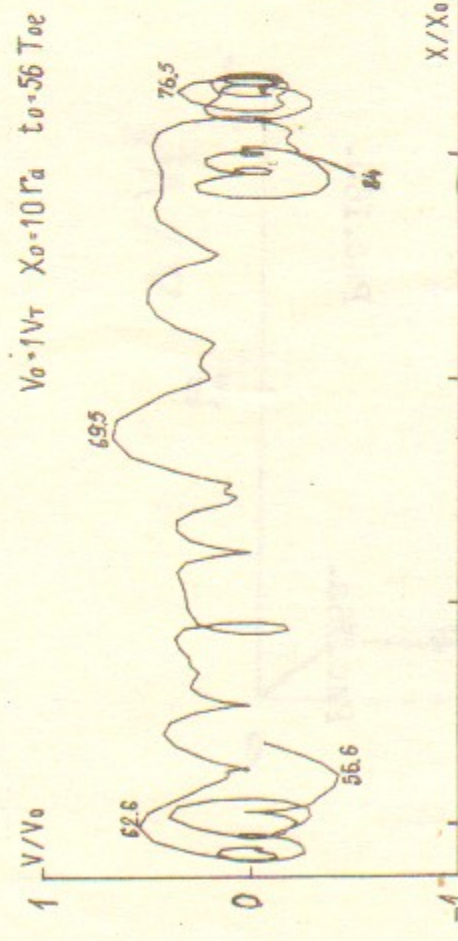


Рис. 17а. Группа Ia; $N = 7$; $X_0/\Gamma d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4, I$. В системе $N_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

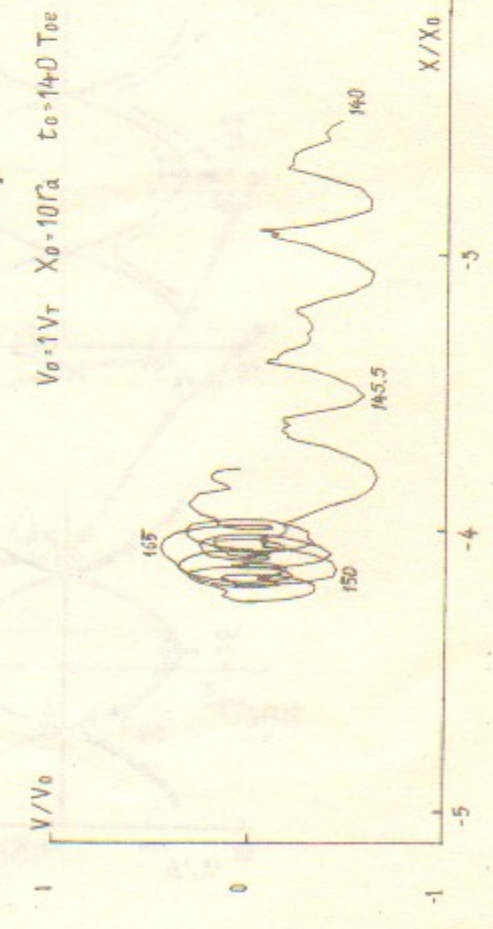


Рис. 17в. Группа Ia; $N = 7$; $X_0/\Gamma d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4, I$. В системе $N_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

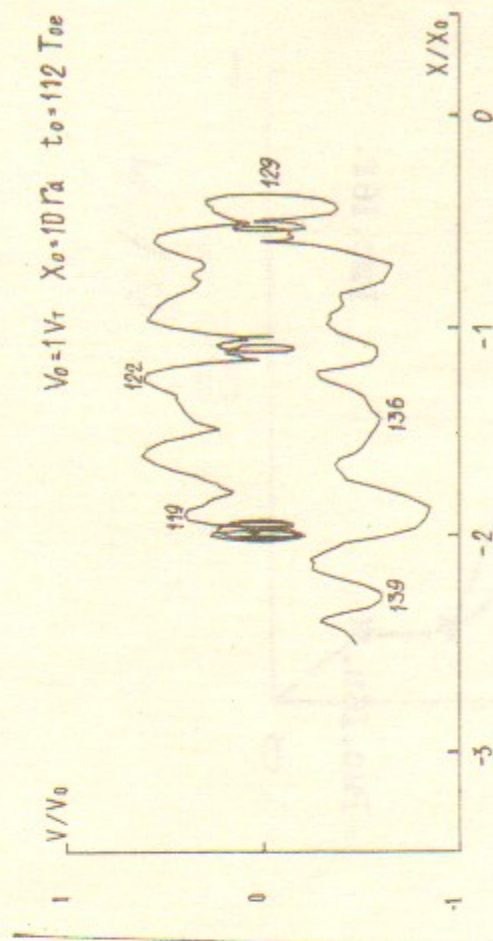


Рис. 17с. Группа Ib; $N = 7$; $X_0/\Gamma d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4, I$. В системе $N_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

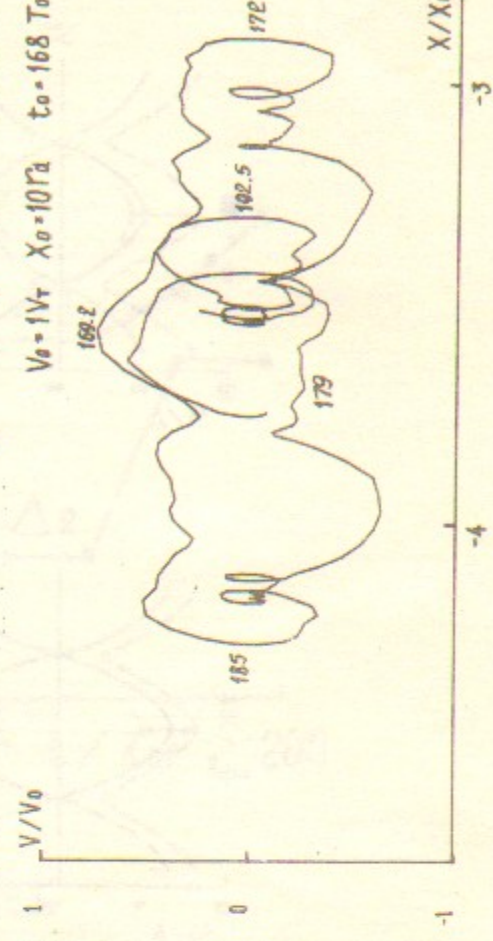


Рис. 17г. Группа Ib; $N = 7$; $X_0/\Gamma d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4, I$. В системе $N_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

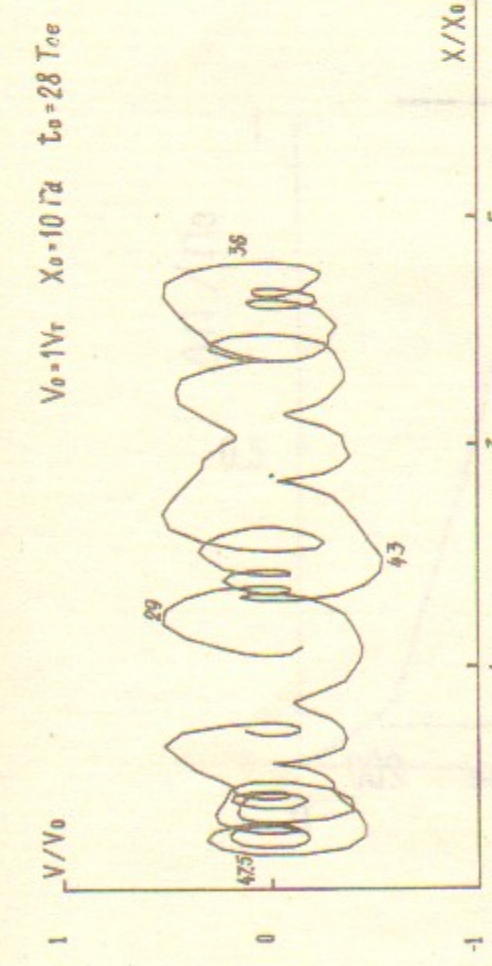


Рис. 18а. Группа Ib; $N = I$; $X_0/\Gamma d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4,622$. В системе $N_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

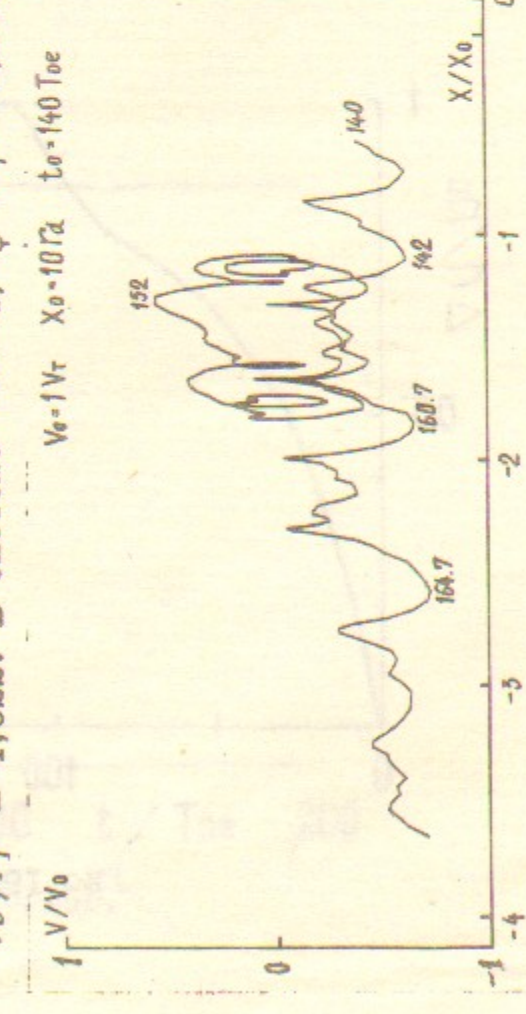


Рис. 18в. Группа Ib; $N = I$; $X_0/\Gamma d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4,622$. В системе $N_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

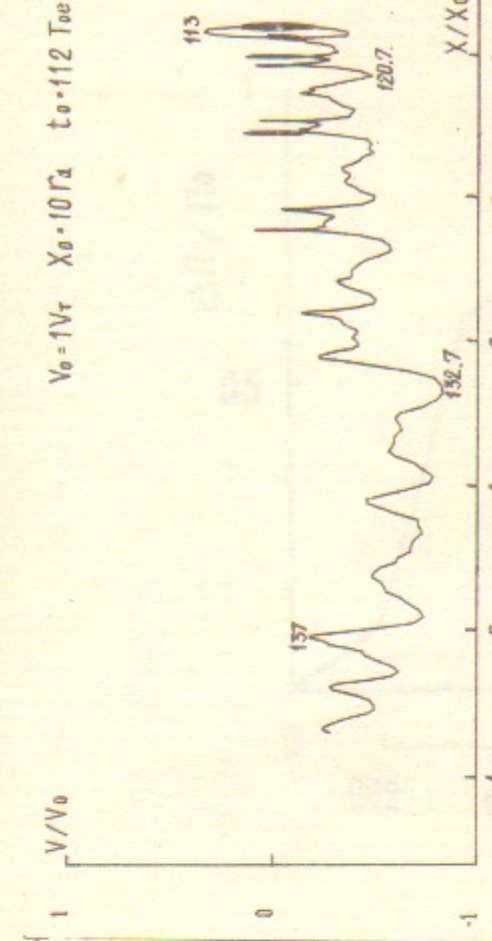


Рис. 18с. Группа Ib; $N = I$; $X_0/\Gamma d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4,622$. В системе $N_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

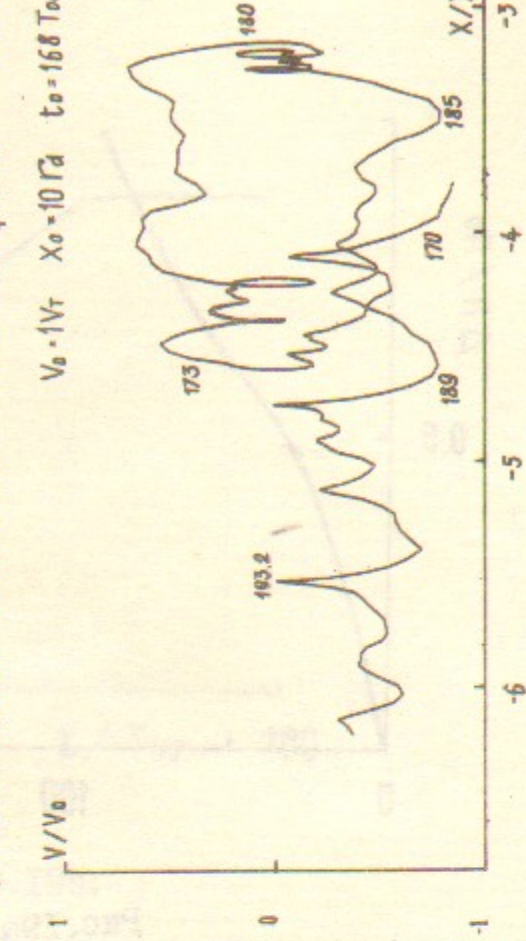


Рис. 18г. Группа Ib; $N = I$; $X_0/\Gamma d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4,622$. В системе $N_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

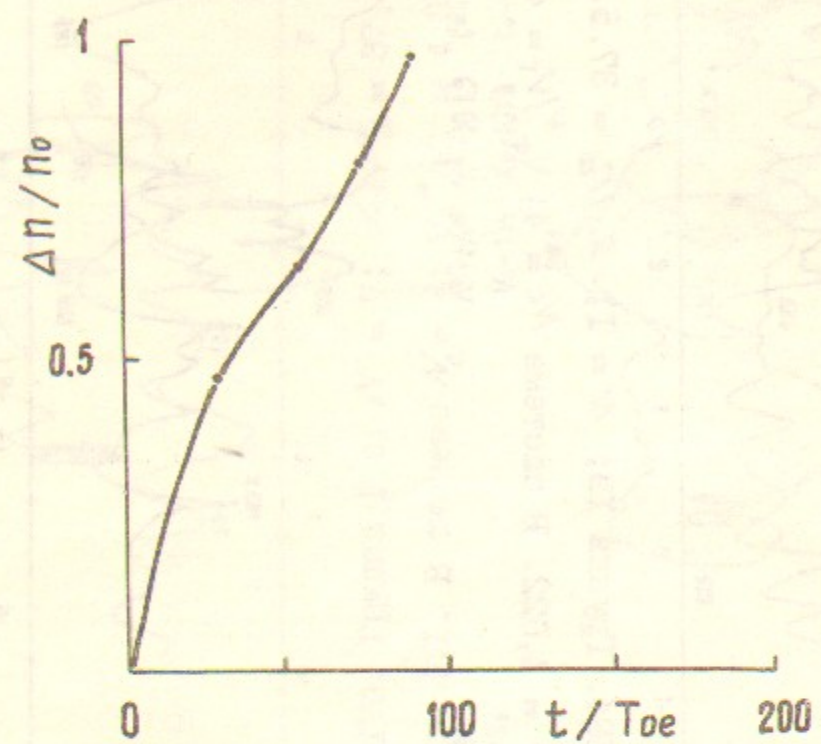


Рис. 19а.

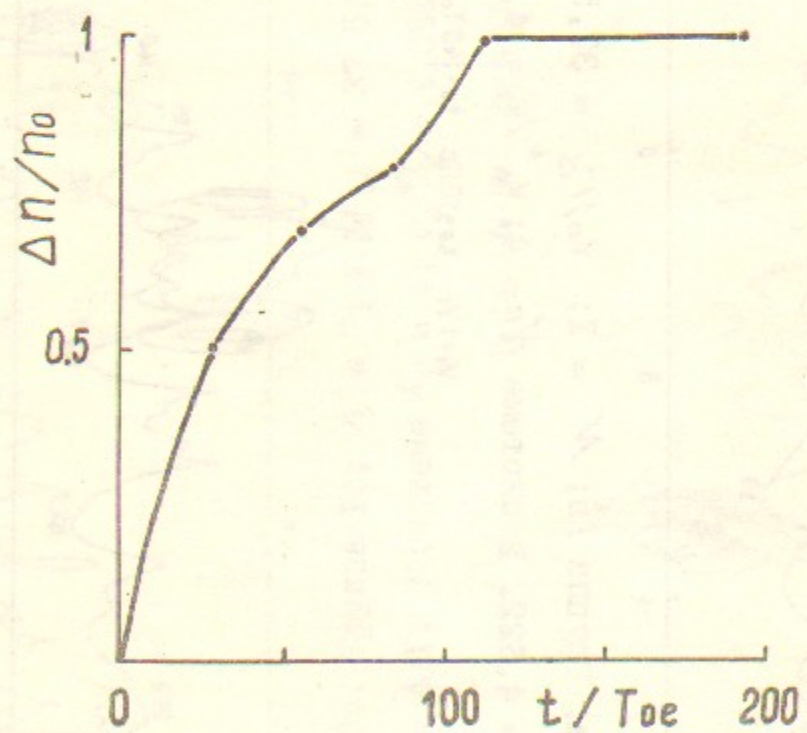


Рис. 19б.

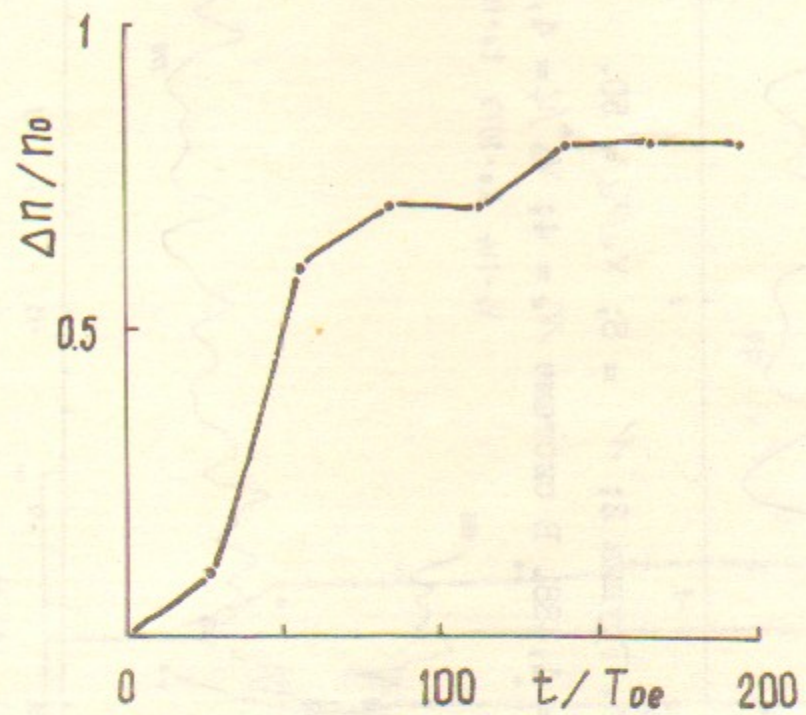


Рис. 19в.

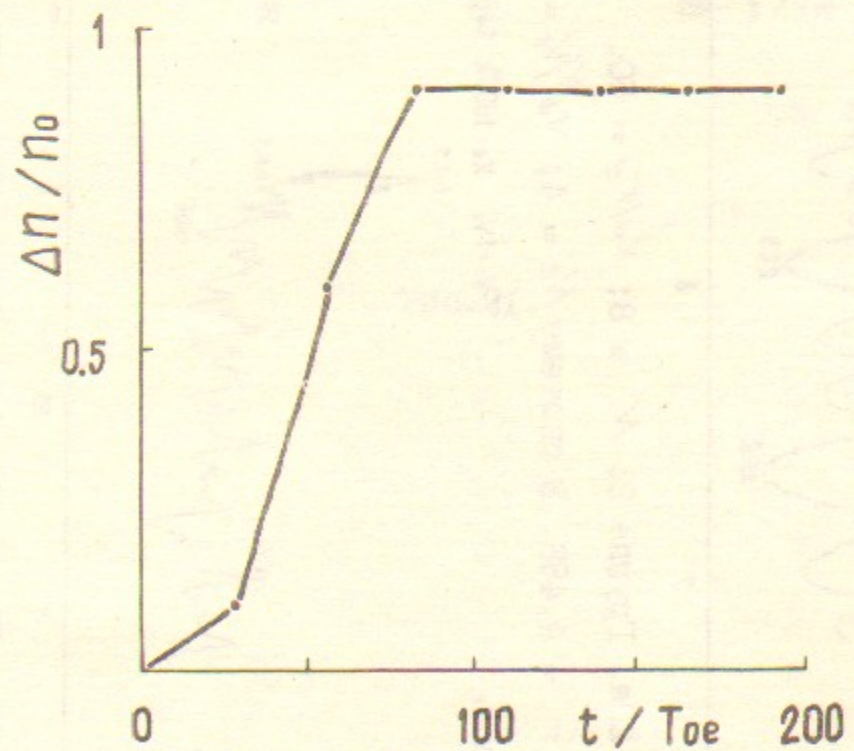


Рис. 19г.

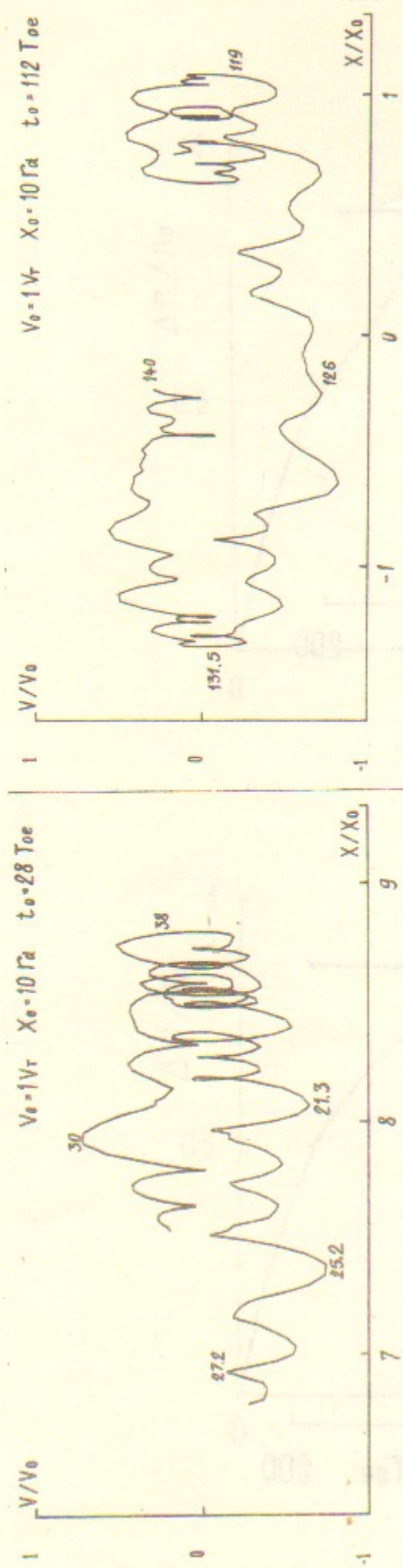


Рис.20а. Группа 2; $\mathcal{N} = 8$; $X_0/r_d = 50$.

$\mathcal{N}_e/V_T = 4,488$. В системе $\mathcal{N}_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

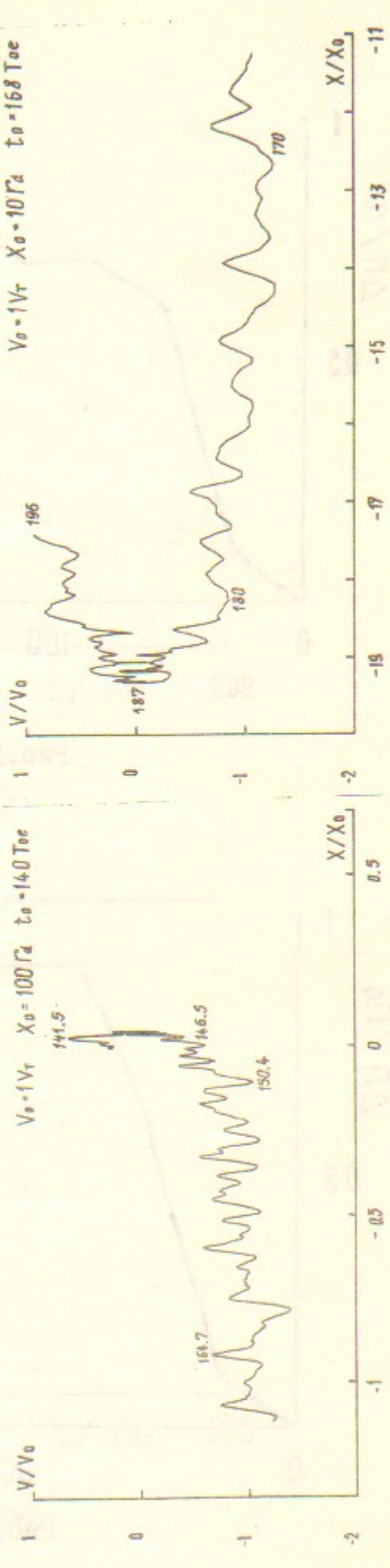


Рис.20в. Группа 2; $\mathcal{N} = 8$; $X_0/r_d = 50$.

$\mathcal{N}_e/V_T = 4,488$. В системе $\mathcal{N}_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

Рис.20б. Группа 2; $\mathcal{N} = 8$; $X_0/r_d = 50$.

$\mathcal{N}_e/V_T = 4,488$. В системе $\mathcal{N}_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

Рис.20г. Группа 2; $\mathcal{N} = 8$; $X_0/r_d = 50$.

$\mathcal{N}_e/V_T = 4,488$. В системе $\mathcal{N}_e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

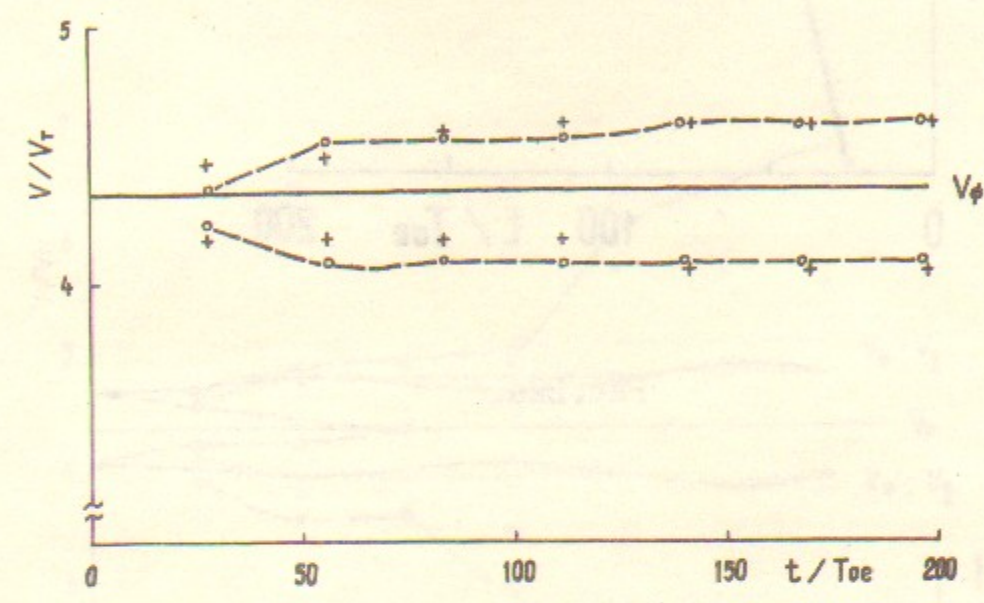


Рис.21.

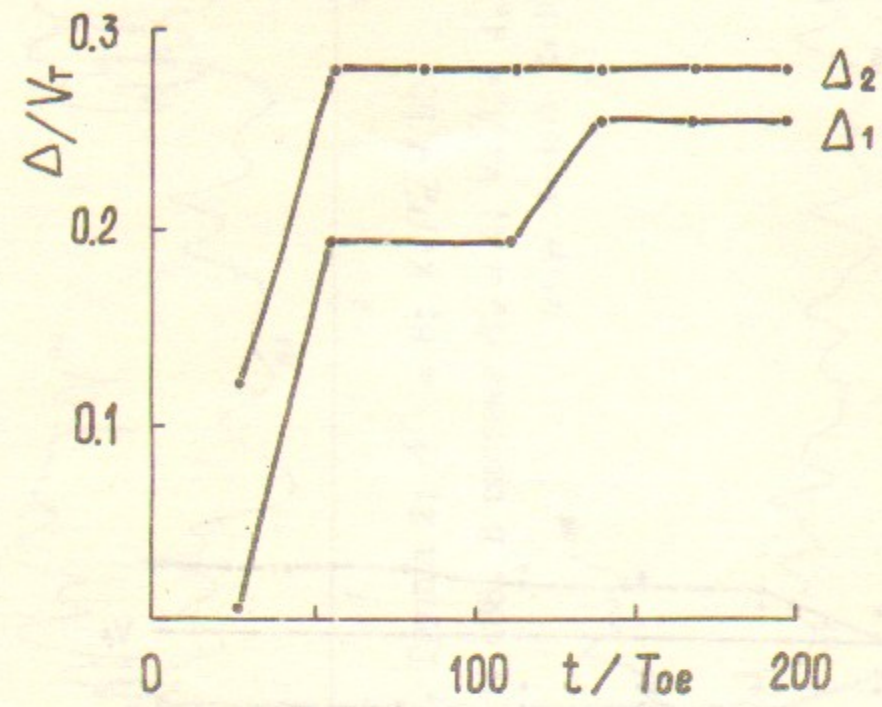


Рис. 22а.

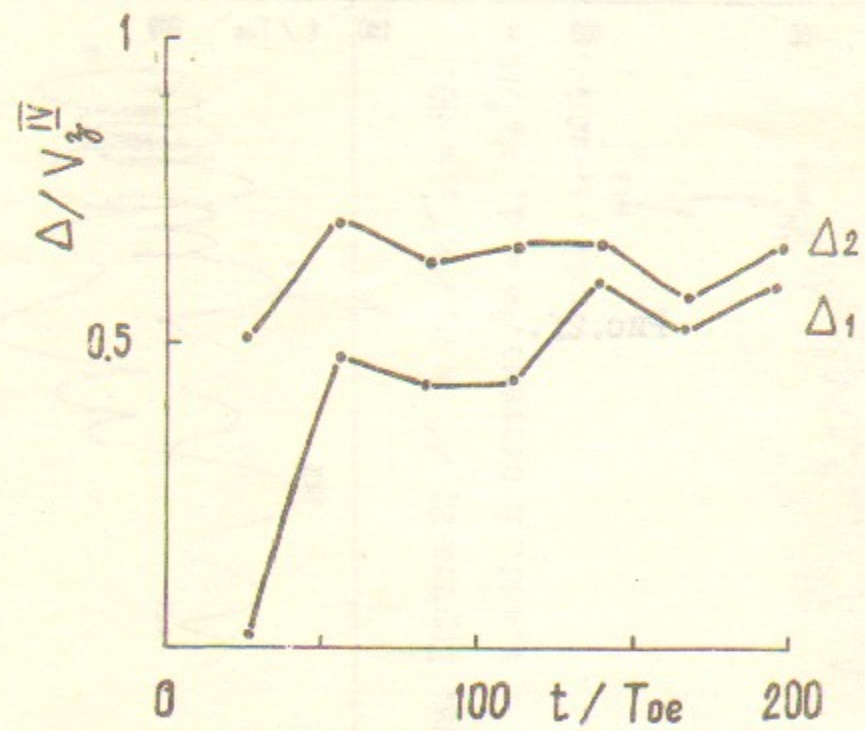


Рис. 22б.

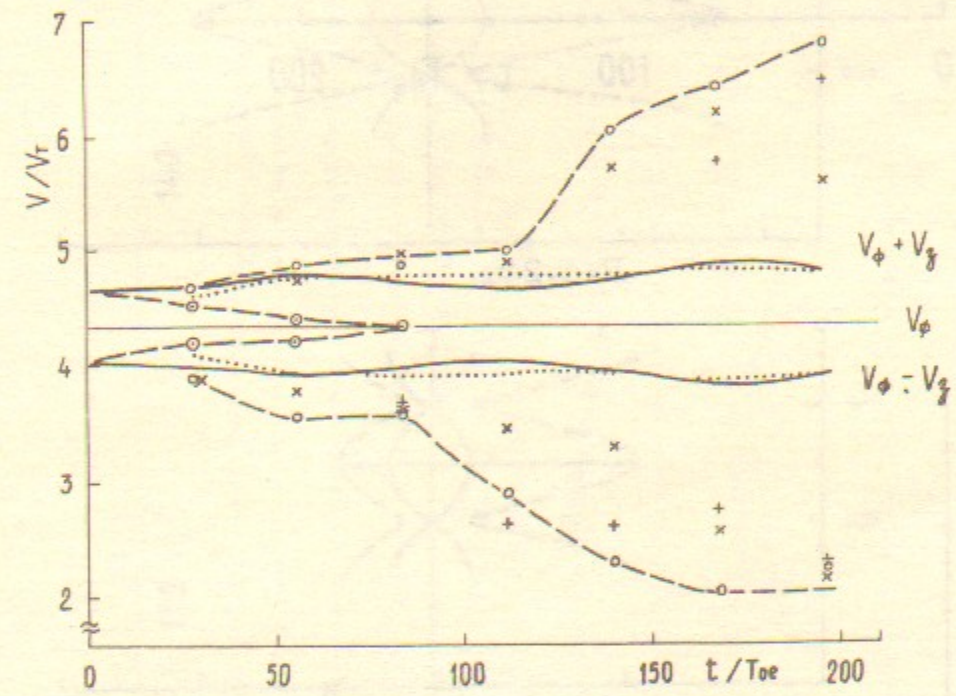


Рис. 23.

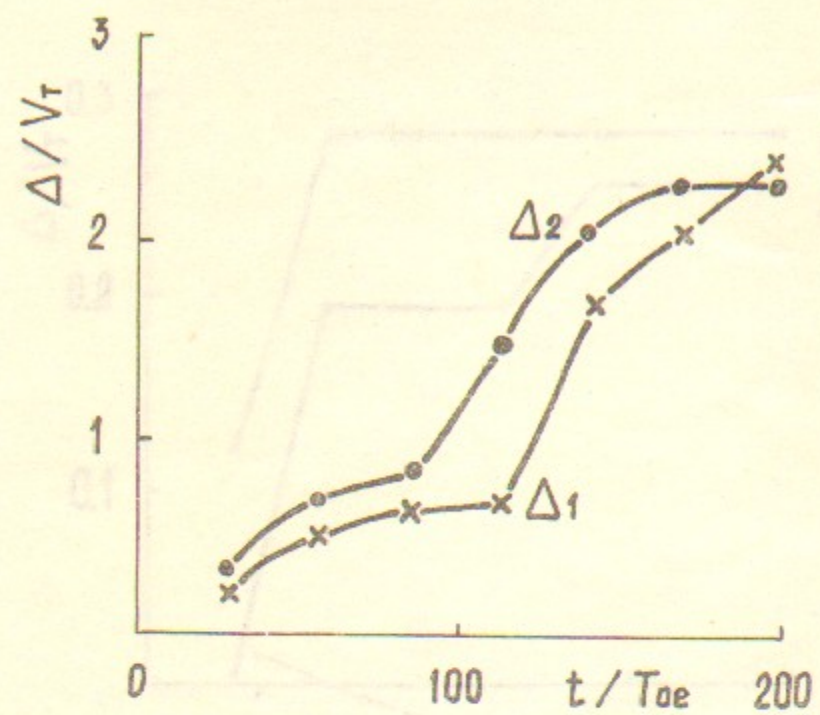


Рис.24а.

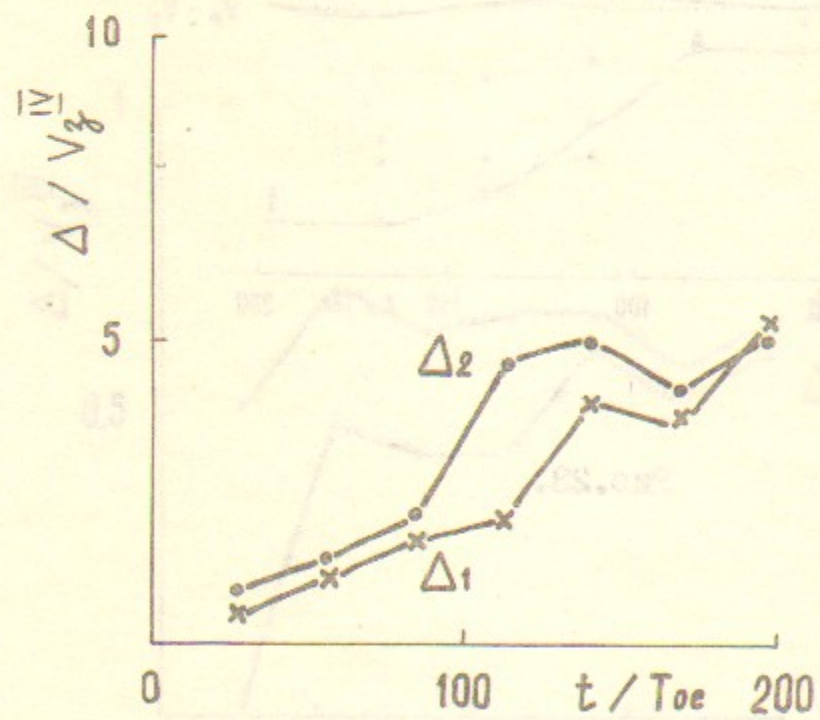


Рис.24б.

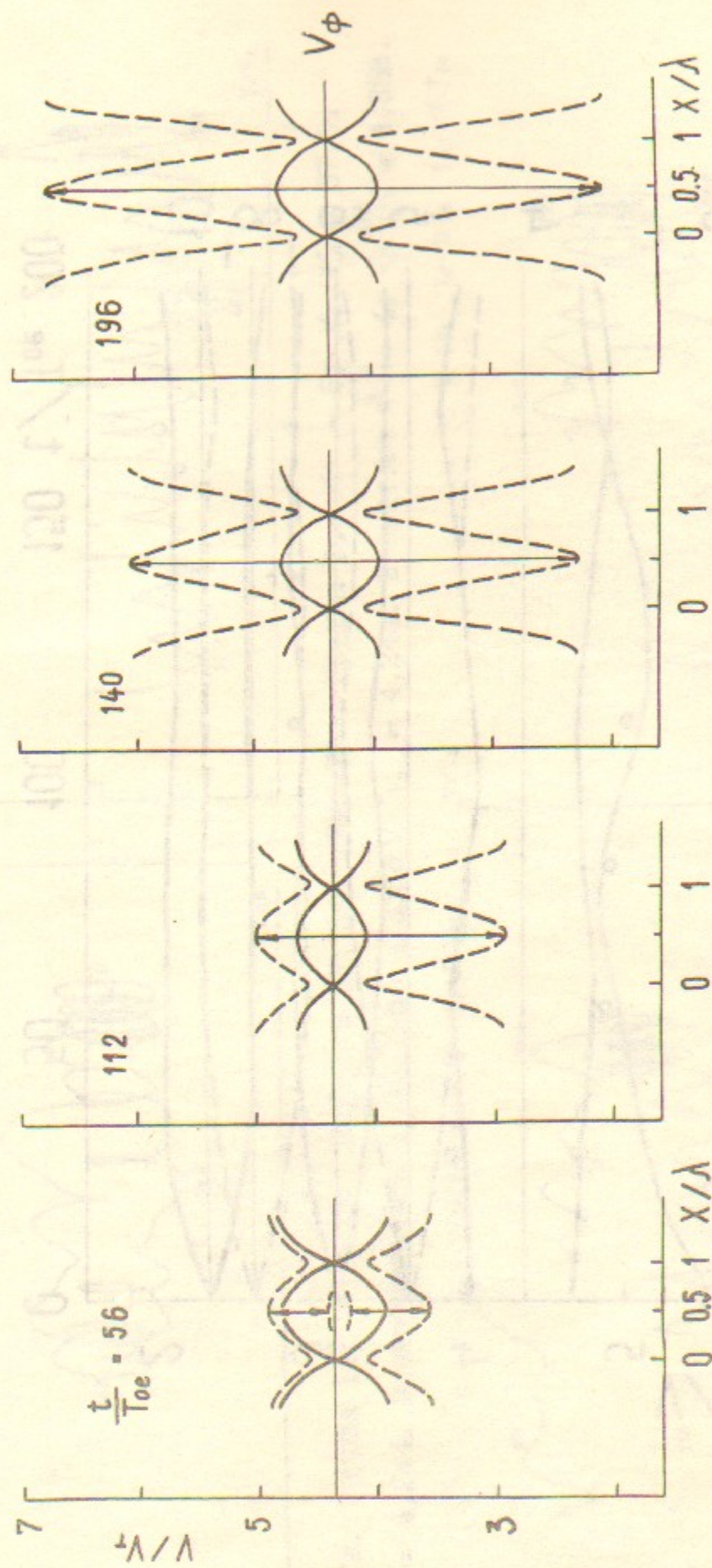


Рис.25а.

Рис.25б.

Рис.25в.

Рис.25г.

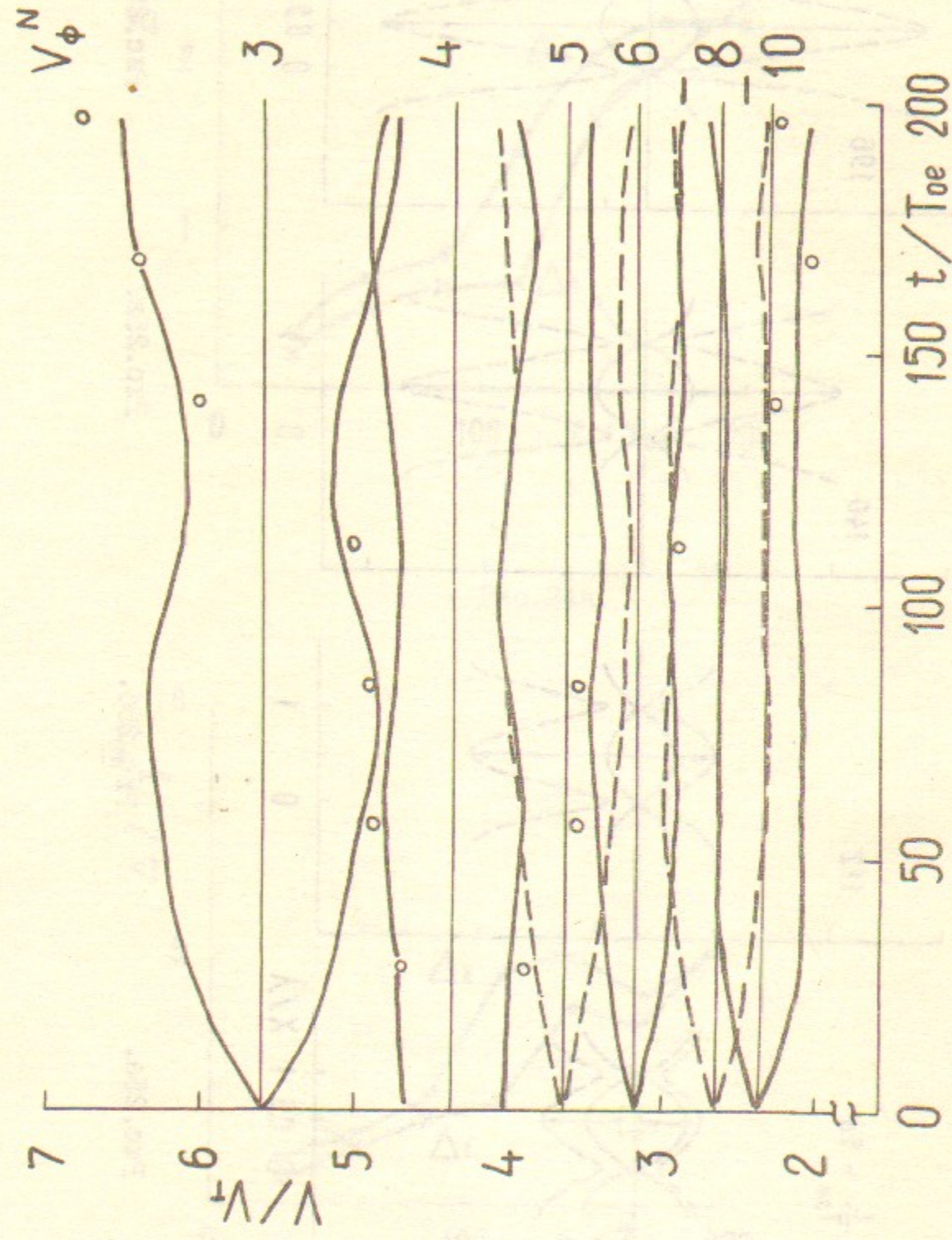


Рис. 26.

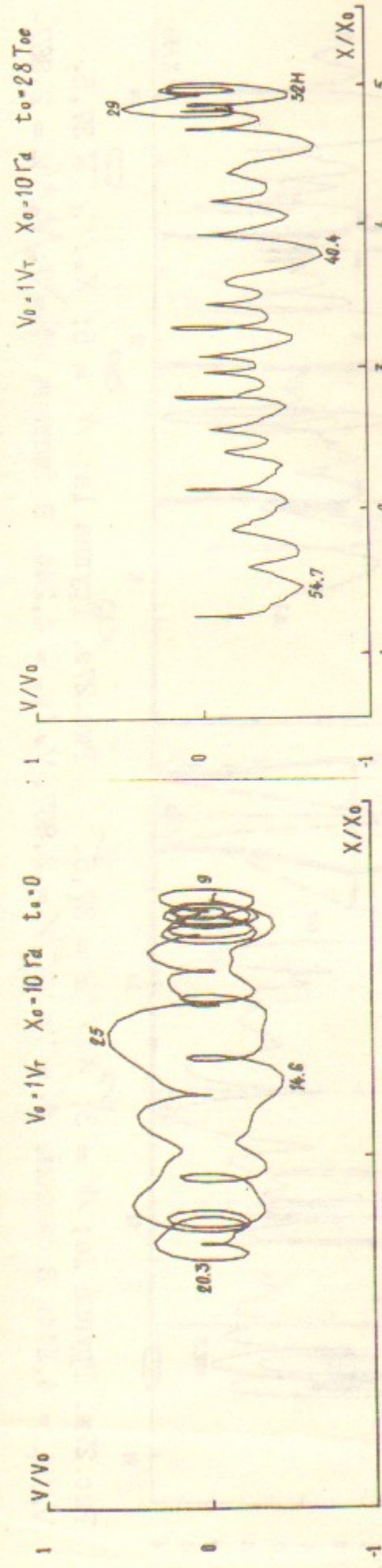


Рис. 27а. Группа Ia; $\mathcal{N} = 5$; $X_0/r_d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4,244$. В системе $\mathcal{N}e = 4$; $V_\phi^N/V_T = 4,358$.

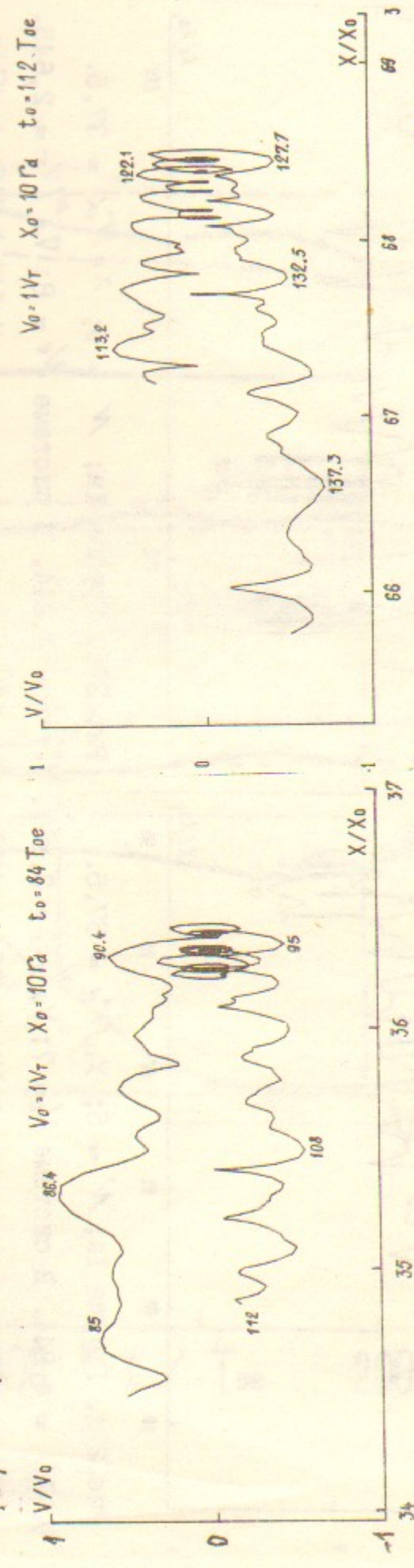


Рис. 27в. Группа Ia; $\mathcal{N} = 5$; $X_0/r_d = 37,5$.
 $V_0/V_T = 4,244$. В системе $\mathcal{N}e = 5$; $V_\phi^N/V_T = 3,638$.

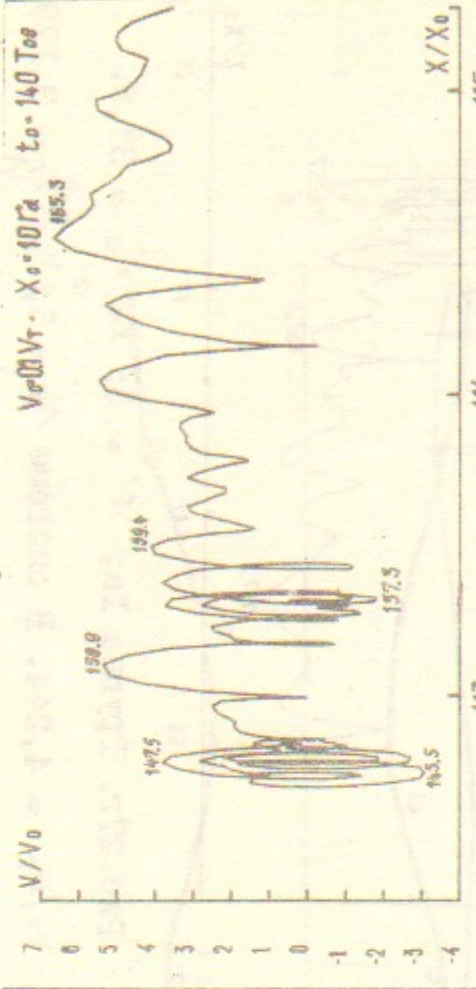


Рис.27д. Группа Ia; $N = 5$; $X_0/G_d = 37,5$.

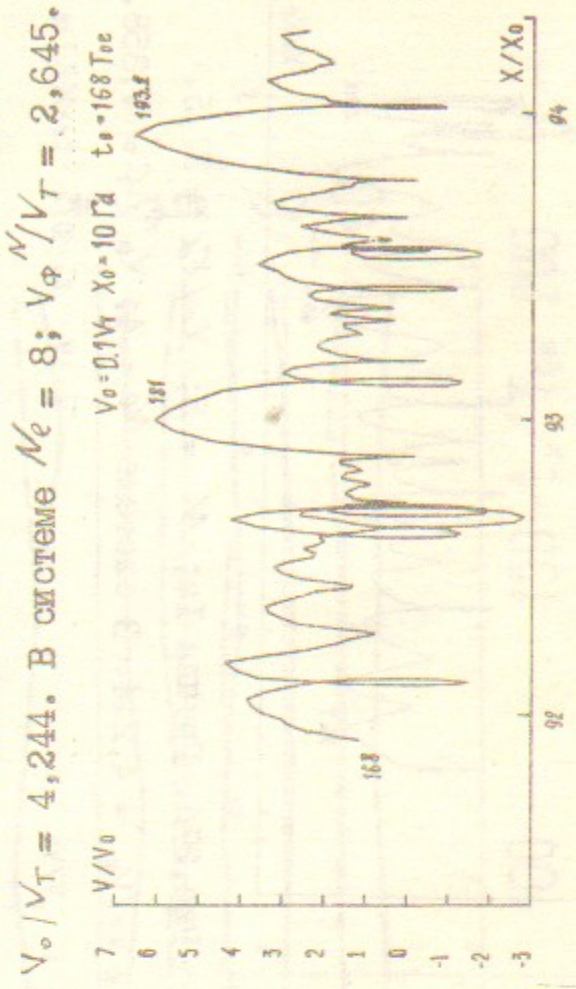


Рис.27е. Группа Ia; $N = 5$; $X_0/G_d = 37,5$.

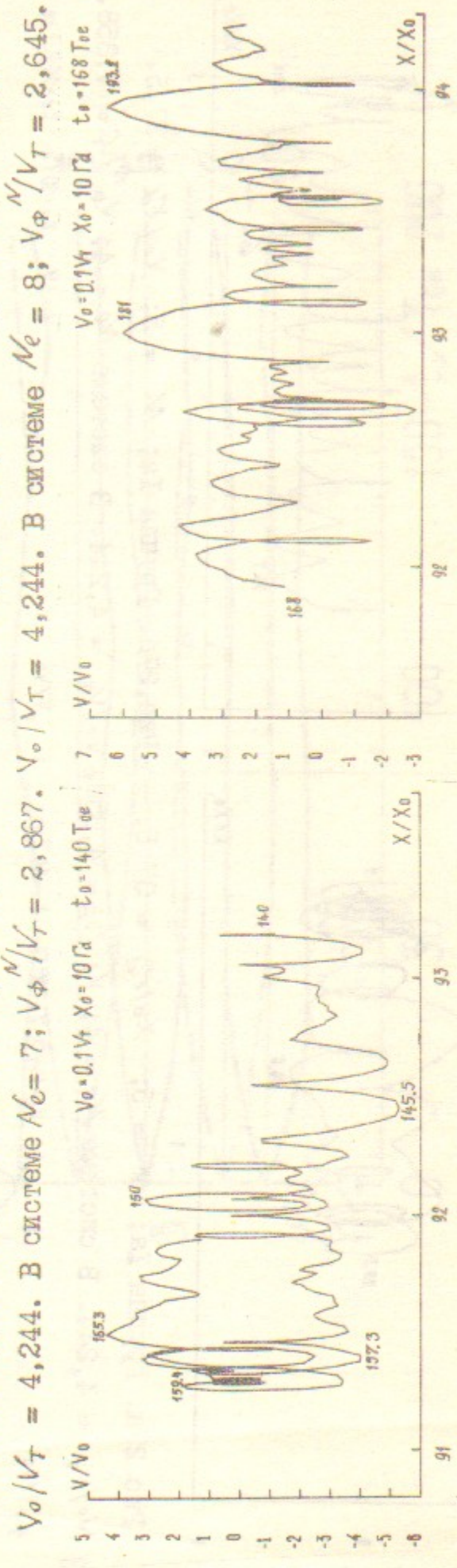


Рис.27ж. Группа Ia; $N = 5$; $X_0/G_d = 37,5$.

Рис.27з. Группа Ia; $N = 5$; $X_0/G_d = 37,5$.

Рис.27и. Группа Ia; $N = 5$; $X_0/G_d = 37,5$.

54

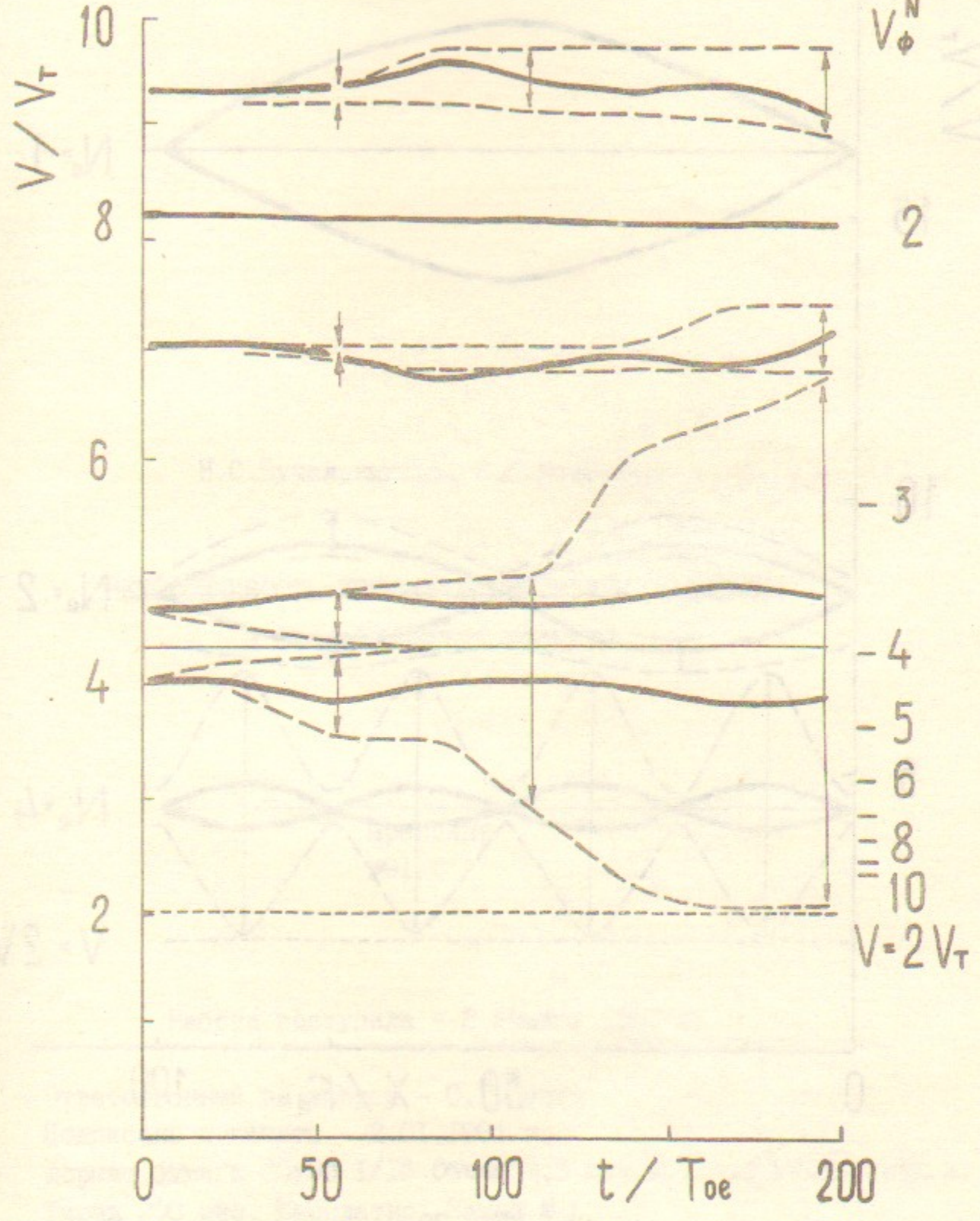


Рис.28.

55

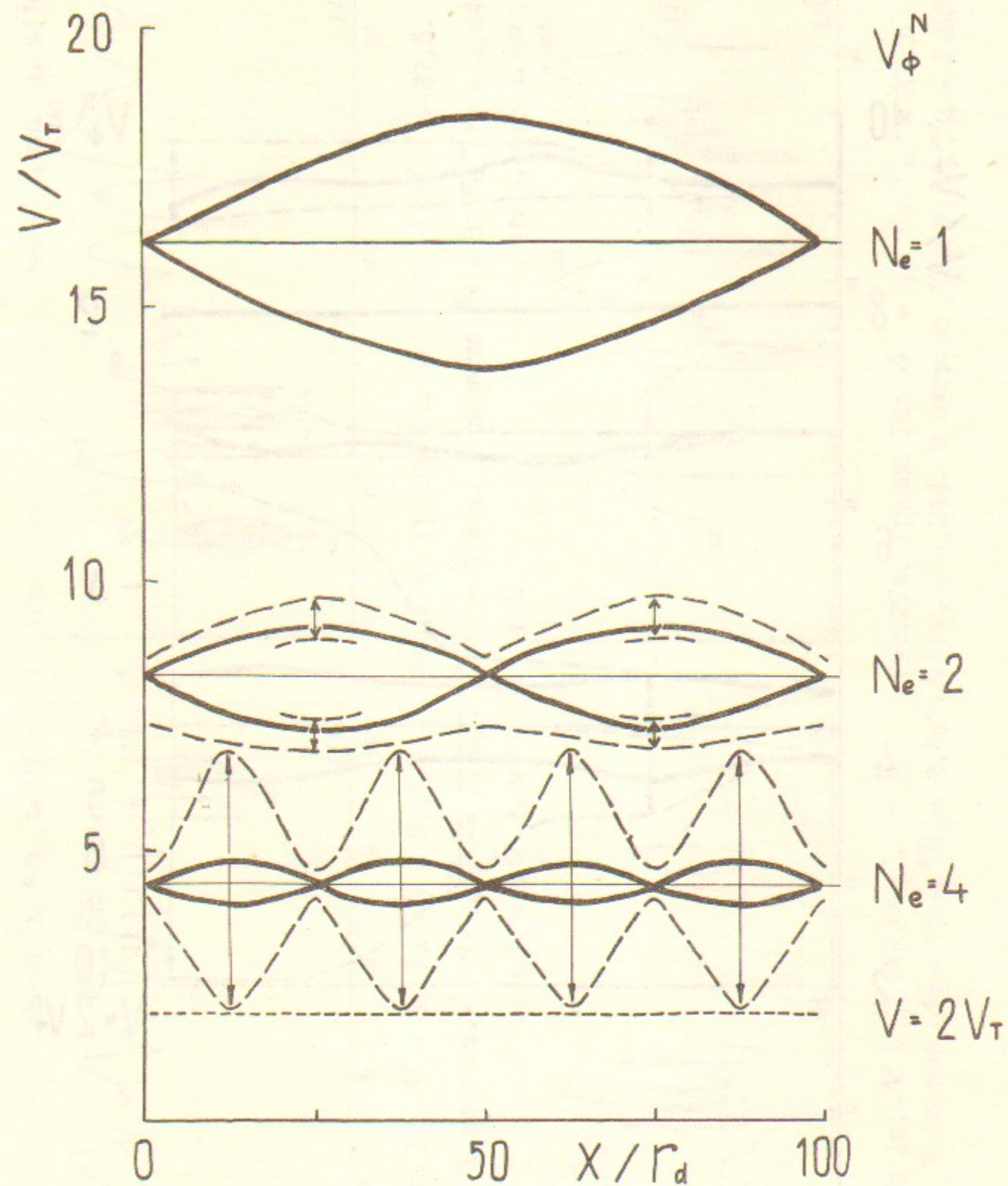


Рис.29.

Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин

НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ЛЕНГМЮРОВСКОЙ ВОЛНЫ. СОЛИТОНЫ
И СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Препринт
№91-1

Работа поступила - 2 января 1991 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати - 2.01.1991 г.

Формат бумаги 60x90 1/16 Объем 3,5 печ.л., 3,0 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 1.

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90