

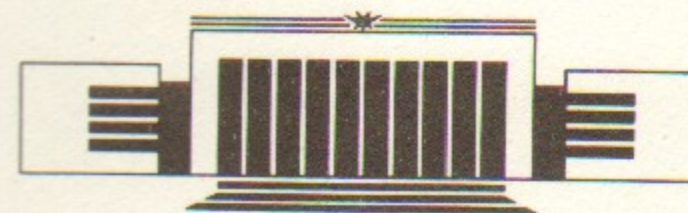


16
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ СО АН СССР

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

**РАЗВИТИЕ ИОННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ,
ДВОЙНЫЕ СЛОИ
И СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ**

ПРЕПРИНТ 90-24



НОВОСИБИРСК

РАЗВИТИЕ ИОННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ. ДВОЙНЫЕ СЛОИ
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 изучению движения электронов малой начальной энергии при развитии ионного возмущения, моделирующего конечную стадию модуляционной неустойчивости ленгмюровской волны, или возмущения, формирующегося при модуляционной неустойчивости ленгмюровской волны в однородной плазме.

Эволюция ионного возмущения ведет к периодическому изменению распределения потенциала и формированию двойных электрических слоев на фронтах возмущения. Изменение распределения приводит то к захвату электронов, то к выходу из захвата. Существенную роль играет также взаимодействие электронов с двойными слоями (ускорение, торможение или отражение электронов). Эти процессы приводят к стохастизации движения электронов.

THE EVOLUTION OF THE ION PERTURBATION. DOUBLE LAYERS AND
STOCHASTIC PHENOMENA

N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin

A b s t r a c t

The numerical experiments (PIC method) were made to study the motion of low initial energy electrons during the evolution of the ion perturbation, which models the final stage of the modulational instability of the Langmuir wave, or of the ion perturbation which is formed during the evolution of the modulational instability.

The evolution of the ion perturbation leads to the alteration of the potential distribution and to the temporal formation of the electric double layers on the edges of the perturbation. This leads alternately to the trapping and detrapping of the electrons. The essential role plays also the interaction of the electrons with the double layers (the acceleration, the deceleration or the reflection of the electrons). These processes lead to the stochastization of the electron motion.

РАЗВИТИЕ ИОННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ. ДВОЙНЫЕ СЛОИ
И СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ.

Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин

Ранее нами проводились численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию движения электронов при развитии нелинейных ионно-звуковых волн /1/ и при взаимодействии ленгмюровских волн с ионно-звуковыми /2/. Было найдено, что в обоих случаях развивается стохастическая неустойчивость движения электронов. Было показано, что причиной развития стохастической неустойчивости является возмущение движения электронов полем гармоник ленгмюровской волны /2/ и эффекты, связанные с ионными нелинейностями /1,2/. Одним из таких эффектов может быть модуляция амплитуды ионно-звуковой волны при движении захваченных электронов и ионов. Действительно, в работе /3/ для аналогичного случая нелинейной ленгмюровской волны было показано, что модуляция амплитуды волны при движении захваченных электронов приводит к стохастической неустойчивости движения электронов. В работах /1,2/ мы отмечали, что в развитие стохастической неустойчивости может дать вклад и другой эффект, связанный с ионной нелинейностью, — формирование двойных электрических слоев на фронтах нелинейных ионно-звуковых волн или других нелинейных ионных возмущений, например, обусловленных действием пондеромоторной силы при модуляционной неустойчивости ленгмюровских волн. Этот эффект и изучается в настоящей работе.

Формирование двойных электрических слоев при развитии ионного возмущения изучалось нами ранее в работе /4/. В этой работе, в частности, исследовалось развитие начального возмущения скорости $V(x)$ и плотности $\tilde{n}(x)$ ионов, моделирующего возмущение пондеромоторной силой на конечной стадии модуляционной неустойчивости — коллапса после затухания поля ленгмюровских волн (/4/, случай I-0), а также развитие ионного возмущения, формирующегося при модуляционной неустойчивости ленгмюровской волны в однородной плазме (/4/, случай I-I и др.). Было показано, что развитие этих возмущений сходно с развитием нелинейных стоячих волн /5/ и имеет периодический характер. Характерной чертой этого процесса является периодическое формирование расходя-

щихся фронтов скорости и плотности — бесстолкновительных ударных волн. На этих фронтах на длине порядка нескольких дебаевских радиусов r_d возникает скачок потенциала и концентрируется электрическое поле, то есть формируется двойной электрический слой. Фронты движутся навстречу друг другу к центру начальной впадины плотности. После их встречи процесс повторяется в другой фазе возмущения.

В настоящей работе рассмотрены траектории движения электронов на фазовой плоскости при развитии ионного возмущения в случаях I-0 и I-I в течение более длительного времени, чем в работе /4/. Найдено, что характер траекторий определяется захватом электронов в область положительного потенциала во время встречи фронтов и взаимодействием частиц с двойными слоями при формировании и движении фронтов. Взаимодействие с двойным слоем приводит к ускорению, торможению или отражению частиц. На их траекториях это взаимодействие проявляется в виде скачка скорости, который происходит за время $\Delta t/T_{oe} \sim I-2$ ($T_{oe} = \frac{2\pi}{\omega}$) на расстоянии порядка дебаевского радиуса r_d ($\Delta x/r_d \sim I-2$, очень редко 3-4). Скачки скорости такого типа на траекториях электронов наблюдались нами на стадии развития стохастической неустойчивости движения электронов в работах /1,2/. Это показывает, что нестационарные двойные слои формируются и в случаях, рассмотренных в работе /1,2/, и подтверждает гипотезу о существенной роли двойных слоев при развитии стохастической неустойчивости движения электронов.

В настоящей работе анализ поведения групп частиц с малыми начальными скоростями $v^0/v_T \ll | \pm 1 |$ и с близкими начальными координатами x_0, v^0 на фазовой плоскости показывает, что частицы разбрасываются по фазовой плоскости. Анализ траекторий частиц с близкими x_0, v^0 показывает, что траектории различаются и расходятся на фазовой плоскости. Частицы то захватываются, то становятся пролетными, то ускоряются, тормозятся или отражаются в двойных слоях через случайные промежутки времени. Таким образом, и в случае I-0, и в случае I-I движение электронов приобретает черты стохастического движения. Существенную роль при этом играет взаимодействие электронов с двойными слоями.

Как мы уже отмечали, рассматриваемое в настоящей работе в случае I-0 начальное ионное возмущение моделирует возмущение $\tilde{v}(x) - \tilde{n}(x)$ на конечной стадии модуляционной неустойчивости

— коллапса ленгмюровской волны. В случае I-I ионное возмущение развивается в результате модуляционной неустойчивости — коллапса ленгмюровской волны. Обнаруженная в настоящей работе стохастизация движения электронов при развитии этих возмущений свидетельствует о том, что при развитии ионного возмущения на конечной стадии модуляционной неустойчивости — коллапса ленгмюровских волн развивается стохастическая неустойчивость движения электронов малой начальной энергии.

Численный эксперимент проводился 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 ($N^e = N^i = 10^4$) функции распределения обрезаны на $v \sim \pm 2v_T$.

В случае I-0 в начальный момент времени задаются возмущения плотности и скорости ионов, те же, что в случае I-0 в работе /4/. Задается квазинейтральное возмущение плотности $\tilde{n}_i(x) = \tilde{n}_e(x)$ с длиной волны $\lambda/r_d = 50$ и амплитудой $\tilde{n}/n_0 = 0,5$ и возмущение скорости ионов $\tilde{v}_i(x)$ с такой же длиной волны $\lambda/r_d = 50$ и амплитудой $\tilde{v}/c_s = 1,2$ ($c_s = \sqrt{T_e/M}$). Фазы $\tilde{n}(x)$ и $\tilde{v}(x)$ отличаются на $\Delta x = \lambda/4$ (Рис.1).

В случае I-I также как в случае I-I в работе /4/, в однородной плазме ($\tilde{n}_i(x) = \tilde{v}_i(x) = 0$) задается стоячая ленгмюровская волна с параметрами $\lambda/r_d = 100$; $V_0/v_T = 16$; $E_0/(mr_d/eT_{oe}) = 70,4$; $E_0^2/8\pi nT = 1,6$.

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 в случае I-0 (v^0 — невозмущенная скорость электронов) приведены в таблице 1 и показаны на Рис.1. На Рис.1 показана также сепаратриса, ограничивающая область захвата электронов в стоячей ионно-звуковой волне с амплитудой и фазой начального возмущения плотности $\tilde{n}(x)$. Начальные координаты пробных частиц в случае I-I приведены в таблице 2.

При исследовании движения электронов изучаются траектории движения пробных частиц или электронов на фазовой плоскости

Таблица 1

Начальные координаты пробных частиц. Случай I-0.
Узлы сепаратрисы в $t = 0$. $x_1/r_d = 25$; $x_2/r_d = 75$;
 $V_{\phi}^i/V_T = \pm 0,09922$.

Группа	1	2	3	4
Δn	100	100	100	100
v^0/V_T	0	-0,159+0,156	-0,159+0,156	0
x_0/r_d	0-100	75	50	56-68
N	I-9	I-9	I-9	I-4; 5-9
x_0^N/r_d	25-75	75	50	57,2-60,8; 62,46+67,04

Δn - число частиц в группе; v^0 - начальная невозмущенная скорость; x_0, x_0^N - начальные координаты частиц в группе и частиц с траекториями; N - номер траектории.

Таблица 2

Начальные координаты пробных частиц и электронов.
Случай I-1.

Группа	Δ	v^0/V_T	x_0/r_d	N	x_0^N/r_d
1	9(эл-ны)	0	58-67	I-3,4-9	58-60,62-67
2	100	(-1)-(+1)	50	I-9	(-1)-(0,98)

Группа 2. Траектории:

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
v_0/V_T	-1,0	-0,50	-0,159	-0,078	0,0	0,080	0,160	0,50	0,98

(траектории выводятся для девяти частиц в группе), - а также поведение групп пробных частиц (100 частиц) на фазовой плоскости. Отметим, что по техническим причинам траектория данной частицы выводится отдельными частями с интервалами времени $\Delta t/T_{oe} \sim 28$ ($t/T_{oe} \sim 0-28; 28-56$ и т.д.). В каждом интервале траектория строится в своих координатах x, v . Начальные для интервала моменты времени t_0 приведены на рисунках. На траекториях указывается время t/T_{oe} (цифра показывает момент t/T_{oe} , когда частица имеет данные x и v). Отметим также, что на рисунках траекторий приведена "развернутая" шкала $x - X = x'' - \alpha \mathcal{L}$ ($\alpha = 1, 2, 3, \dots; \mathcal{L}/r_d = 100$). При использованных нами периодических граничных условиях " $x'' \pm \alpha \mathcal{L} = x''$ ", однако, для траекторий мы учитываем, что частица, пересекающая $x/r_d = 100$ со скоростью $v > 0$, переходит в область $x/r_d > 100$, а частица, пересекающая $x/r_d = 0$ с $v < 0$, переходит в область $x/r_d < 0$. Другие рисунки ($\tilde{n}(x), \psi(x), E(x)$, фазовые плоскости) соответствуют периодическим граничным условиям. Напомним, что при периодических граничных условиях частица, пересекающая $x/r_d = 100$ с $v > 0$, переходит в область $x/r_d > 0$, а частица, пересекающая $x/r_d = 0$ с $v < 0$ переходит в область $x/r_d < 100$.

Развитие начального возмущения $\tilde{n}(x) + \tilde{v}(x)$ с заданными параметрами (случай I-0) рассматривалось ранее в работе /4/ (стр. II, Рис. 6). Мы частично повторим это описание и рассмотрим развитие в течение более длительного времени. На Рис. 2, 3 показаны фазовые плоскости ионов и распределение плотности, потенциала и электрического поля в разные моменты времени (в $t/T_{oe} > 40$ приведено только $\tilde{n}(x)$, которое, по существу, содержит всю информацию о $\psi(x)$ и $E(x)$). Из Рис. 2, 3 видно, что максимум возмущения плотности на начальной стадии нарастает и к $t/T_{oe} \sim 8$ достигает максимальной величины. Амплитуда $\tilde{v}(x)$ в это время минимальна, но по фазовой плоскости четко видно образование фронтов скорости. В $t/T_{oe} > 8$ амплитуда $\tilde{v}(x)$ начинает возрастать, а фронты скорости расходятся. По Рис. 3 видно, что в области фронтов скорости формируются фронты плотности, то есть на краях впадин плотности формируются бесстолкновительные ударные волны, движущиеся к центру впадин. В области фронта плотности на длине в несколько дебаевских радиусов r_d возникает

скачок потенциала и концентрируется электрическое поле, т.е. на фронте образуется двойной электрический слой. Поле между фронтами близко к нулю.

Фронты сближаются ($t/T_{oe} > 12$) и в $t/T_{oe} \sim 28$ встречаются, причем максимумы плотности оказываются на месте прежних впадин. Далее вновь формируются и начинают расходиться фронты скорости, плотности и потенциала ($t/T_{oe} \approx 30$) и картина повторяется. Отличие от первого цикла заключается в том, что амплитуда $\tilde{V}(x)$, $\tilde{n}(x)$ несколько падает в результате поглощения энергии при ускорении части ионов. Из Рис.2 видно, что ионы начинают ускоряться на фронтах в $t/T_{oe} \approx 20$. В работах /4,5/ показано, что ускорение ионов происходит в двойном слое.

Новая встреча фронтов происходит в $t/T_{oe} \sim 72$ на месте начальных максимумов плотности. После встречи фронтов начинается новый цикл - вновь формируются и расходятся фронты и т.д. Еще одна встреча фронтов происходит в $t/T_{oe} \sim 105$.

Прежде чем перейти к рассмотрению траекторий пробных частиц, напомним результаты работы /4/. В этой работе исследовалось поведение на фазовой плоскости группы пробных частиц (электронов) с $v^0 = c_s$ и $x_0/r_d \sim 0-100$ ($c_s = \sqrt{Te/M}$). Было показано, что в $t/T_{oe} \sim 8-28$ электроны захватываются в область положительного потенциала $\varphi(x) > 0$ (здесь и далее мы будем употреблять слова "область положительного потенциала", имея в виду область между минимумами потенциала). На фазовой плоскости электроны образуют структуры типа вихрей в фазовом пространстве (phase-space electron vortices). При движении фронтов область $\varphi(x) > 0$ расширяется. Электроны в $t/T_{oe} < 28$ продолжают двигаться в этой области, отражаясь в двойных слоях на ее границах. После встречи фронтов в $t/T_{oe} \approx 28$ часть пробных частиц оказывается вне области положительного потенциала.

Такая картина подтверждается анализом траекторий пробных частиц групп I-3, показанных на Рис.4-14. Действительно все траектории частиц группы I и 3 и почти все траектории группы 2 (кроме крайних по v^0 в группе 2) указывают на их захват в область положительного потенциала около $x \sim 50$ (Рис.4а,в;5а;6а,г;7а;8а;9а,г;10а) или $x \sim 100$ (Рис.11а,г;12а,в) в $t/T_{oe} \leq 10-12$. Траектории частиц группы 3 близки к траектории Рис.6а. Крайние по v^0 в группе 2 частицы остаются пролетными (Рис.13, 14). В $t/T_{oe} > 10-15$ траектории меняют свой характер: в области,

где нет поля, частицы движутся с постоянной скоростью, а в области двойного слоя на фронте ускоряются или тормозятся. В $t/T_{oe} \approx 28$ некоторые частицы оказываются захваченными около $x/r_d \sim 25$ или 75 (Рис.5б,7б,9б), некоторые в течение какого-то времени остаются пролетными (Рис.4б,г;6б;7г;8б;10б;11б;12г), а некоторые отражаются в области встречи фронтов (Рис.12б). С течением времени траектории захваченных частиц меняют свой характер также как в первом цикле. В момент следующей встречи фронтов в $t/T_{oe} \sim 72$ и в $t/T_{oe} \approx 72$ часть этих частиц захватывается около $x/r_d \sim 0, 50$ или 100 (Рис.5в,г (начальная часть траектории Рис.5г близка к Рис.5а,б); 7в;9в), а часть становится пролетными. Судьба частиц, оставшихся пролетными после первого цикла, также различна. Некоторые из них так и остаются пролетными (Рис.4а,б;4в,г;11г), некоторые вновь захватываются (Рис.8в), а некоторые отражаются (ускоряются или тормозятся), попадая в соответствующий двойной слой (Рис.6б,в;8г;10в;11б,в;12г).

Нас особенно интересовали особенности траекторий частиц, взаимодействующих с двойным слоем. Анализ траекторий показывает, что при взаимодействии частицы с двойным слоем траектория имеет характерный вид скачка скорости, причем частица ускоряется, тормозится или отражается за время $\Delta t/T_{oe} \sim 1-2$. Характер изменения скорости частицы при ее взаимодействии с двойными слоями наглядно виден на Рис.13,14. На этих рисунках показаны траектории пролетных частиц из группы 2 и поле E_N , действующее на частицу в данный момент времени на данном x . Напомним, что фронты и двойные слои формируются в $t/T_{oe} > 8$ (Рис.3). Из Рис.13,14 видно, что скорость частицы изменяется скачком, когда она проходит область двойного слоя - пика $E(x)$.

Для других частиц скачки скорости такого типа наблюдаются на тех участках траектории, где частица является пролетной (Рис.4б,г; 6б,в;7г;8б;10б,г;11б;12г). Кроме того наблюдается отражение частицы (ускорение или торможение с изменением знака скорости) в двойном слое (Рис.4в;5б,в;6б,в,г;8а,б;9а-в;10в; 11а-в;12а-г). Был проведен анализ скачков скорости разных типов и сопоставлено время и место x/r_d такого скачка с положением двойного слоя (пика $E(x)$, фронта $\tilde{n}(x)$, $\varphi(x)$) в тот же момент времени. Например, на траектории Рис.8а-в в первый скачок скорости наблюдается в $t/T_{oe} \sim 13-14$ на $x/r_d \sim 62$ (Рис.8а). В это время фронт волны и двойной слой (максимум $E(x)$) находят-

ся на $x/r_d \sim 61-62$ (Рис.3) и поле $E > 0$ тормозит электроны. Второй скачок скорости наблюдается в $t/T_{oe} \sim 19-20$ на $x/r_d \sim 32$ (Рис.8а), а слой (минимум $E(x)$) находится на $x/r_d \sim 32-30$ и $E < 0$ ускоряет электроны. В $t/T_{oe} \sim 28-48$ частица является пролетной. В $t/T_{oe} \sim 30-31$ она ускоряется на $x/r_d \sim 72-76$, а в $t/T_{oe} \sim 31-32$ тормозится на $x/r_d \sim 76-82$. Именно здесь в $t/T_{oe} \sim 30-32$ находятся новые слои, сформировавшиеся после встречи фронтов в $t/T_{oe} \sim 28$ (Рис.3). В $t/T_{oe} \sim 44-45$ частица опять ускоряется на $x/r_d \sim 112-116$, где в это время находится слой $E < 0$. В $t/T_{oe} \sim 48-50$ частица отражается - на траектории виден скачок скорости на $x/r_d \sim 138-140$ (Рис.8б). Двойной слой (максимум $E(x)$) в это время находится на $x/r_d \sim 137-139$ и $E > 0$ тормозит электроны. На Рис.3 этот максимум находится на $x/r_d \sim 37-39$, т.к. из-за периодических граничных условий $x \pm \alpha \cdot 100$ ($\alpha = 1, 2, 3, \dots$) эквивалентно x . В $t/T_{oe} > 70$ эта частица захватывается около $x \sim 0$ (Рис.8в).

Частица Рис.5а-в вначале захвачена, затем отражается в $t/T_{oe} \sim 14-15$ на $x/r_d \sim 60-61$, становится пролетной с $v < 0$ (Рис.5а), затем захватывается около $x/r_d \sim 25$ и опять отражается в $t/T_{oe} \sim 41-42$ на $x/r_d \sim 33-34$ (Рис.5б), в $t/T_{oe} \sim 45-46$ на $x/r_d \sim 15-17$ (Рис.5б), в $t/T_{oe} \sim 53-54$ на $x/r_d \sim 40-41$ (Рис.5б), в $t/T_{oe} \sim 61-62$ на $x/r_d \sim 4-5$ (Рис.5в). В $t/T_{oe} > 75$ частица вновь захватывается около $x/r_d \sim 55$. Сопоставление t и x скачка скорости с положением двойного слоя (максимума или минимума $E(x)$) в тот же момент времени показывает, что они совпадают.

То же самое наблюдается и с частицами, которые после выхода из захвата становятся пролетными. Мы уже отмечали такой случай на Рис.8б. Другим примером может служить частица Рис.6а-в с $v^0 \sim 0$ и $x_0 \sim 50$ вблизи центра области захвата. Эта частица вначале захвачена, затем отражается в $t/T_{oe} \sim 11-12$ в слое на $x/r_d \sim 49$ и в $t/T_{oe} \sim 22-23$ на $x/r_d \sim 53$ (Рис.6а), а затем в $t/T_{oe} > 28$ становится пролетной. В $t/T_{oe} \sim 49-50$ частица ускоряется в двойном слое на $x/r_d \sim 64-62$, а в $t/T_{oe} \sim 54-56$ отражается в слое на $x/r_d \sim 90-91$ (Рис.6б). В $t/T_{oe} \sim 56-62$ частица пролетная с $v < 0$, а в $t/T_{oe} \sim 63-64$ она отражается в слое на $x/r_d \sim 54-56$ и снова становится пролетной с $v > 0$ (Рис.6в).

Частица из группы 2 Рис.11а-в отражается в $t/T_{oe} \sim 17-18$ в слое на $x/r_d \sim 120$ (20), становится пролетной с $v < 0$ (Рис.11а), в $t/T_{oe} \sim 31-32$ и $32-33$ тормозится и ускоряется в слоях на

$x/r_d \sim 30-25$ и $25-20$ в районе встречи фронтов, снова тормозится в $t/T_{oe} \sim 43-44$ на $x/r_d \sim - (14-17)$ отражается в $t/T_{oe} \sim 47-48$ на $x/r_d \sim - 35(65)$, в $t/T_{oe} \sim 54-55$ на $x/r_d \sim - 10(90)$ (Рис.11б) и в $t/T_{oe} \sim 61-63$ на $x/r_d \sim - 44(56)$, после чего становится пролетной с $v > 0$.

Было проанализировано около 100 скачков скорости на траекториях частиц Рис.4-18 и других. Оказалось, что практически всегда скачок скорости наблюдается, когда частица попадает в двойной слой на фронте волны. Следует, однако, отметить, что несколько (~ 5) скачков отражений наблюдаются вне двойного слоя в области, где поле близко к нулю (Рис.5г;6а,б;7г). Отражения такого типа наблюдаются в случаях, когда частица попадает в область $E \sim 0$ со скоростью, близкой к нулю. Такие отражения могут иметь физическую природу. Действительно, общий вид траектории Рис.6а (захват и последовательные отражения) подобен траекториям близких по x_0, v^0 частиц, например, частиц Рис.7а,8а. Однако, не исключено, что причиной такого отражения являются малые паразитные возмущения поля (шумы), так что к траекториям, содержащим такие элементы, следует относиться с осторожностью. Отражения такого типа легко отличить по виду траектории от скачков скорости при отражении в двойном слое, так что их существование никоим образом не влияет на сделанные выводы относительно взаимодействия частиц с двойными слоями.

Таким образом, можно утверждать, что взаимодействие электронов малой начальной скорости с двойными слоями, формируемыми на фронтах нелинейного ионного возмущения, проявляется в характерных скачках скорости на траекториях электронов. Скачки скорости такого типа наблюдались нами в работах /1,2/ при исследовании развития нелинейных бегущих ионно-звуковых волн (/1/ Рис.33б,в;34б,г;36б,г;38в,г) и при исследовании взаимодействия ленгмюровских волн с ионно-звуковыми (например, /2/ - II Рис.10в,12а,13в,15а,б;17в,18а,23а,26а,27а,28в,29а,в или /2/ - I Рис.9а,11а,б;12а,в,г), а также при исследовании модуляционной неустойчивости бегущей ленгмюровской волны (/2/ - I Рис.19б,г;20а,б;23б,г). Существование таких скачков свидетельствует о формировании двойных слоев при развитии ионных возмущений, рассмотренных в работах /1,2/. В этих работах наблюдалось развитие стохастической неустойчивости движения электронов малой начальной скорости. Можно сделать вывод, что взаимодействие

электронов с двойными слоями (ускорение, торможение или отражение частиц в двойных слоях) представляет один из механизмов стохастизации движения электронов.

Рассматриваемое в случае I-0 настоящей работы начальное возмущение плотности и скорости ионов моделирует возмущение на конечной стадии модуляционной неустойчивости - коллапса, когда поле ленгмюровских волн уже затухло. Представляет интерес проанализировать характер движения электронов при развитии этого возмущения. Выше мы рассмотрели траектории отдельных частиц и нашли, что их вид определяется тем, что частица может попасть в захват, может стать пролетной, может ускориться, затормозиться или отразиться в двойном слое на фронте волны. В этой части работы мы сравним траектории частиц с близкими начальными координатами и проследим движение групп пробных частиц на фазовой плоскости.

Рассмотрим группы частиц с близкими начальными координатами x_0, v^0 . В группе 2 $x_0/r_d = 75, v^0/v_T \sim (-0,159) - 0,156, \Delta v^0$ между соседними траекториями $\Delta v^0/v_T \sim 3 \cdot 10^{-2}$, между соседними частицами в группе $\Delta v^0/v_T \sim 3 \cdot 10^{-3}$. В группе 4 $v^0 = 0, x_0/r_d \sim 56-68, \Delta x_0$ между соседними траекториями $\Delta x_0/r_d \sim 1$, между соседними частицами - $\Delta x_0/r_d \sim 0,1$. Начальные x_0 частиц этой группы лежат в области между x_0 частиц группы I $N = 6$ (Рис. 7а-в) $x_0/r_d = 56, N = 7$ (Рис. 6г, 7г, 8г), $x_0/r_d = 62$ и $N = 8$ (Рис. 8а-в), $x_0/r_d = 68$, так что траектории этих частиц могут рассматриваться вместе с траекториями частиц группы 4. Остальные траектории группы I не включены в это рассмотрение, т.к. Δx между соседними частицами довольно велико - $\Delta x_0/r_d \sim 6$.

Частицы группы 2 в самом начале развития возмущения разделяются на две подгруппы - первая с $v^0 < 0$ попадает в захват в область положительного потенциала в районе $x/r_d \sim 50$ (Рис. 9а, г; 10а), вторая с $v^0 \geq 0$ - в районе $x/r_d \sim 100$ (Рис. 11а, г; 12а, в). Анализируя отдельно траектории каждой подгруппы, видим, что траектории частиц с близкими начальными координатами различаются и расходятся на фазовой плоскости. Так частица $N = 2$ Рис. 9а-в последовательно захватывается в районе $x_0/r_d \sim 50$, в районе $x_0/r_d \sim 75$ и снова в районе $x/r_d \sim 50$. Соседняя частица $N = 3$ Рис. 10а-в после выхода из захвата остается пролетной (Рис. 10б),

отражается в двойном слое и снова становится пролетной (Рис. 10в). Соседняя частица $N = 4$ Рис. 9г, 10г вначале имеет траекторию, близкую к $N = 3$ (Рис. 9г), но, выйдя из захвата, до конца остается пролетной (Рис. 10г).

Разные траектории имеют и другие близкие по v^0 частицы. Так частицы $N = 5-6-7-8$ (Рис. 11г; 11а-в; 12а, б; 12в, г) вначале захвачены в районе $x_0/r_d \sim 100$. Однако, позже $N = 5$ выходит из захвата с $v > 0$ и остается пролетной (Рис. 11г). Частица $N = 6$, выйдя из захвата с $v < 0$, неоднократно взаимодействует с двойными слоями и несколько раз отражается (Рис. 11а-в). Частицы $N = 7$ и 8 вначале имеют близкие траектории (Рис. 12а; 12в), но позже они начинают различаться (Рис. 12б; 12г).

Анализ поведения частиц группы 2 и ее подгрупп на фазовой плоскости показывает, что частицы каждой подгруппы разбрасываются по фазовой плоскости. Таким образом, можно утверждать, что движение электронов приобретает стохастический характер. Однако основная причина различия траекторий частиц этой группы то, что на начальной стадии при захвате они попадают на разные орбиты. Неудивительно, что в дальнейшем их траектории различаются.

Рассмотрим группу 4 и частицы $N = 6, 7, 8$ из группы I с $v^0 = 0$ и близкими x_0 . Частицы этой группы захватываются на близкие орбиты. Анализ траекторий частиц группы 4 и $N = 6, 7, 8$ из группы I показывает, что все траектории частиц с близкими x_0 различаются и расходятся на фазовой плоскости. Анализ поведения частиц группы 4 показывает, что все частицы с течением времени разбрасываются по фазовой плоскости, так что частицы с близкими (соседними) x_0 попадают в разные области фазового пространства. Таким образом, и в этом случае, также как в случае группы 2, движение электронов приобретает стохастический характер.

Рассмотрим более детально, что приводит к различию траекторий частиц с близкими начальными координатами. Сравним, например, траектории группы 4 $N = 5$ (Рис. 15), $N = 6$ (Рис. 16) и $N = 7$ (Рис. 17) (отметим, что эти траектории не имеют "сомнительных" элементов, описанных выше, по крайней мере до $t/T_{oe} \sim 50-60$). Вначале все эти частицы захвачены и имеют близкие траектории. Различия проявляются на стадии, когда частицы отражаются при взаимодействии с двойными слоями. Так частица $N = 5$ отражается

(ускоряется) в двойном слое на $x/r_d \lesssim 40$ в $t/t_{oe} \sim 14-85$, движется с постоянной скоростью в $t/t_{oe} \sim 15-19$, вновь отражается (тормозится) на $x/r_d \lesssim 70$ в $t/t_{oe} \sim 19-20$ (Рис.15а) и далее оказывается пролетной с $v < 0$ до $t/t_{oe} \sim 38$, когда она вновь захватывается около $x/r_d \sim -25$ (Рис.15б).

Частица $N = 6$ также отражается в слое на $x/r_d \lesssim 40$, но несколько позже - в $t/t_{oe} \sim 17-18$. В результате она приходит в область слоя на $x/r_d \sim 70$ в $t/t_{oe} \sim 22-23$ незадолго до встречи фронтов ионного возмущения, когда поле уменьшается (Рис.3), и не отражается, а только немного тормозится (Рис.16а), после чего остается пролетной с $v > 0$ (Рис.16б) и только в $t/t_{oe} \sim 81$ отражается в слое на $x/r_d \sim 560$ (Рис.16в), а в $t/t_{oe} \sim 91-92$ - в слое на $x/r_d \sim 530$ и снова становится пролетной с $v > 0$ (Рис.16г).

Частица $N = 7$ еще позже в $t/t_{oe} \sim 19-20$ отражается в слое на $x/r_d \lesssim 40$. В результате она попадает в область $x/r_d \sim 75$ в $t/t_{oe} \sim 26-28$ во время встречи фронтов ионного возмущения, когда поле на фронтах быстро растет (Рис.3), и захватывается около $x_0/r_d \sim 75$ (Рис.17а,б). Естественно, что траектория этой частицы и позже отличается от траекторий $N = 6$ и $N = 5$ (Рис.15в,г; 16в,г; 17в,г).

Подобную картину можно видеть, сравнивая другие частицы с близкими x_0 , например, $N = 9$ из группы 4 (Рис.18) и $N = 8$ из группы I (Рис.8а-в). Эти частицы также вначале захвачены и имеют близкие траектории, а затем отражаются в двойных слоях. В слое на $x_0/r_d \approx 30$ частица $N = 9$ отражается в $t/t_{oe} \sim 18-19$ (Рис.18а), а $N = 8$ - в $t/t_{oe} \sim 19-20$ (Рис.8а), после чего обе становятся пролетными с $v > 0$. Однако позже траектории начинают различаться - $N = 9$ проходит $x/r_d \sim 75$ до встречи фронтов ионного возмущения в $t/t_{oe} \sim 24-26$, когда поле близко к нулю, и остается пролетной до $t/t_{oe} \sim 43$. В $t/t_{oe} \sim 44-45$ $N = 9$ отражается в слое на $x/r_d \sim 190$, а затем в $t/t_{oe} \sim 49-50$ - в слое на $x/r_d \sim 165$ (Рис.18а,б). Частица $N = 8$ попадает в область $x_0/r_d \sim 75$ в $t/t_{oe} \sim 30-32$, когда поле сильно меняется. Пройдя эту область, частица замедляется до малой скорости и набирает энергию только в $t/t_{oe} \sim 44-45$, попав в слой на $x/r_d \sim 110$, после чего отражается в слое на $x/r_d \sim 138$ в $t/t_{oe} \sim 48-50$ (Рис.8б). Дальнейшая судьба этих частиц также различна (Рис.8в, 18в,г).

Траектория соседней с $N = 9$ частицы $N = 8$ из группы 4 (не приведена на рисунках) вначале почти не отличается от $N = 9$ (Рис.18а). Однако в область встречи фронтов $x/r_d \sim 125$ $N = 8$ попадает в $t/t_{oe} \sim 28-30$ немного раньше, чем $N = 9$ ($t/t_{oe} \sim 31-32$). В результате $N = 8$ набирает несколько большую энергию и в $t/t_{oe} \sim 30-112$ остается пролетной с $v < 0$.

Таким образом, малые различия в начальных координатах приводят к большим различиям траекторий частиц в результате их взаимодействия с развивающимся нелинейным ионным возмущением. Траектории частиц имеют вид, характерный для стохастического движения - частица то захватывается, то становится пролетной, то отражается в двойном слое через случайные интервалы времени.

Движение электронов малой энергии изучалось также в случае I-I, когда ионное возмущение не задается, а развивается в результате модуляционной неустойчивости ленгмювской волны. В этом случае в начальный момент времени задается стоячая ленгмювская волна $\lambda/r_d = 100$; $E_0^2/8\pi n T = 1,6$, ионное возмущение $\tilde{n}_i(x) = \tilde{v}_i(x) = 0$. Развитие модуляционной неустойчивости в этом случае рассмотрено ранее в работах /6,7/, развитие ионного возмущения - в работе /4/ (стр.14, рис.8). Здесь мы рассмотрим развитие ионного возмущения в течение более длительного времени.

На Рис.19,20 приведены фазовые плоскости ионов и распределение плотности $\tilde{n}(x)$ в разные моменты времени. Модуляционная неустойчивость ленгмювской волны проявляется в формировании впадин плотности в области максимумов $E(x)$ стоячей волны и концентрации в них электрического поля. Максимальная концентрация поля достигается в $t/t_{oe} \sim 13$, после этого поле ленгмювских волн довольно быстро (за $\Delta t/t_{oe} \lesssim 10$) затухает в результате стохастической неустойчивости движения электронов с $|v/v_{Te}| \sim 1-1,5$ при их взаимодействии с гармониками ленгмювской волны /7/. После затухания ленгмювских волн ионное возмущение продолжает развиваться. Развитие этого возмущения качественно похоже на случай I-0 (Рис.2,3). В $t/t_{oe} \sim 15-20$ на краях впадин плотности формируются фронты плотности и скорости (Рис.19,20) и образуются двойные слои. Фронты движутся к центрам впадин и в $t/t_{oe} \sim 40$ встречаются, на месте впадин возникает пик плотности. Далее вновь формируются и начинают обливаться фронты и картина

повторяется. Встреча фронтов происходит в $t/T_{oe} \sim 80$, следующая встреча — в $t/T_{oe} \sim 108$ и т.д. Отличия от случая I-0 проявляются в деталях, в частности, в форме $\tilde{n}(x)$ в момент первой встречи фронтов $t/T_{oe} \sim 40$ (сравним Рис.20 $t/T_{oe} = 40$ и Рис.3 $t/T_{oe} = 28$), в большей изрезанности $\tilde{n}(x)$ в случае I-I (Рис.20 $t/T_{oe} \approx 45$) и т.п. (подробнее см. /4/).

Анализ траекторий пробных частиц показывает, что частицы с $V^0/V_T \sim \pm 1$ на стадии развития модуляционной неустойчивости являются пролетными (Рис.21а,22а). Частицы $N = 9$ и I из группы 2 ($V^0/V_T = 0,98$ и $-1,0$) последовательно пролетают две области концентрации поля (впадины плотности) $N = 9$ на $x_0/r_d \sim 75$ и 125 , $N = I$ на $x_0/r_d \sim 25$ и -25 . В $t/T_{oe} > 14$ эти частицы попадают в область положительного потенциала на $x/r_d \sim 150$ ($N=9$) и $x/r_d \sim -50$ ($N = I$) и захватываются в ней, отражаясь в двойных слоях, формирующихся на фронтах ионного возмущения. Дальнейшая судьба этих частиц определяется взаимодействием с ионным возмущением. Частица $N = 9$ в $t/T_{oe} > 28$ является пролетной с $v > 0$, в $t/T_{oe} \sim 40-80$ захватывается в область около $x/r_d \sim 175$ (Рис.21б,в), а затем переходит в область около $x/r_d \sim 150$ (Рис.21г). Частица $N = I$ в $t/T_{oe} > 32$ является пролетной с $v > 0$ (Рис.22б), в $t/T_{oe} \sim 58-70$ захватывается в область около $x/r_d \sim 75$ и дважды отражается в двойных слоях (Рис.22в), а затем переходит в область около $x/r_d \sim 50$ (Рис.22в,г).

Частицы с $V^0/V_T \leq 0,5$ из группы 2 захватываются уже на стадии развития модуляционной неустойчивости. Примером могут служить частицы $N = 8$ ($V^0/V_T = 0,5$) и $N = 7$ ($V^0/V_T = 0,16$) из группы 2 (Рис.23,24). Вначале эти частицы захвачены в области около $x_0/r_d \sim 50$ (Рис.23а,б;24а,б), затем $N = 8$ переходит в область около $x/r_d \sim 25$ (Рис.23б,в), становится пролетной с $v < 0$ (Рис.23в) и вновь захватывается в область около $x/r_d \sim -30$ (Рис.23г). Частица $N = 7$ отражается в слое на $x/r_d \sim 10$, становится пролетной с $v > 0$ (Рис.24в) и захватывается в область около $x/r_d \sim 50$ (Рис.24г).

Траектории частиц в случае I-I имеют тот же характер, что и в случае I-0, за исключением начального периода $t/T_{oe} < 15-20$, когда траектории I-I сильно возмущены полем ленгмюровских волн. Действительно, вид траекторий в случае I-I также определяется захватом частиц в область положительного потенциала с расходящимися фронтами и взаимодействием частиц с двойными слоями.

В случае I-I также, как в случае I-0, траектории частиц с близкими начальными координатами x_0 , V^0 различаются и расходятся на фазовой плоскости, причем различия появляются на стадии развития ионного возмущения, а не на стадии модуляционной неустойчивости. Примером могут служить траектории электронов $N = 6-7-8$ из группы I с $V^0 = 0$, $x_0/r_d = 64-65-66$ и $\Delta x/r_d = I$ (Рис.25-27). Вначале эти частицы захвачены в область около $x_0/r_d \sim 50$ и траектории их почти не различаются (Рис.25а,26а,27а). Однако, малых различий достаточно, чтобы судьба этих частиц была разной. $N = 6$ переходит в область около $x/r_d \sim 25$, отражаясь в двойных слоях в $t/T_{oe} \sim 42-43$ и $\sim 56-57$ (Рис.25б,в), а затем переходит в область около $x/r_d \sim 50$ и захватывается в ней (Рис.25г). Частица $N = 7$ в $t/T_{oe} > 45$ пролетная с $v < 0$ (Рис.26б), в $t/T_{oe} \sim 56-58$ и $64-66$ отражается в двойных слоях в области около $x/r_d \sim 25$ (Рис.26в), вновь становится пролетной с $v < 0$ и захватывается в область сначала около $x/r_d \sim -50$, а затем около $x/r_d \sim -25$ (Рис.26г). Частица 8 долго остается захваченной около $x/r_d \sim 50$ (Рис.27б), затем становится пролетной с $v > 0$ и захватывается в область около $x/r_d \sim 100$ (Рис.27в,г).

В группе I различаются траектории всех соседних по x_0 частиц ($\Delta x_0/r_d$ I-2), в группе 2 различаются траектории близких по V^0 частиц $N = 3-7$ ($\Delta V^0/V_T \sim 0,08$). Частицы группы 2 с близкими x_0 и часть группы I с близкими V^0 (интервал $V^0/V_T \sim (-0,16; +0,16)$) разбрасываются по фазовой плоскости. Таким образом, и в случае I-I движение электронов малой энергии приобретает стохастический характер.

Таким образом, развитие ионного возмущения на конечной стадии модуляционной неустойчивости — коллапса ленгмюровских волн приводит к стохастической неустойчивости движения электронов малой начальной энергии. Основную роль в стохастизации движения электронов играет захват электронов (захват — выход из захвата через случайные промежутки времени) в области положительного потенциала, амплитуда и форма которых периодически меняется при развитии возмущения, а также взаимодействие электронов с двойными электрическими слоями, формирующимися на фронтах нелинейного возмущения (ускорение, торможение или отражение электронов через случайные промежутки времени).

ЛИТЕРАТУРА:

1. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Ионно-звуковые волны большой амплитуды. Стохастические эффекты. I". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 90-7.
2. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Взаимодействие ленгмюровской волны с ионно-звуковой. Стохастические эффекты. I-IV". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 88-139, 1988; № 88-163, 1988; № 89-36, 1989; № 89-106, 1989.
3. A. Murakami, Y. Nomura, H. Momota. J. Phys. Soc. Japan, 51, 4053, 1982.
4. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Стоячие ленгмюровские волны большой амплитуды. Развитие ионного возмущения". Препринт ИЯФ СО АН СССР № 84-80, 1984.
5. Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин. "Ионные волны большой амплитуды. I, II". Препринты ИЯФ СО АН СССР № 83-88, № 83-9, 1983. Proc. Conf. on Plasma Physics, v.1, p.37, 38, Lausanne, 1984.
6. N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin. Plasma Phys. 23, 35, 1981.
7. N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin. Phys. Lett. v. 112A, N 6, 7, 330, 1985.

Подписи к рисункам:

- Рис.1. Начальное распределение плотности и скорости ионов, сепаратриса электронов и начальные координаты пробных частиц в группах I-4. Случай I-0.
- Рис.2. Фазовые плоскости ионов в разные моменты времени. Случай I-0.
- Рис.3. Распределение плотности $\tilde{n}(x)$, потенциала $\varphi(x)$ и поля $E(x)$ в разные моменты времени. Случай I-0.
- Рис.4-18. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. Случай I-0.
- | | | | |
|--------|-----|------|-------|
| Рис. | 4-8 | 9-14 | 15-18 |
| Группа | I | 2 | 4 |
- Цифры на траектории - моменты времени t/τ_{oe} , когда частица имеет данное x и v ; t_0 - начальный момент времени временного интервала.
- Рис.19. Фазовые плоскости ионов в разные моменты времени. Случай I-I.
- Рис.20. Распределение плотности $\tilde{n}(x)$ в разные моменты времени. Случай I-I.
- Рис.21-27. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. Случай I-I.
- | | | |
|--------|-------|-------|
| Рис. | 21-24 | 25-27 |
| Группа | 2 | I, |
- Цифры на траектории - моменты времени t/τ_{oe} , когда частица имеет данное x и v ; t_0 - начальный момент времени временного интервала.

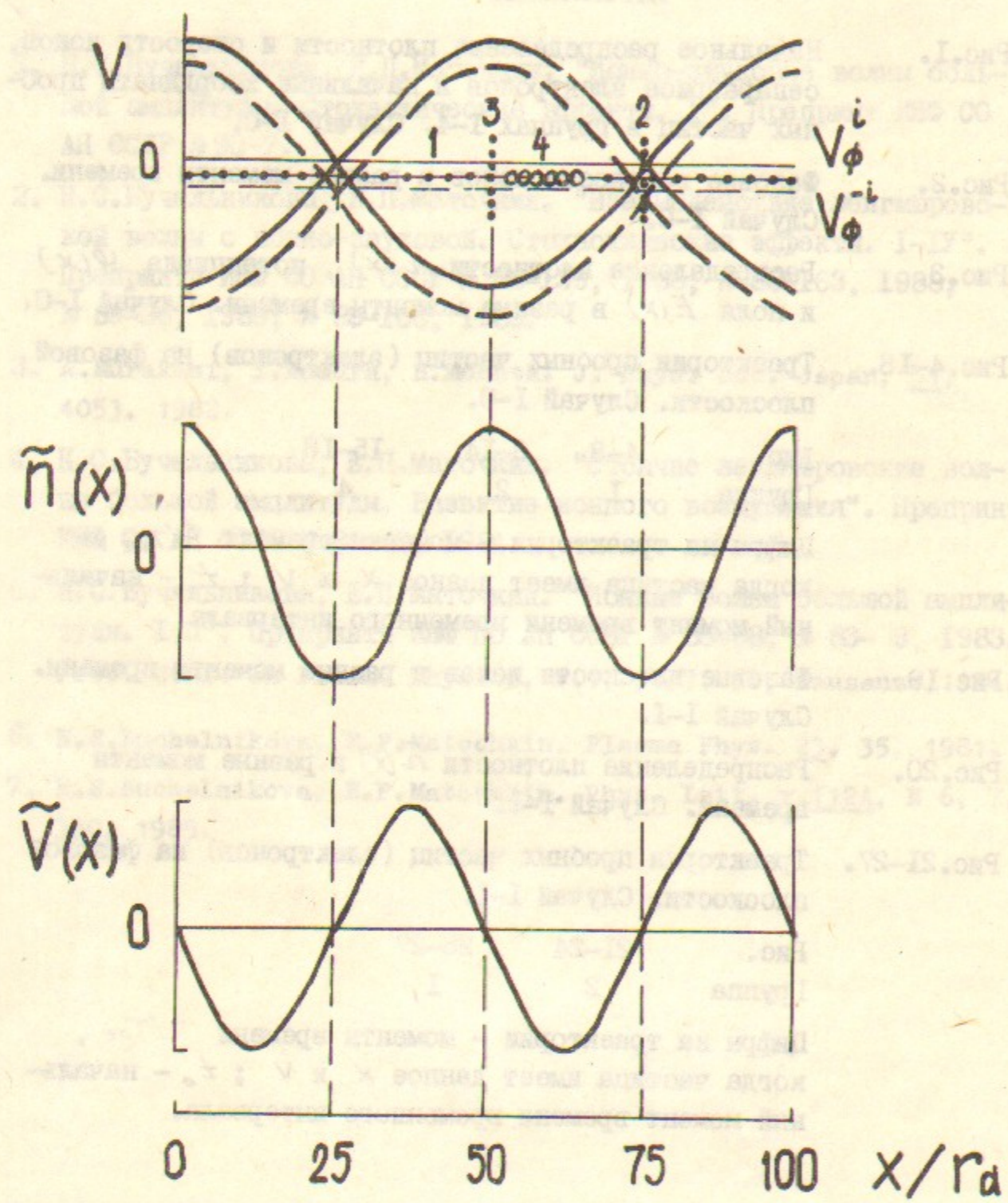


Рис.1. Случай I-0.

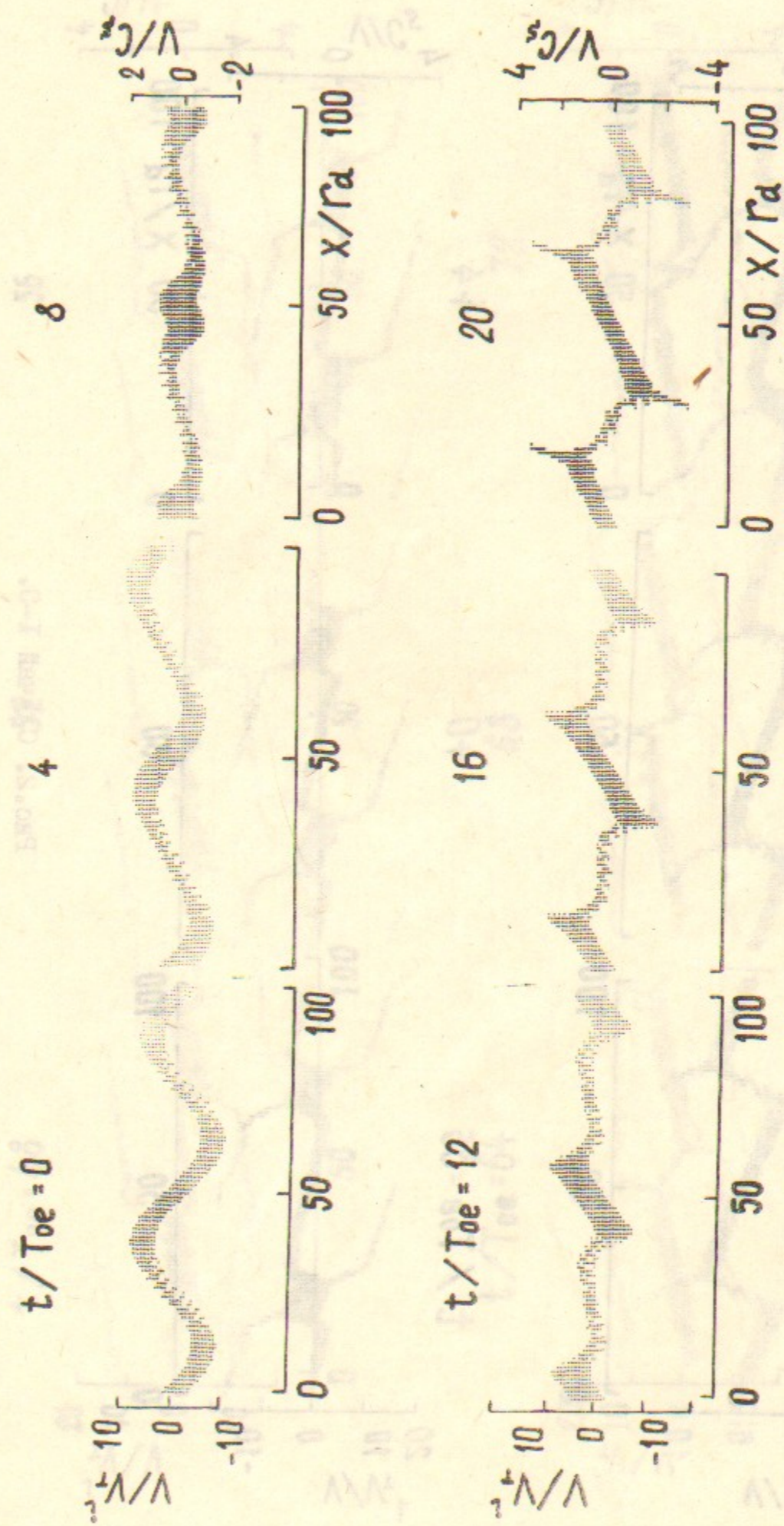


Рис.2. Случай I-0.

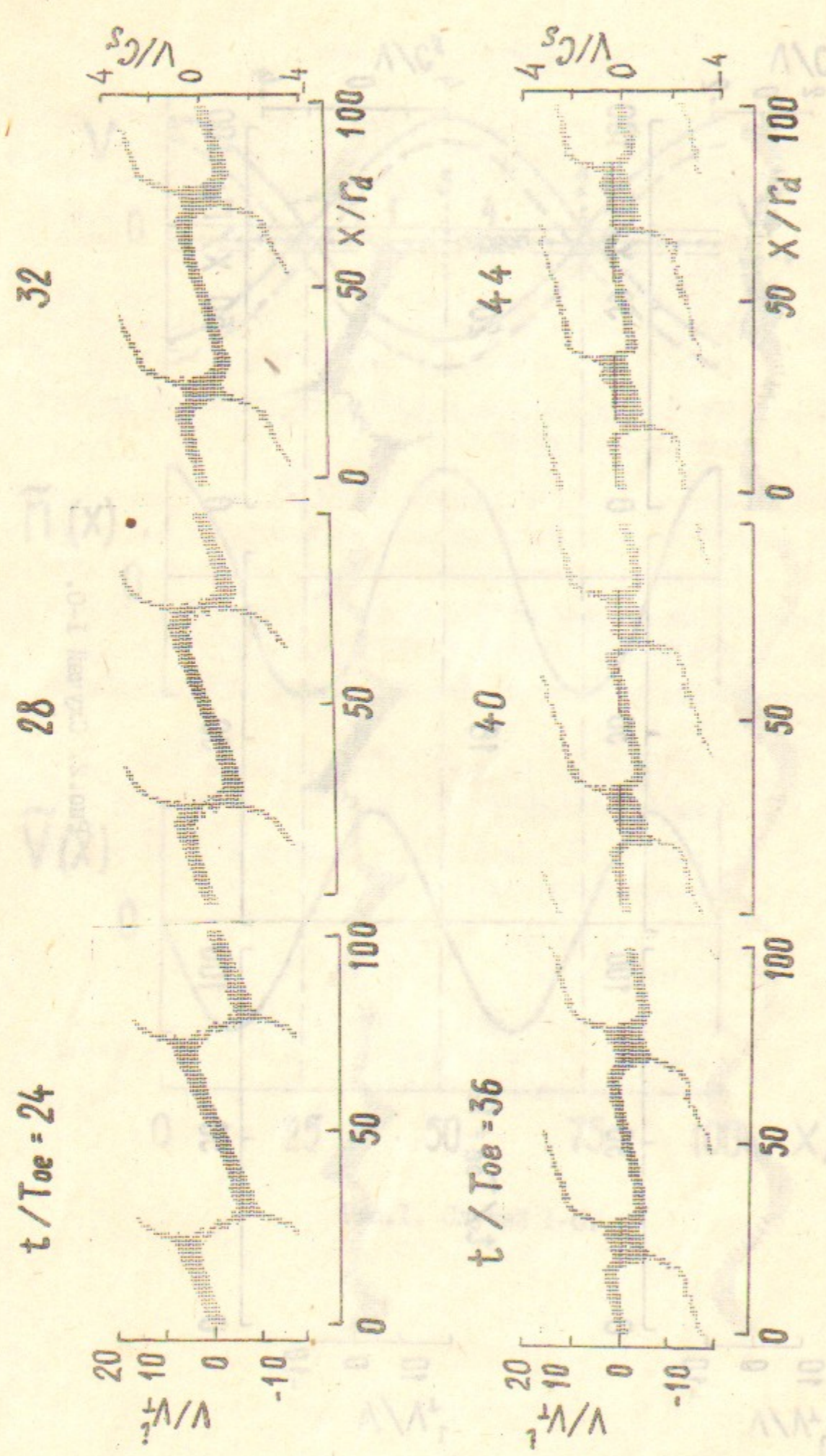


Рис.2. Случай I-O.



Рис.2. Случай I-O.

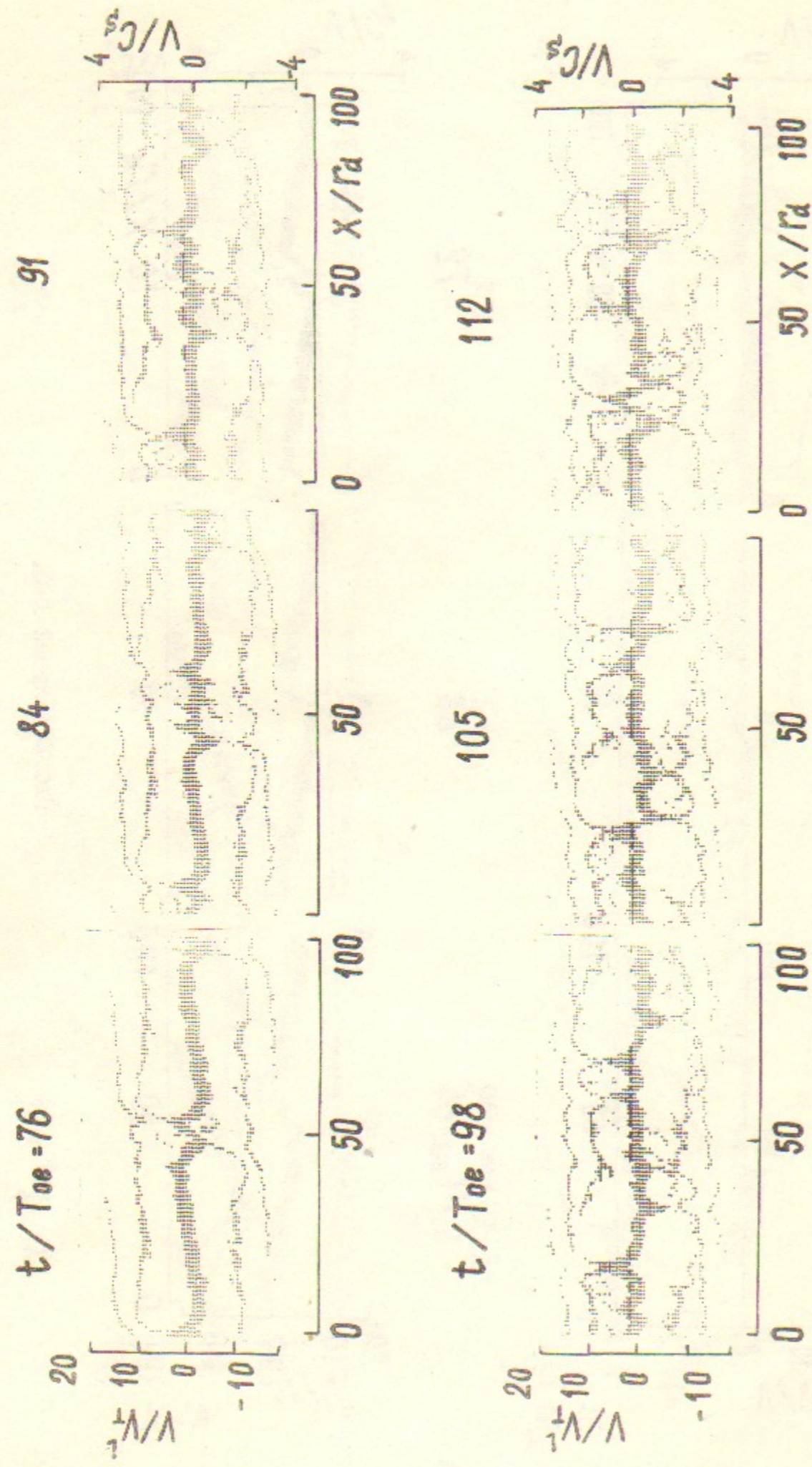


Рис.2. Случай I-O.

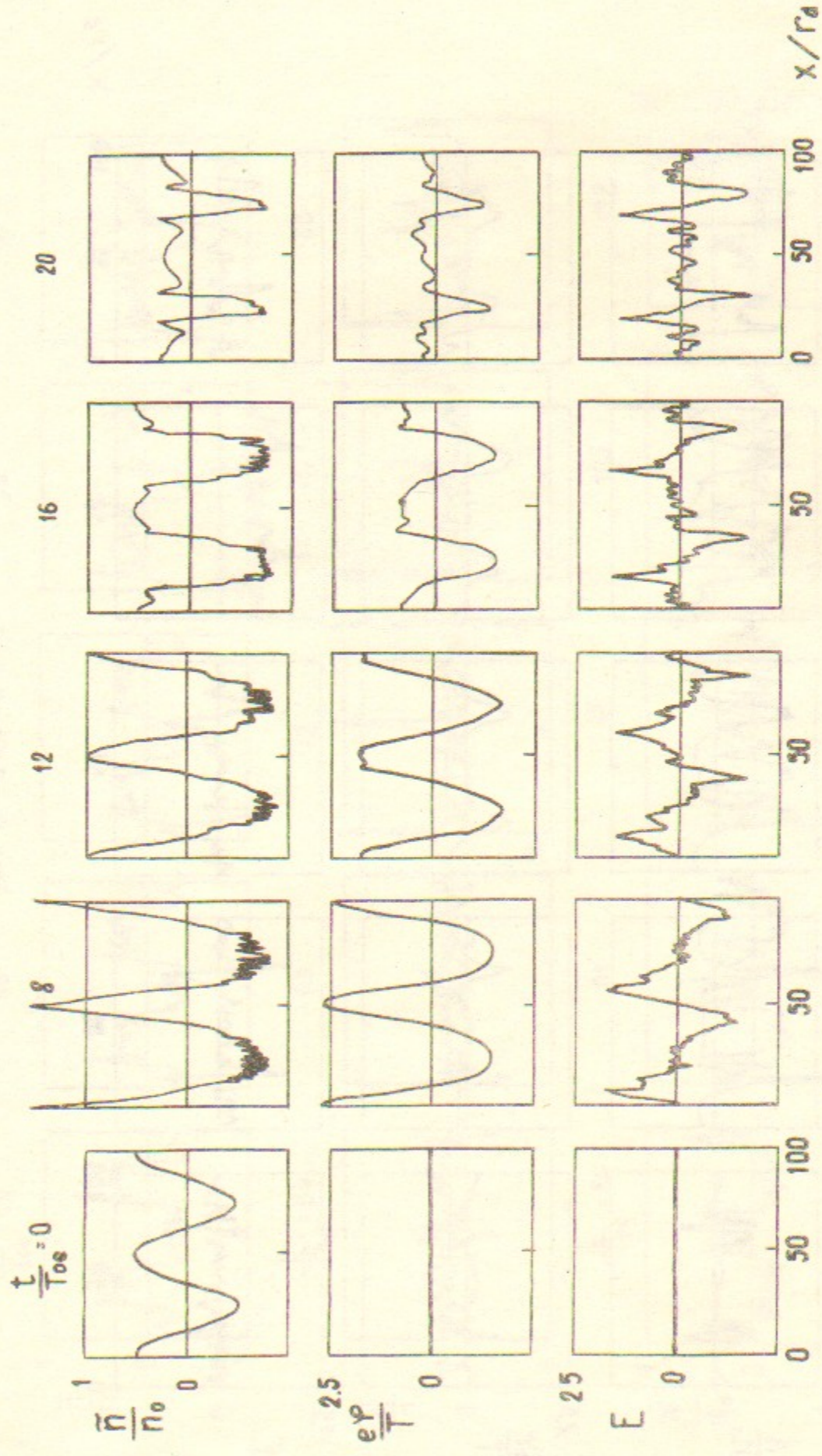


Рис.3. Случай I-O.

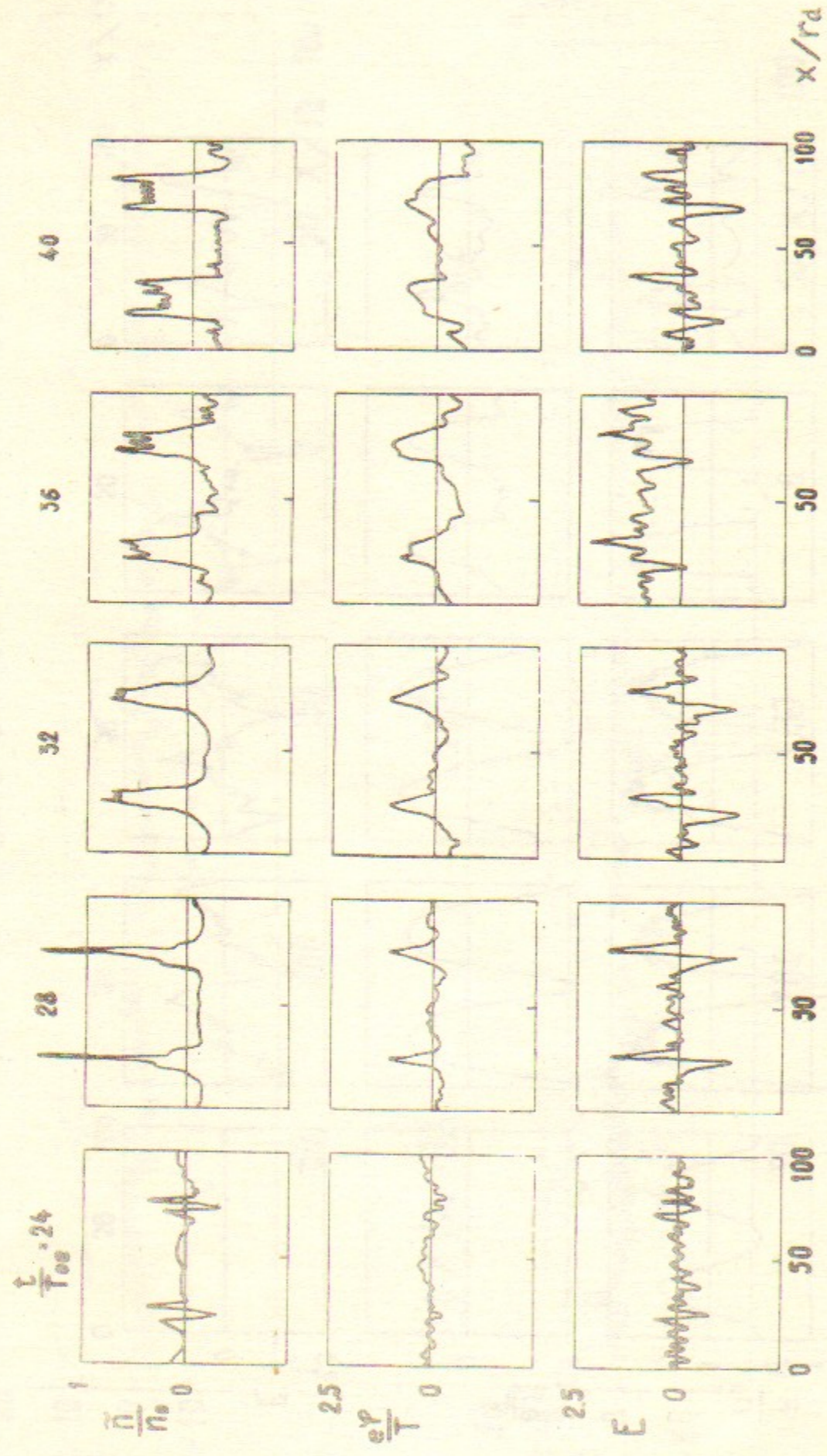


Рис.3. Случай 1-0.

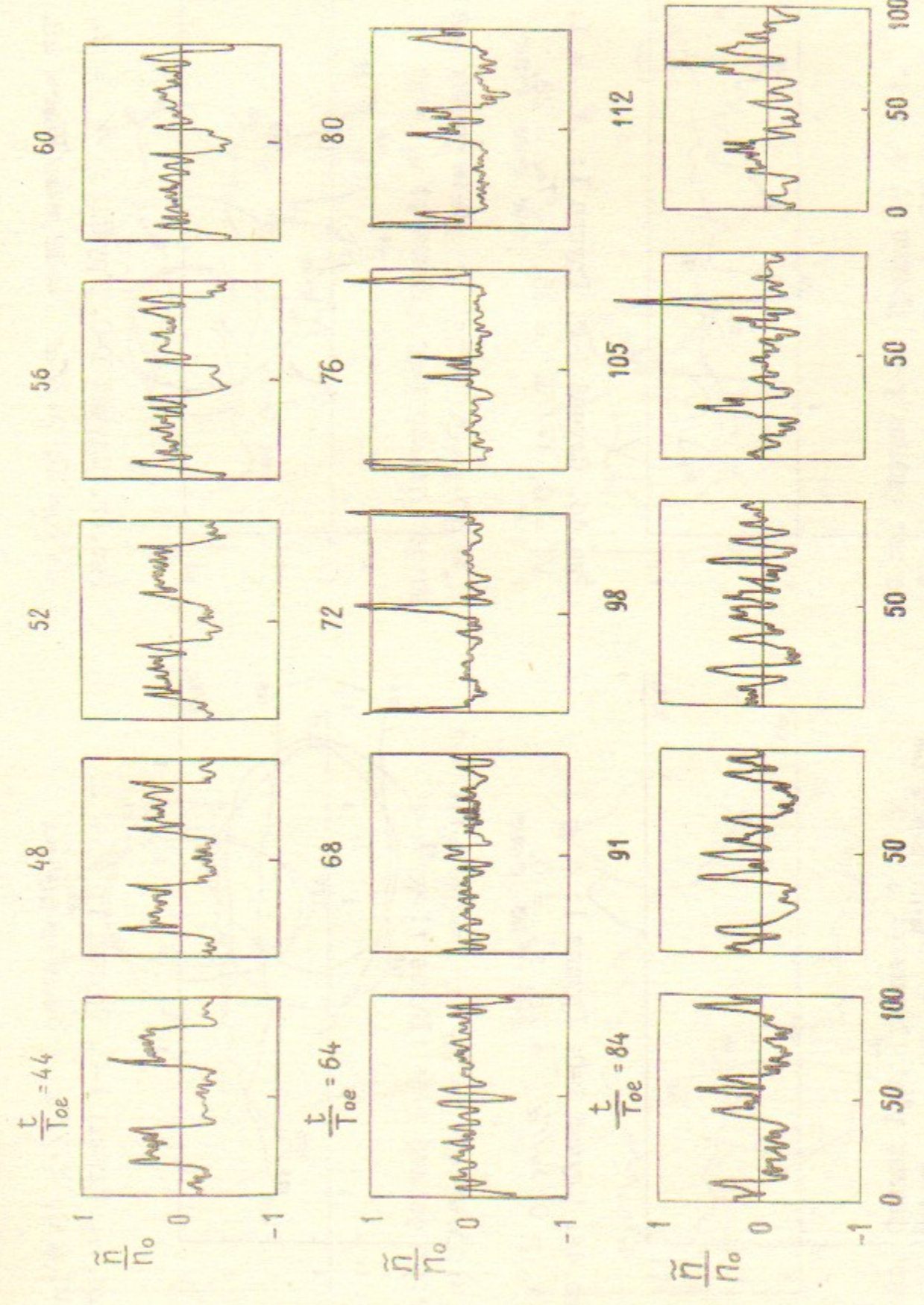


Рис.3. Случай 1-0.

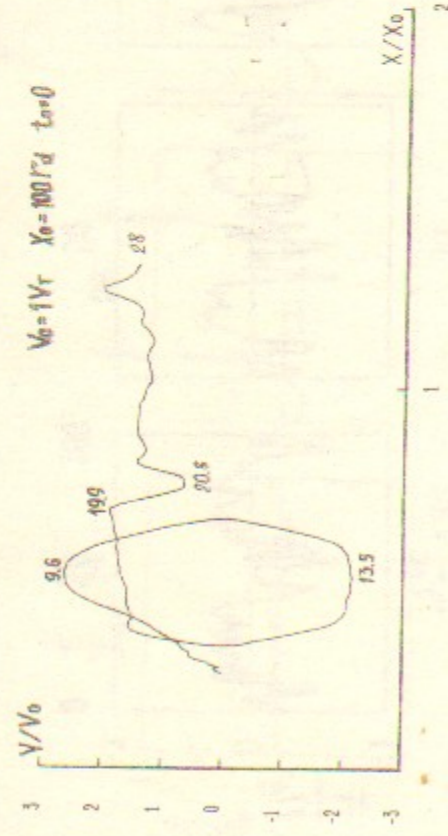


Рис. 4а. Случай I-O. Группа I; $\mathcal{N} = 1$.
 $V^0 = 0, X_0/r_d = 25, t_0 = 0$.

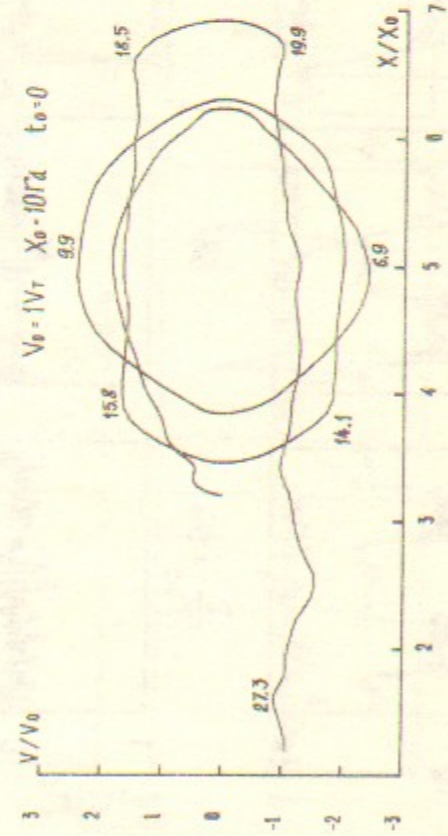


Рис. 4б. Случай I-O. Группа I; $\mathcal{N} = 2$.
 $V^0 = 0, X_0/r_d = 32, t_0 = 0$.

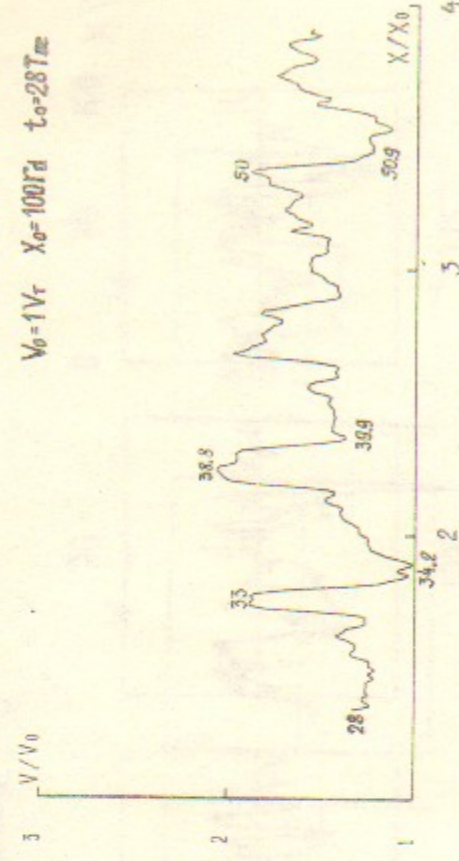


Рис. 4в. Случай I-O. Группа I; $\mathcal{N} = 1$.
 $V^0 = 0, X_0/r_d = 25, t_0/T_{oe} = 28$.

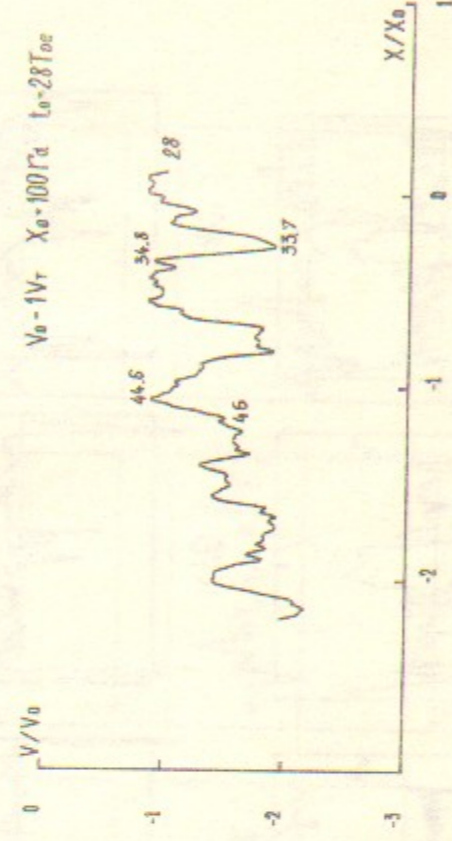


Рис. 4г. Случай I-O. Группа I; $\mathcal{N} = 2$.
 $V^0 = 0, X_0/r_d = 32, t_0/T_{oe} = 28$.

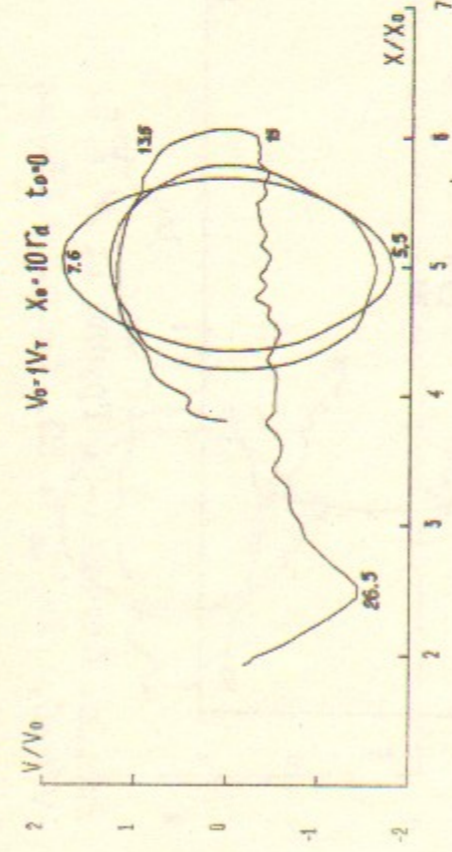


Рис. 5а. Случай I-O. Группа I; $\mathcal{N} = 3$.
 $V^0 = 0, X_0/r_d = 38, t_0 = 0$.

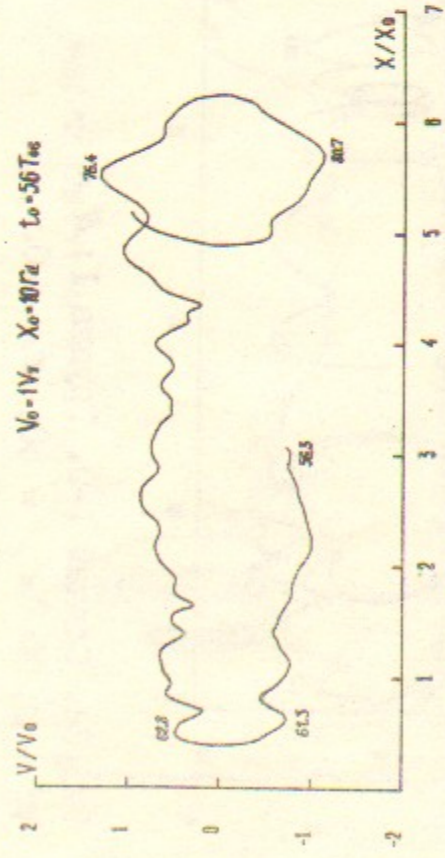


Рис. 5б. Случай I-O. Группа I; $\mathcal{N} = 3$.
 $V^0 = 0, X_0/r_d = 38, t_0/T_{oe} = 56$.

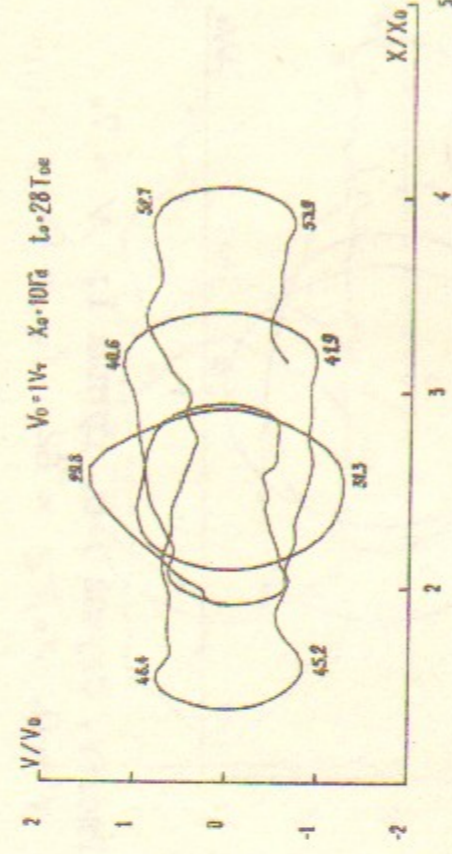


Рис. 5в. Случай I-O. Группа I; $\mathcal{N} = 3$.
 $V^0 = 0, X_0/r_d = 38, t_0/T_{oe} = 28$.

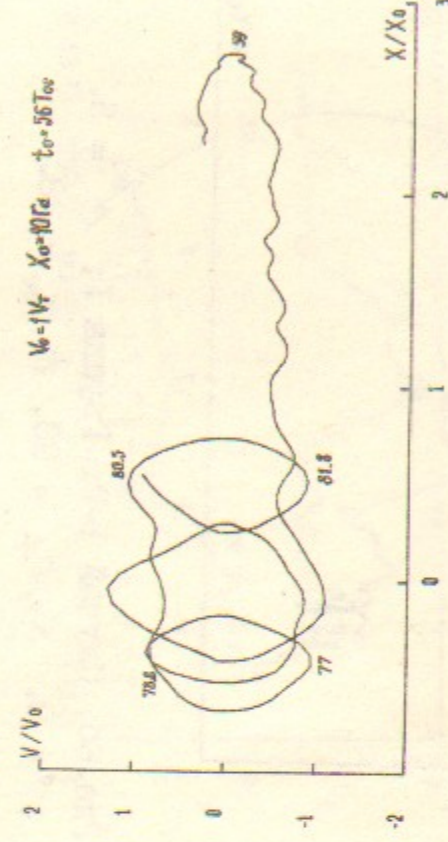


Рис. 5г. Случай I-O. Группа I; $\mathcal{N} = 4$.
 $V^0 = 0, X_0/r_d = 44, t_0/T_{oe} = 56$.

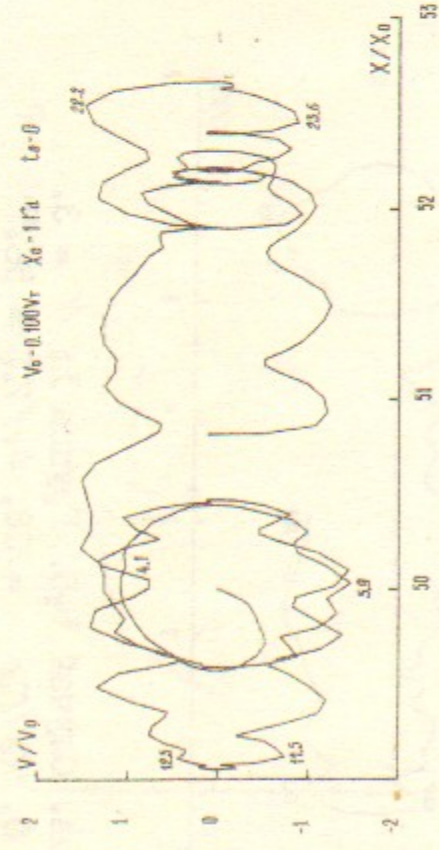


Рис. 6а. Случай 1-0. Группа I; $N = 5$.
 $V^0 = 0$, $X_0/r_d = 50$, $t_0 = 0$.

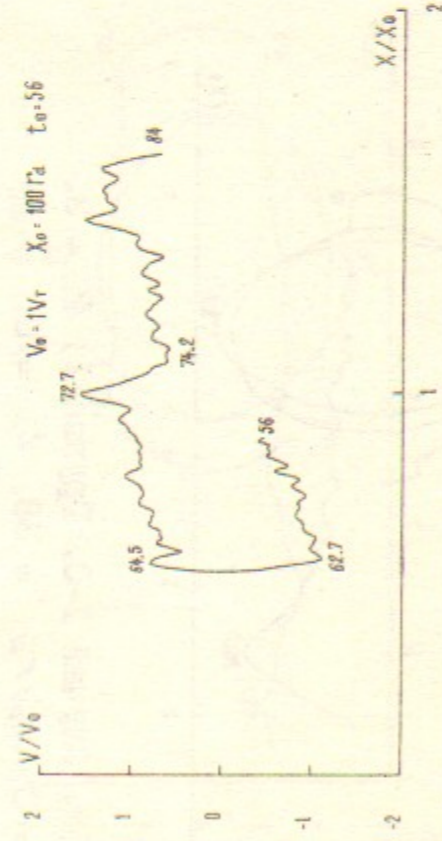


Рис. 6б. Случай 1-0. Группа I; $N = 5$.
 $V^0 = 0$, $X_0/r_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 56$.

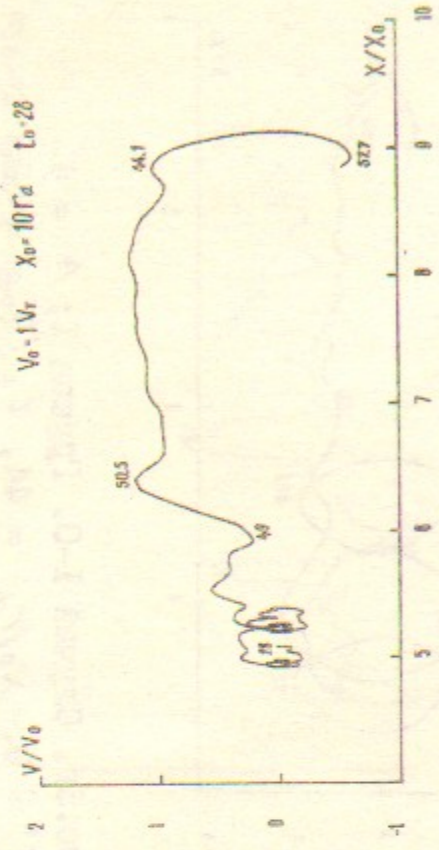


Рис. 66. Случай 1-0. Группа I; $N = 5$.
 $V^0 = 0$, $X_0/r_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 28$.

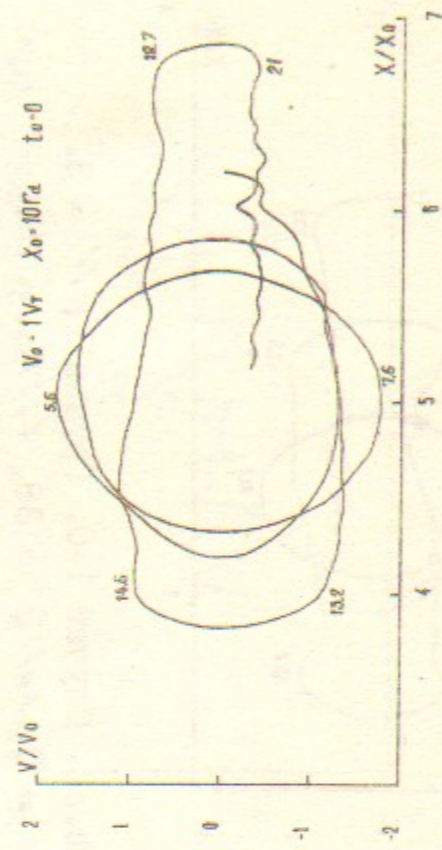


Рис. 6г. Случай 1-0. Группа I; $N = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/r_d = 62$, $t_0 = 0$.

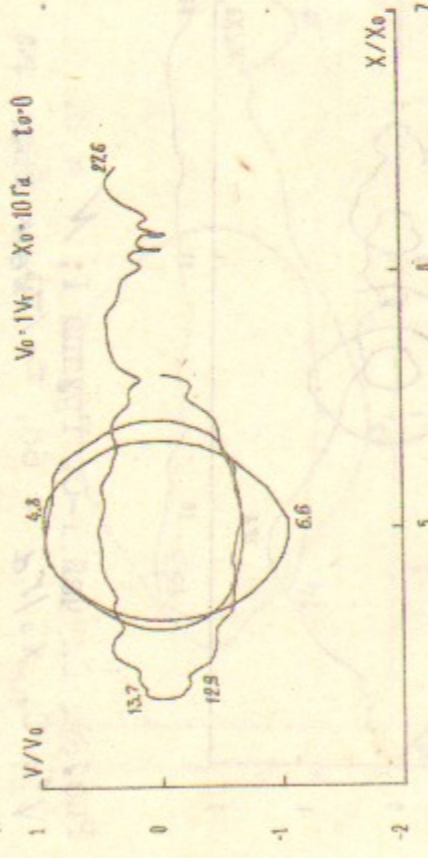


Рис. 7а. Случай 1-0. Группа I; $N = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/r_d = 56$, $t_0 = 0$.

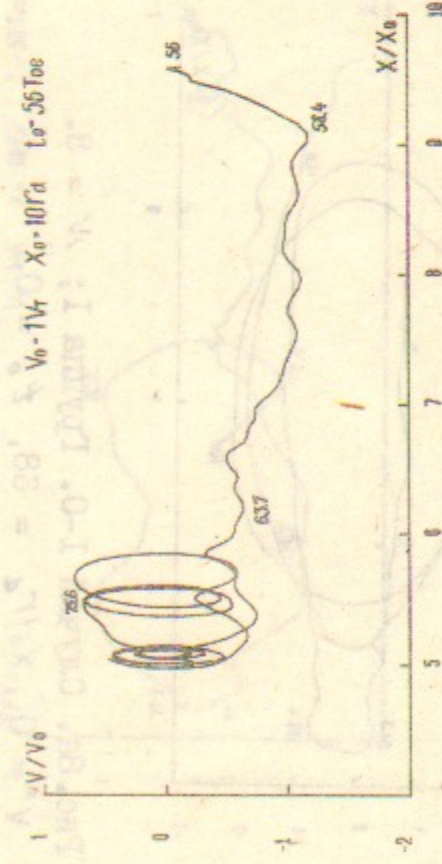


Рис. 7в. Случай 1-0. Группа I; $N = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/r_d = 56$, $t_0/T_{oe} = 56$.

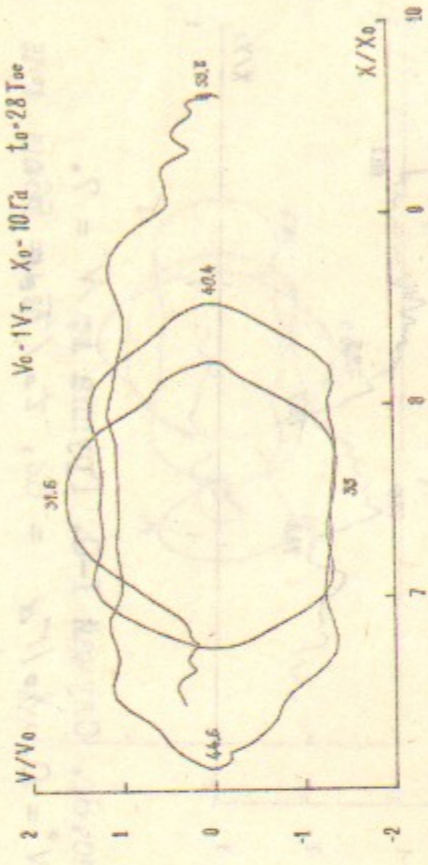


Рис. 76. Случай 1-0. Группа I; $N = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/r_d = 56$, $t_0/T_{oe} = 28$.

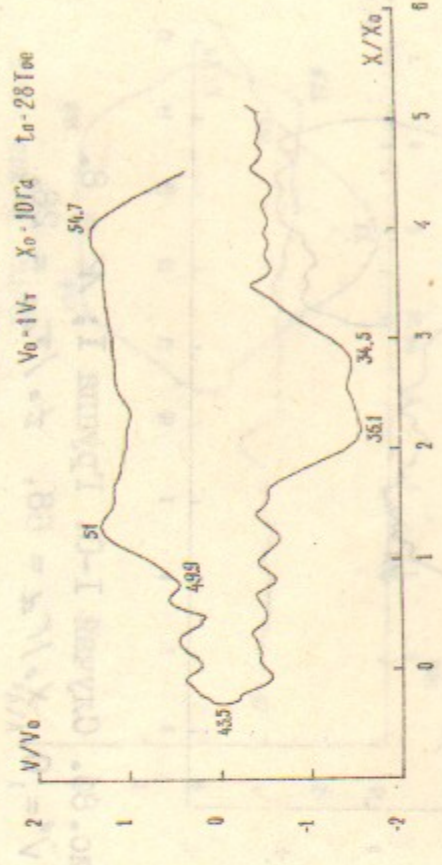


Рис. 7г. Случай 1-0. Группа I; $N = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/r_d = 62$, $t_0/T_{oe} = 28$.

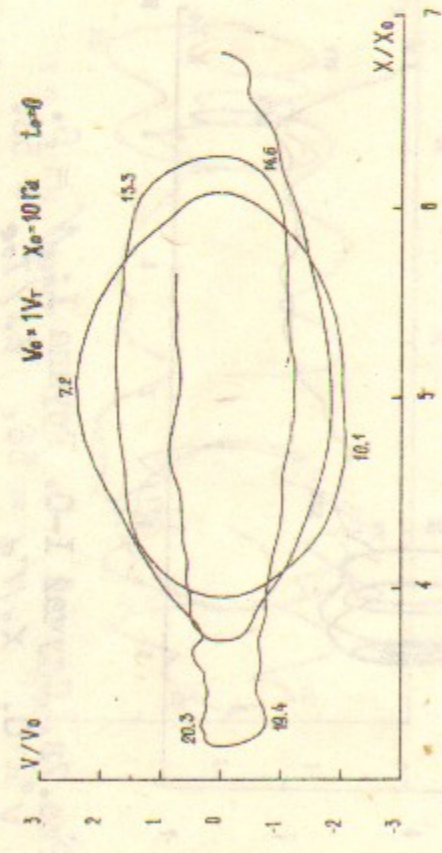


Рис. 8а. Случай I-O. Группа 1; $N = 8$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 68$, $t_0 = 0$.

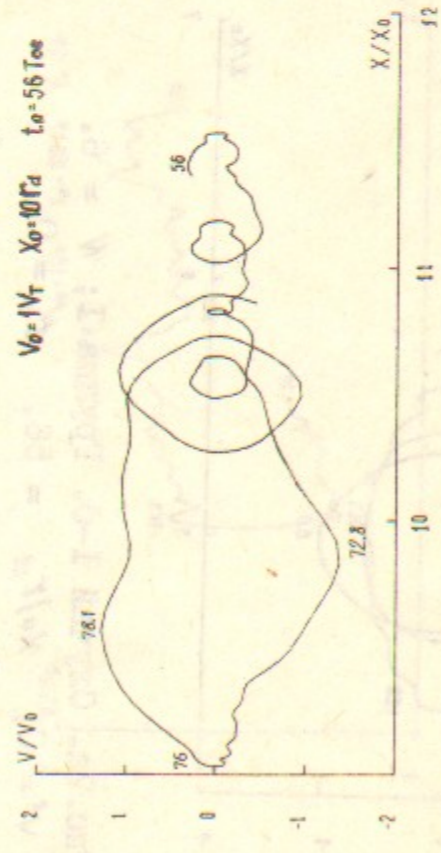


Рис. 8б. Случай I-O. Группа 1; $N = 8$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 68$, $t_0/\Gamma_{0e} = 56$.

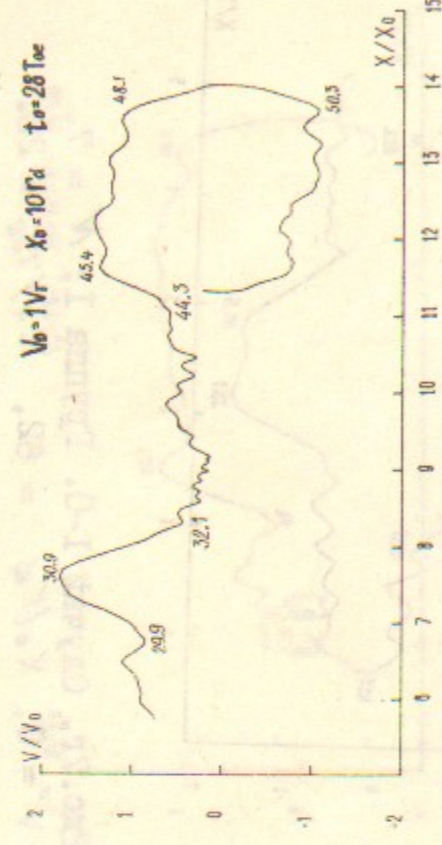


Рис. 8с. Случай I-O. Группа 1; $N = 8$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 68$, $t_0/\Gamma_{0e} = 28$.

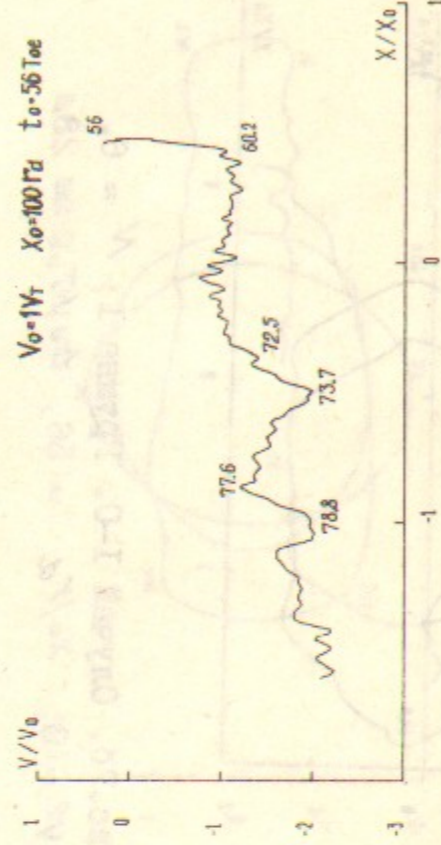


Рис. 8г. Случай I-O. Группа 1; $N = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 62$, $t_0/\Gamma_{0e} = 56$.

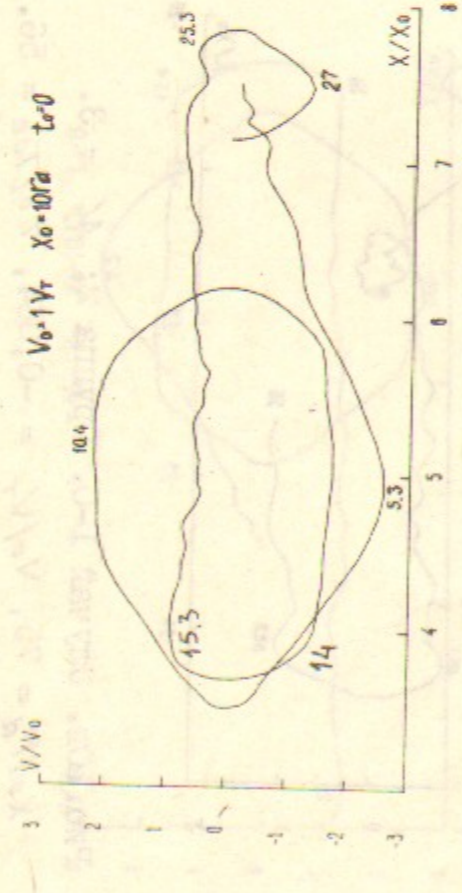


Рис. 9а. Случай I-O. Группа 2; $N = 2$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,095$, $t_0 = 0$.

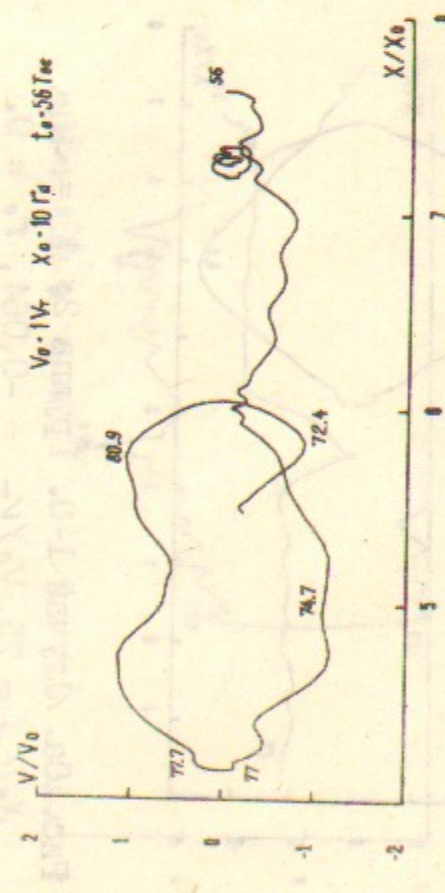


Рис. 9б. Случай I-O. Группа 2; $N = 2$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,095$, $t_0/\Gamma_{0e} = 56$.

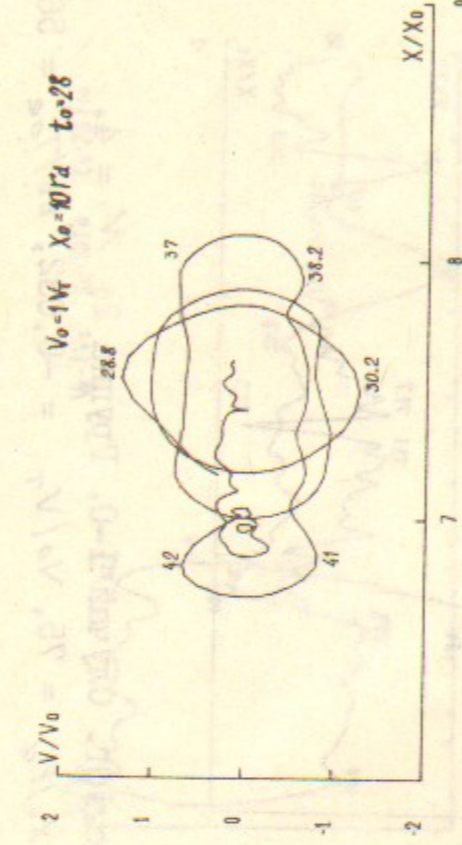


Рис. 9с. Случай I-O. Группа 2; $N = 2$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,095$, $t_0/\Gamma_{0e} = 28$.

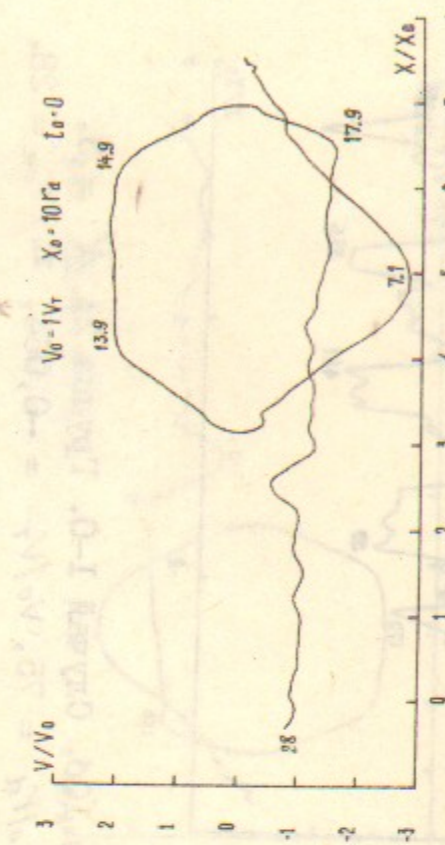


Рис. 9г. Случай I-O. Группа 2; $N = 4$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$; $V_0/V_T = -0,032$, $t_0 = 0$.

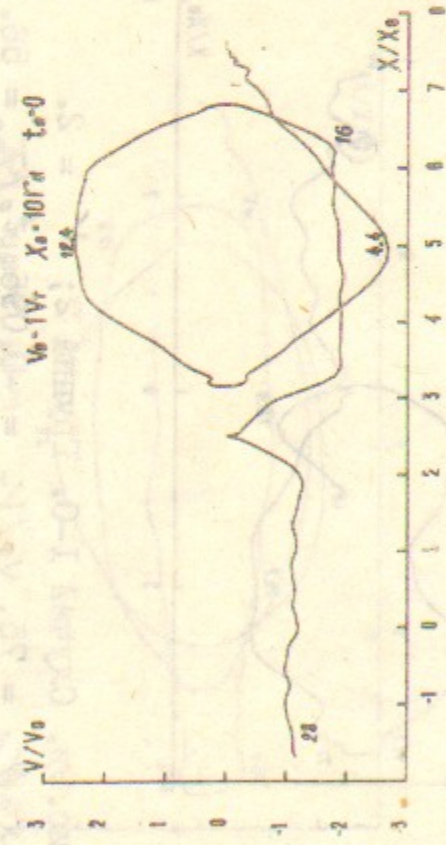


Рис. 10а. Случай 1-0. Группа 2; $N = 3$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,064$, $t_0 = 0$.

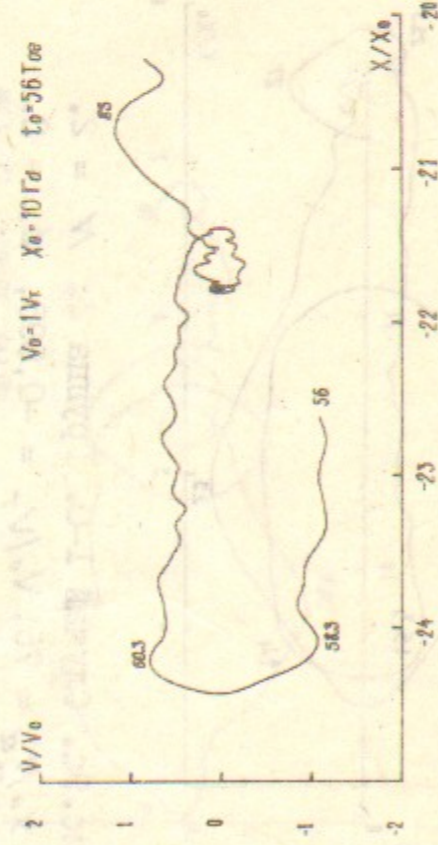


Рис. 10б. Случай 1-0. Группа 2; $N = 3$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,064$, $t_0/T_{oe} = 56$.

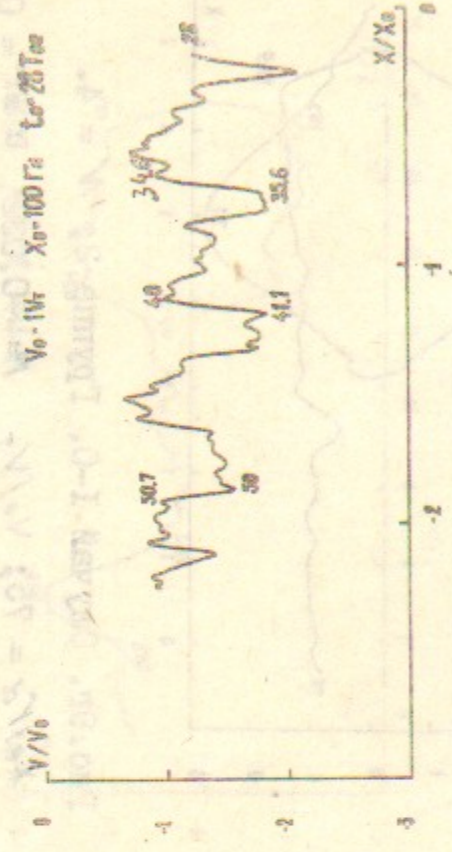


Рис. 10с. Случай 1-0. Группа 2; $N = 3$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,064$, $t_0/T_{oe} = 28$.

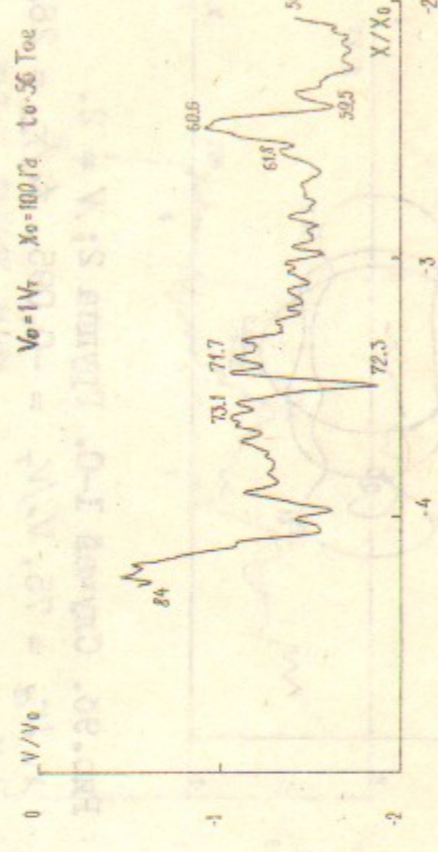


Рис. 10г. Случай 1-0. Группа 2; $N = 4$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,032$, $t_0/T_{oe} = 56$.

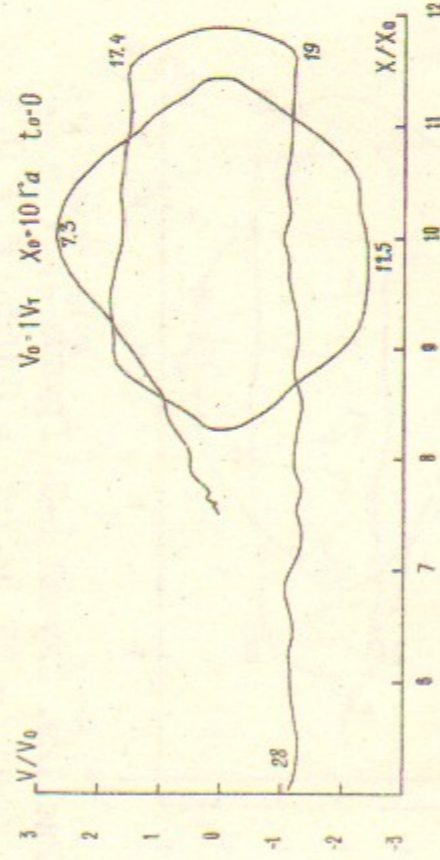


Рис. 11а. Случай 1-0. Группа 2; $N = 6$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = 0,032$, $t_0 = 0$.

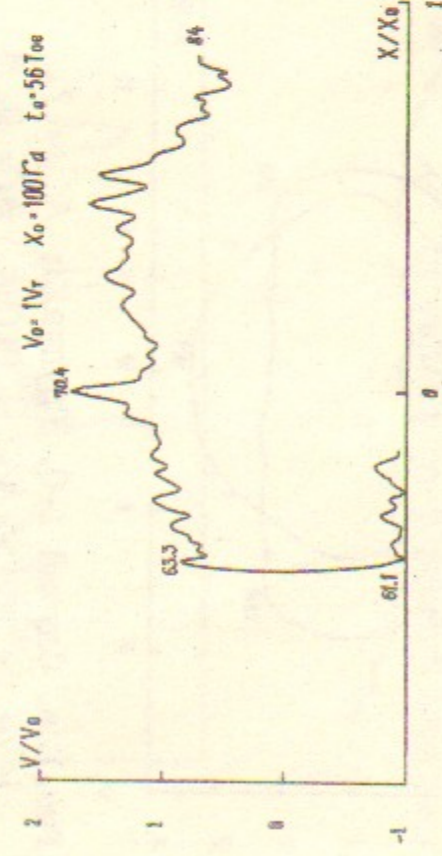


Рис. 11б. Случай 1-0. Группа 2; $N = 6$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = 0,032$, $t_0/T_{oe} = 56$.

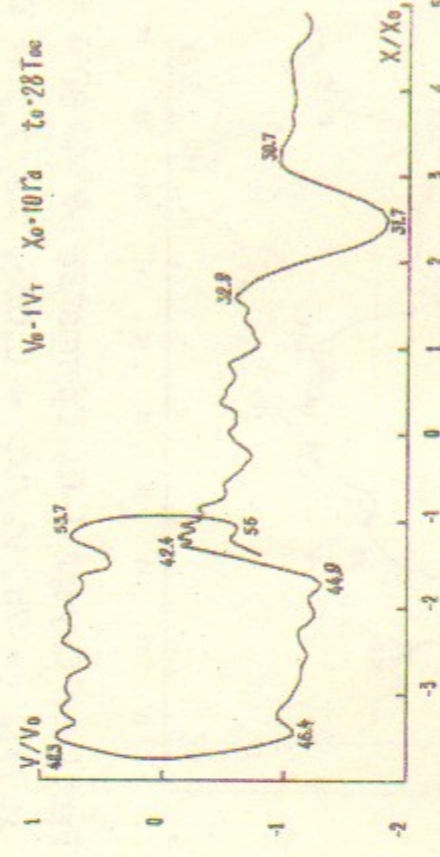


Рис. 11с. Случай 1-0. Группа 2; $N = 6$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = 0,032$, $t_0/T_{oe} = 28$.

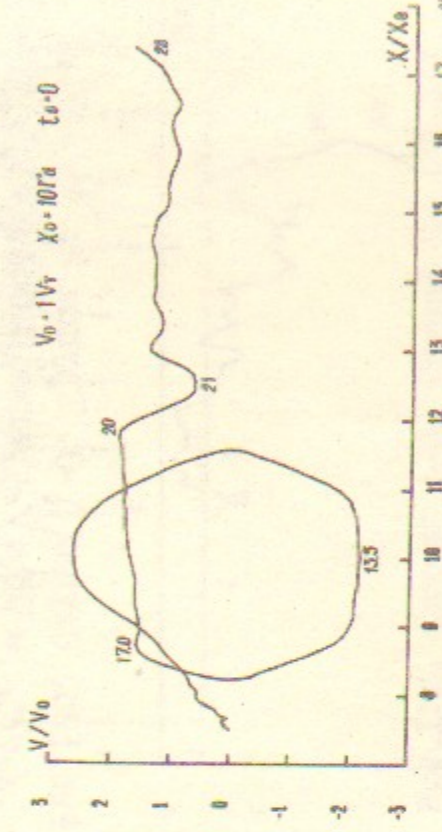


Рис. 11г. Случай 1-0. Группа 2; $N = 5$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = 0$, $t_0 = 0$.

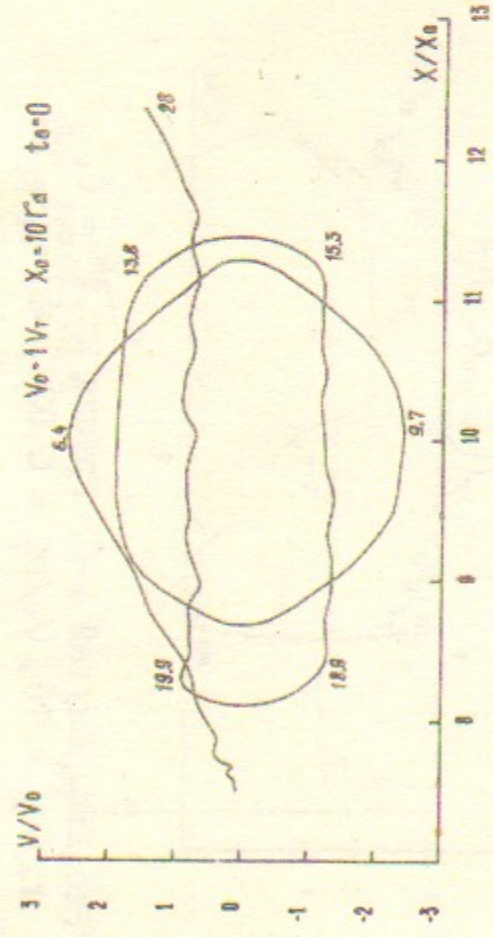


Рис. 12а. Случай 1-0. Группа 2; $N = 7$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = 0,064$, $t_0 = 0$.

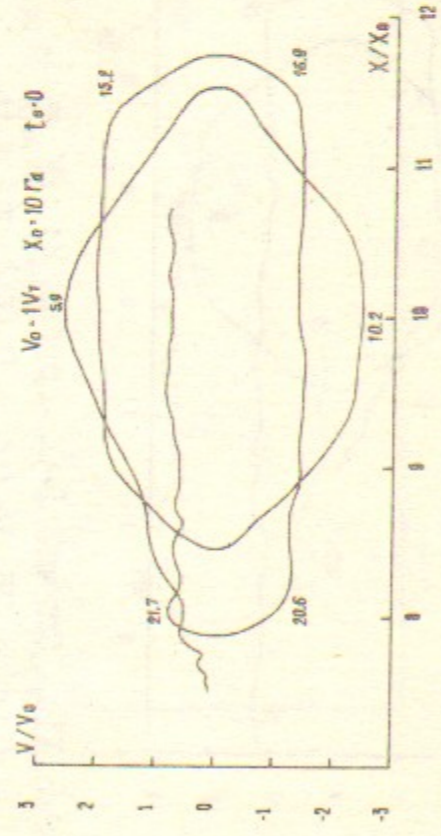


Рис. 12б. Случай 1-0. Группа 2; $N = 8$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = 0,095$, $t_0 = 0$.

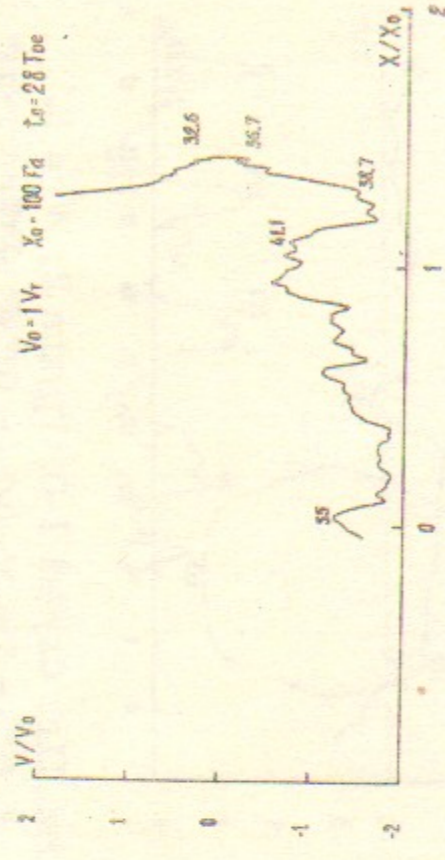


Рис. 12с. Случай 1-0. Группа 2; $N = 7$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = 0,064$, $t_0/T_{oe} = 28$.

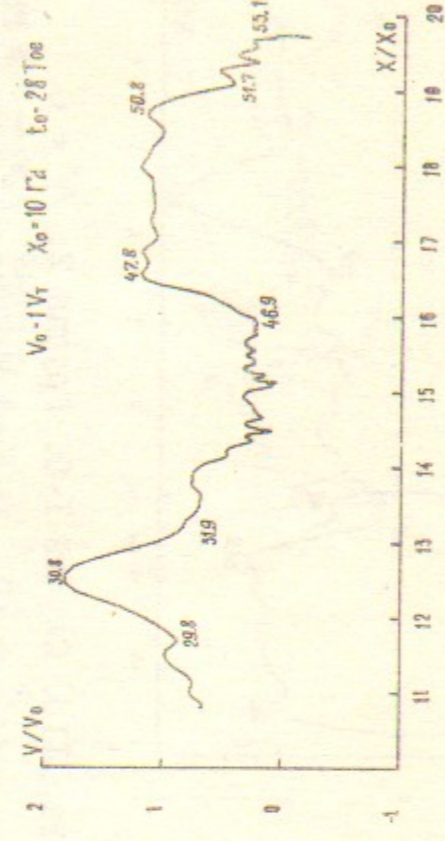


Рис. 12г. Случай 1-0. Группа 2; $N = 8$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = 0,095$, $t_0/T_{oe} = 28$.

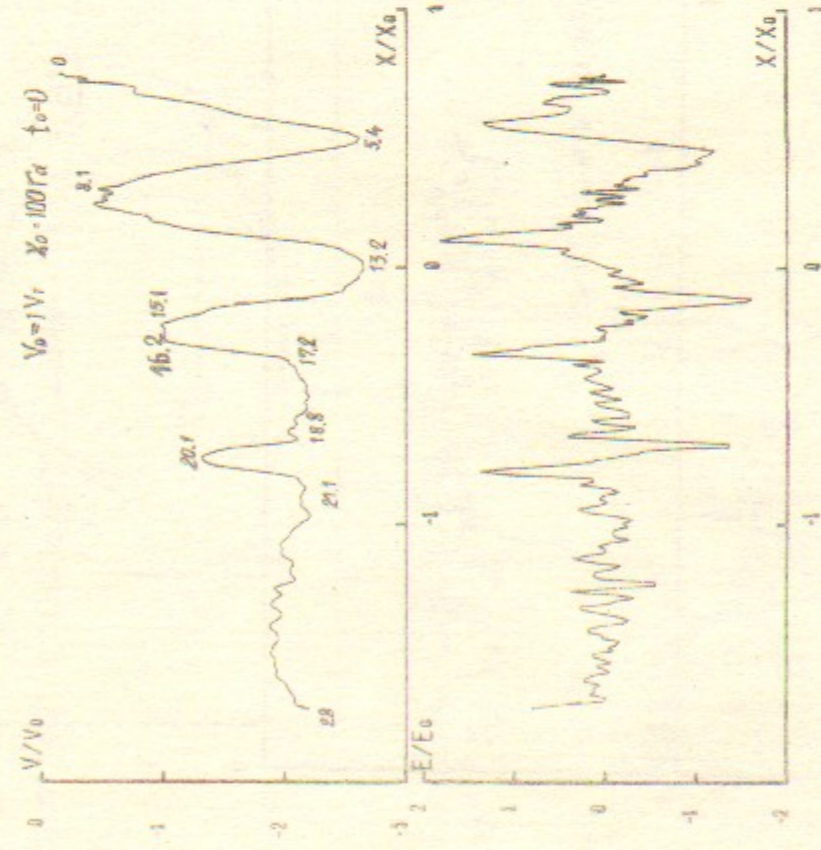


Рис. 13а. Случай 1-0. Группа 2; $N = 1$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,127$, $t_0 = 0$.

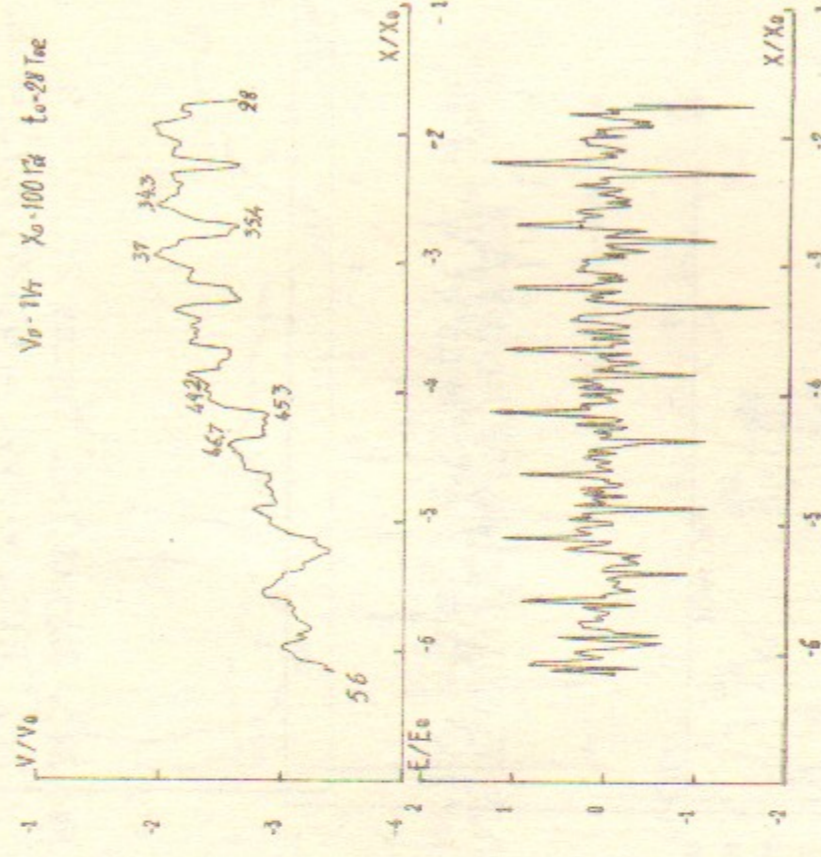


Рис. 13б. Случай 1-0. Группа 2; $N = 1$.
 $X_0/\Gamma_d = 75$, $V_0/V_T = -0,127$, $t_0/T_{oe} = 28$.

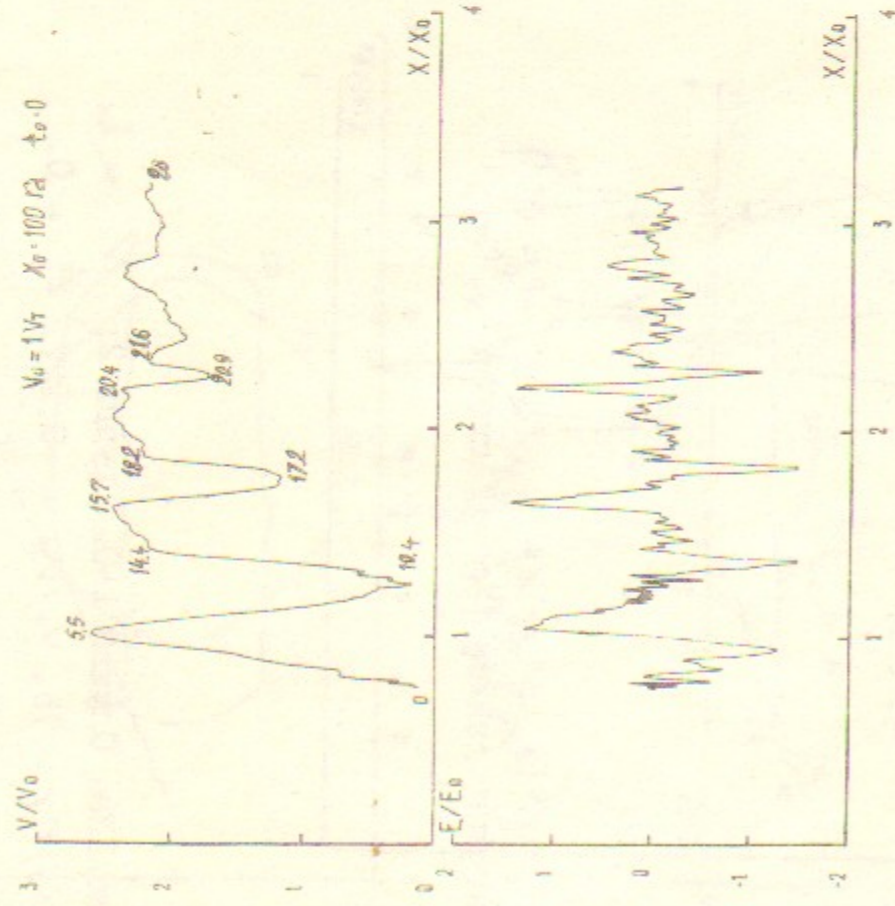


Рис. 14а. Случай I-O. Группа 2; $N = 9$.
 $X_0/\Gamma d = 75$, $V_0/V_T = 0,127$, $t_0 = 0$.

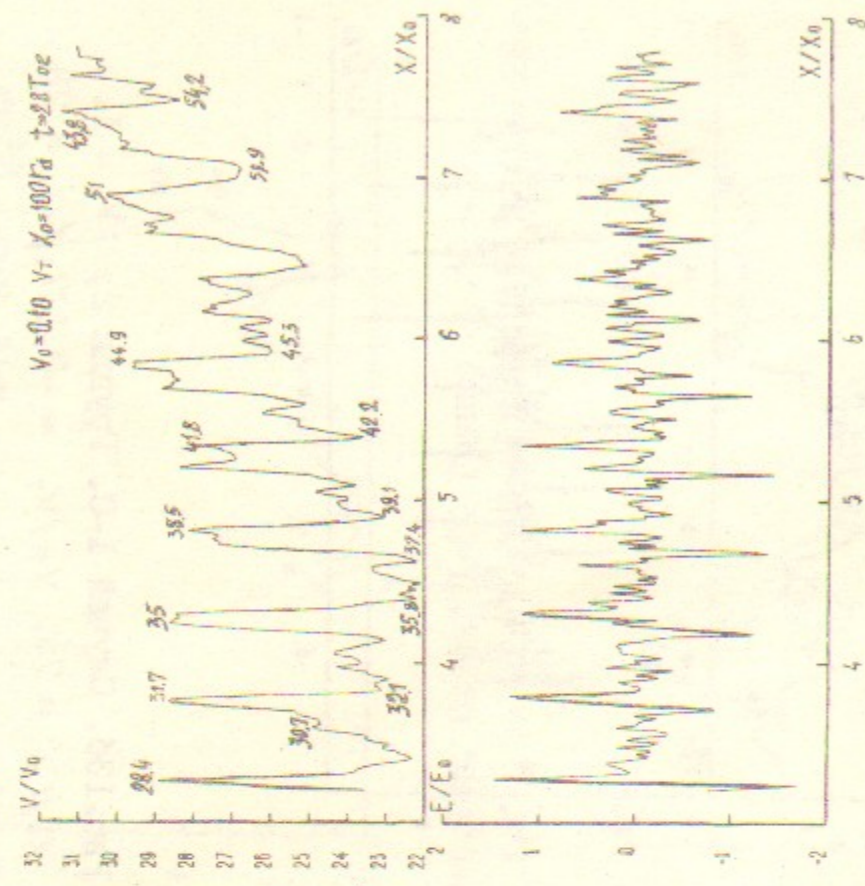


Рис. 14б. Случай I-O. Группа 2; $N = 9$.
 $X_0/\Gamma d = 75$, $V_0/V_T = 0,127$, $t_0/T_{0e} = 28$.

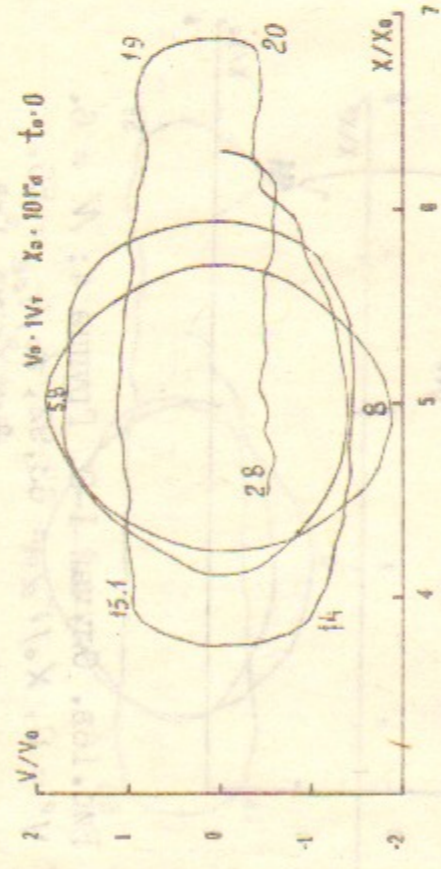


Рис. 15а. Случай I-O. Группа 4; $N = 5$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma d = 62,96$, $t_0 = 0$.

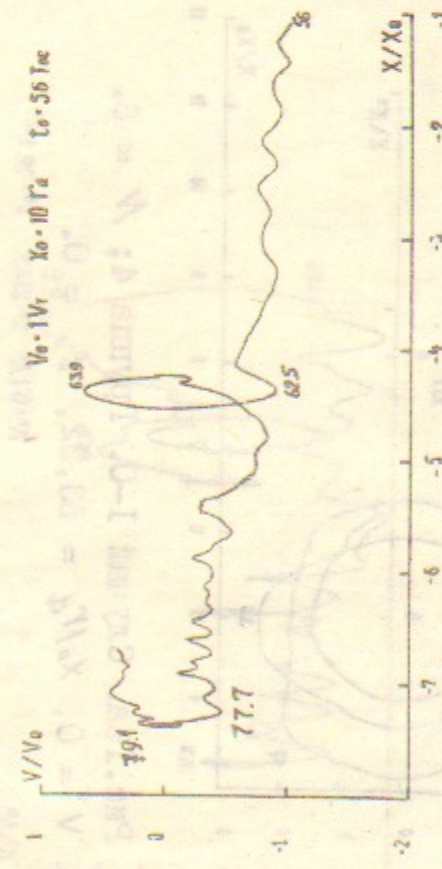


Рис. 15в. Случай I-O. Группа 4; $N = 5$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma d = 62,96$, $t_0/T_{0e} = 56$.

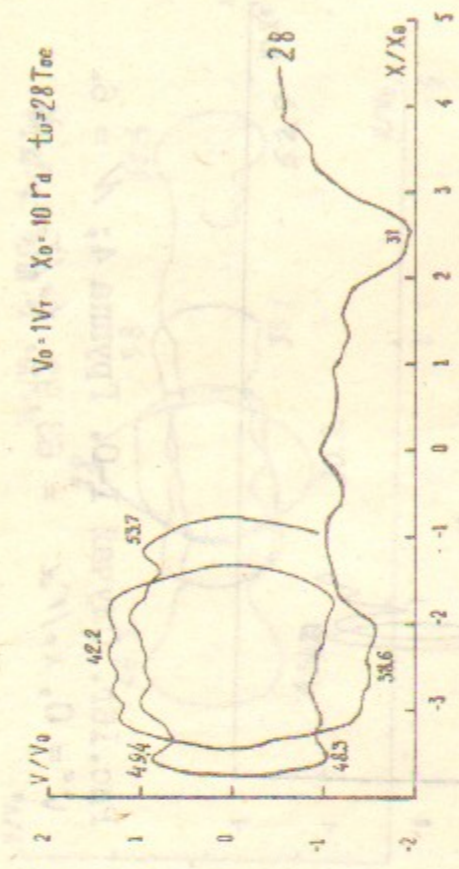


Рис. 15г. Случай I-O. Группа 4; $N = 5$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma d = 62,96$, $t_0/T_{0e} = 28$.

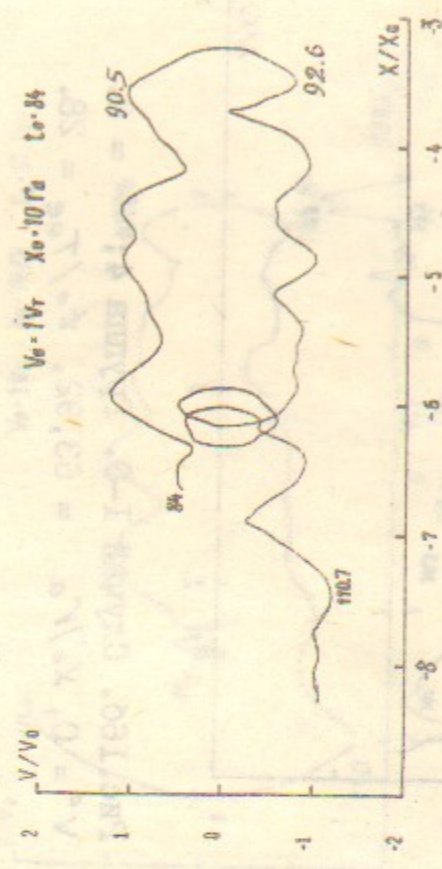


Рис. 15д. Случай I-O. Группа 4; $N = 5$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma d = 62,96$, $t_0/T_{0e} = 84$.

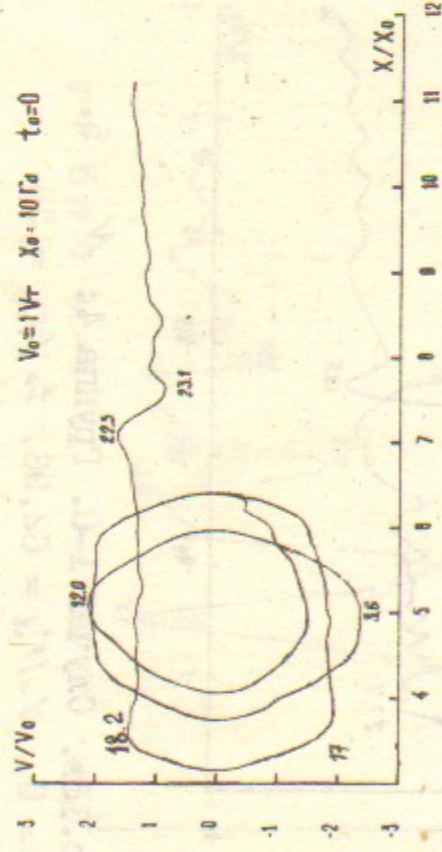


Рис. 16а. Случай I-O. Группа 4; $N = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 63,92$, $t_0 = 0$.

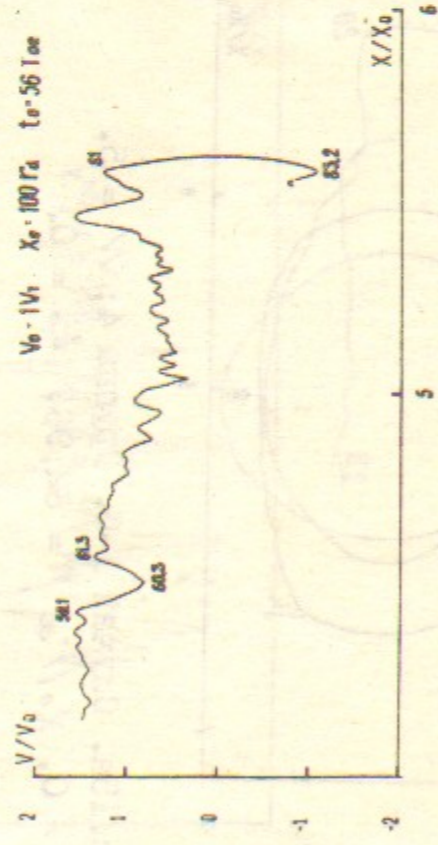


Рис. 16б. Случай I-O. Группа 4; $N = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 63,92$, $t_0/\Gamma_{oe} = 56$.

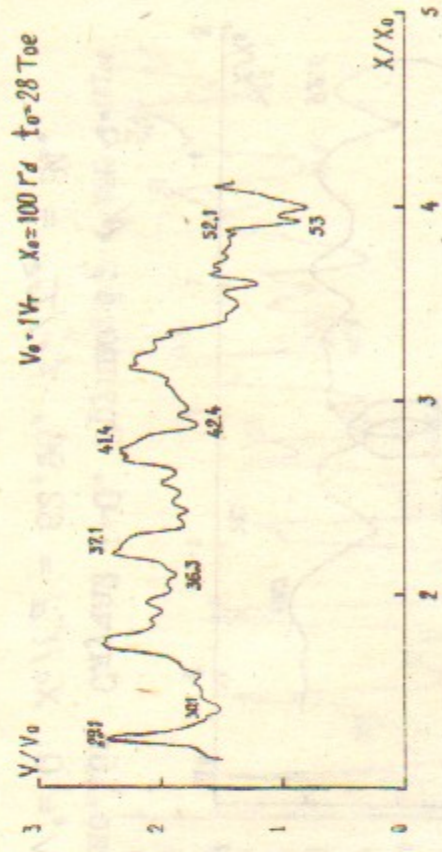


Рис. 16с. Случай I-O. Группа 4; $N = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 63,92$, $t_0/\Gamma_{oe} = 28$.

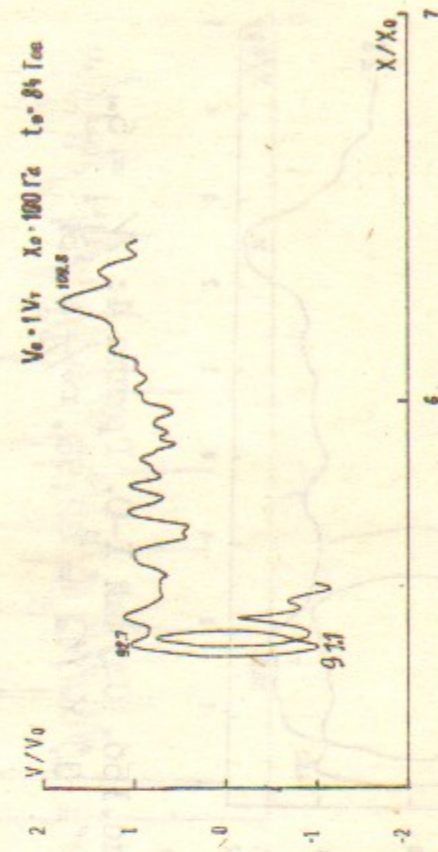


Рис. 16г. Случай I-O. Группа 4; $N = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 63,92$, $t_0/\Gamma_{oe} = 84$.

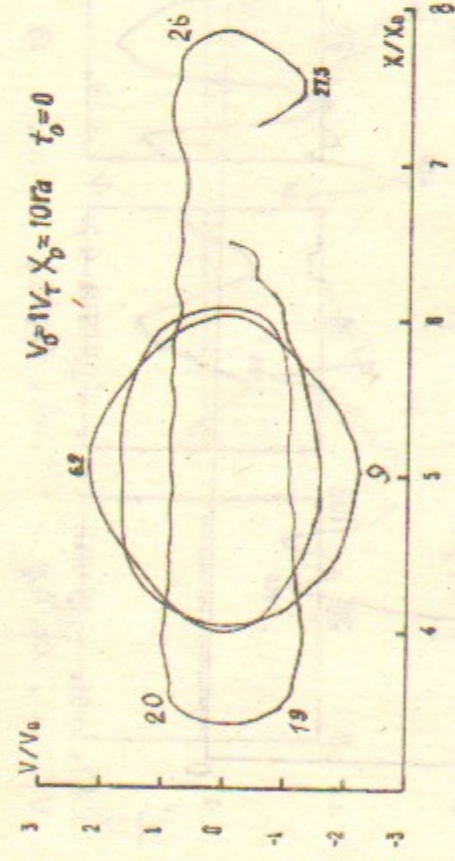


Рис. 17а. Случай I-O. Группа 4; $N = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64,88$, $t_0 = 0$.

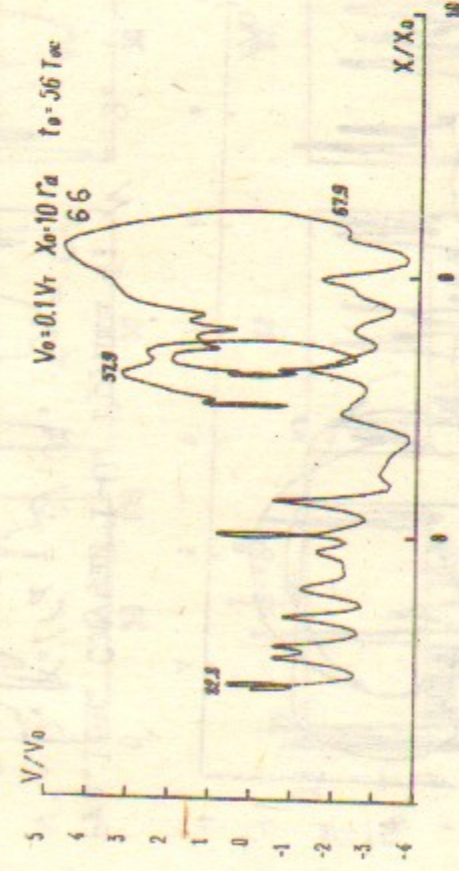


Рис. 17б. Случай I-O. Группа 4; $N = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64,88$, $t_0/\Gamma_{oe} = 56$.

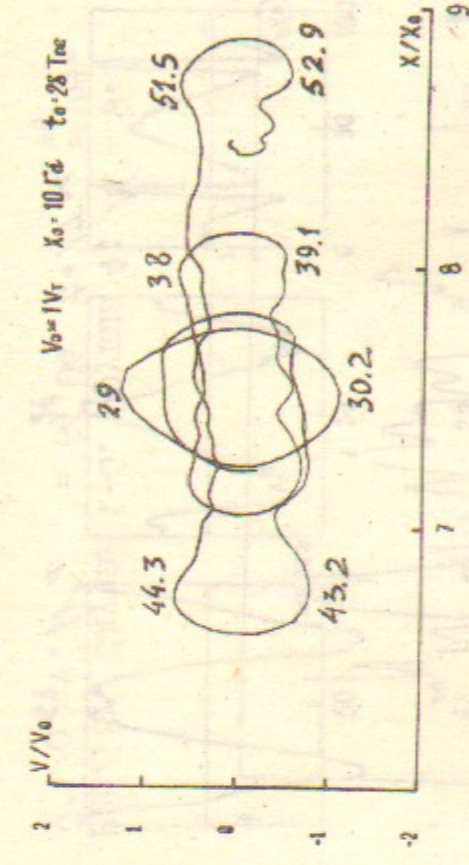


Рис. 17с. Случай I-O. Группа 4; $N = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64,88$, $t_0/\Gamma_{oe} = 28$.

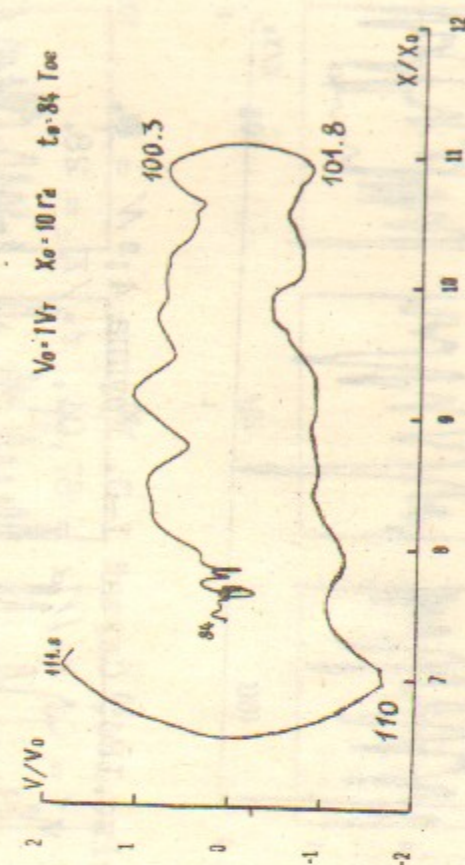


Рис. 17г. Случай I-O. Группа 4; $N = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64,88$, $t_0/\Gamma_{oe} = 84$.

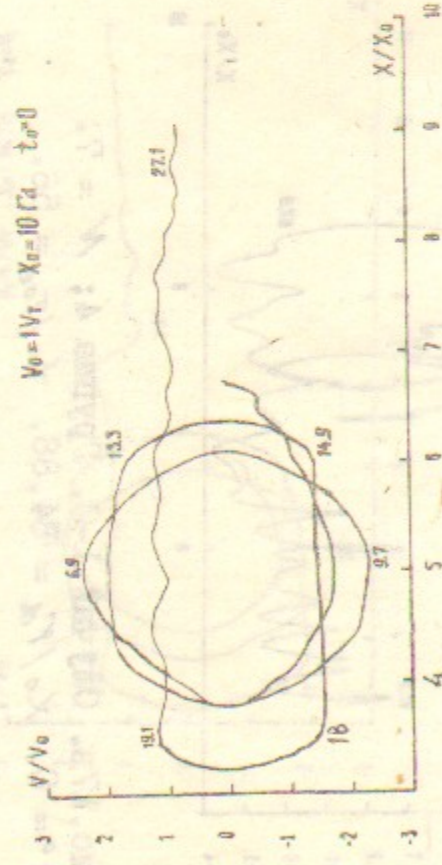


Рис.18а. Случай 1-О. Группа 4; $N = 9$,
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 67,04$, $t_0 = 0$.

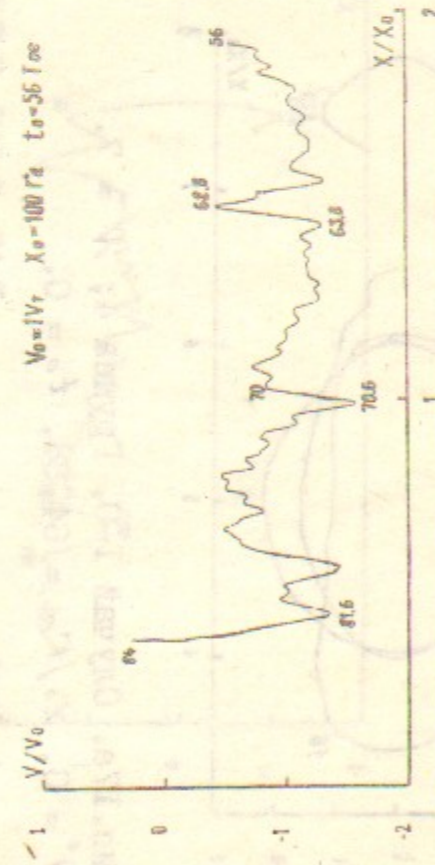


Рис.18б. Случай 1-О. Группа 4; $N = 9$,
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 67,04$, $t_0/t_{0e} = 56$.

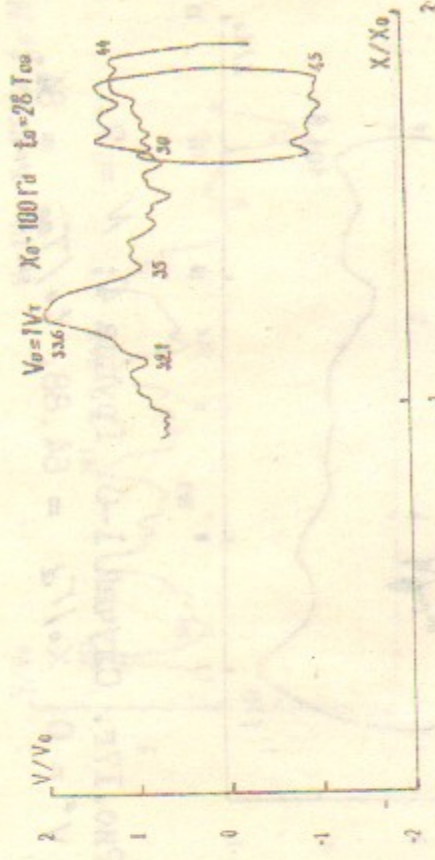


Рис.18с. Случай 1-О. Группа 4; $N = 9$,
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 67,04$, $t_0/t_{0e} = 28$.

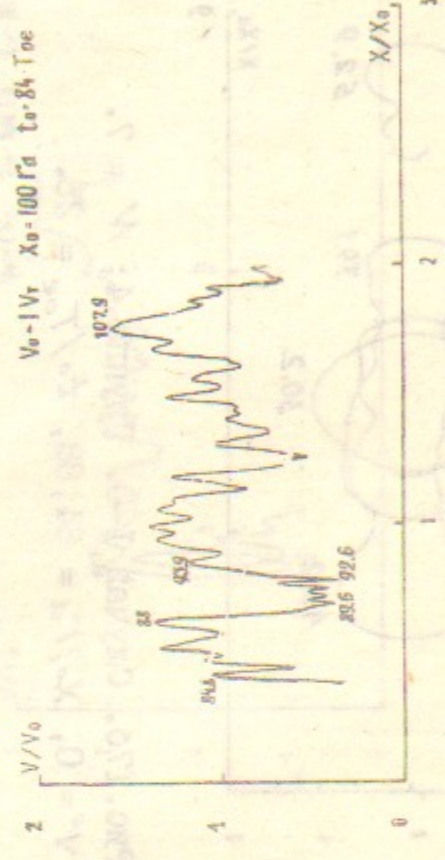


Рис.18г. Случай 1-О. Группа 4; $N = 9$,
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64,04$, $t_0/t_{0e} = 84$.

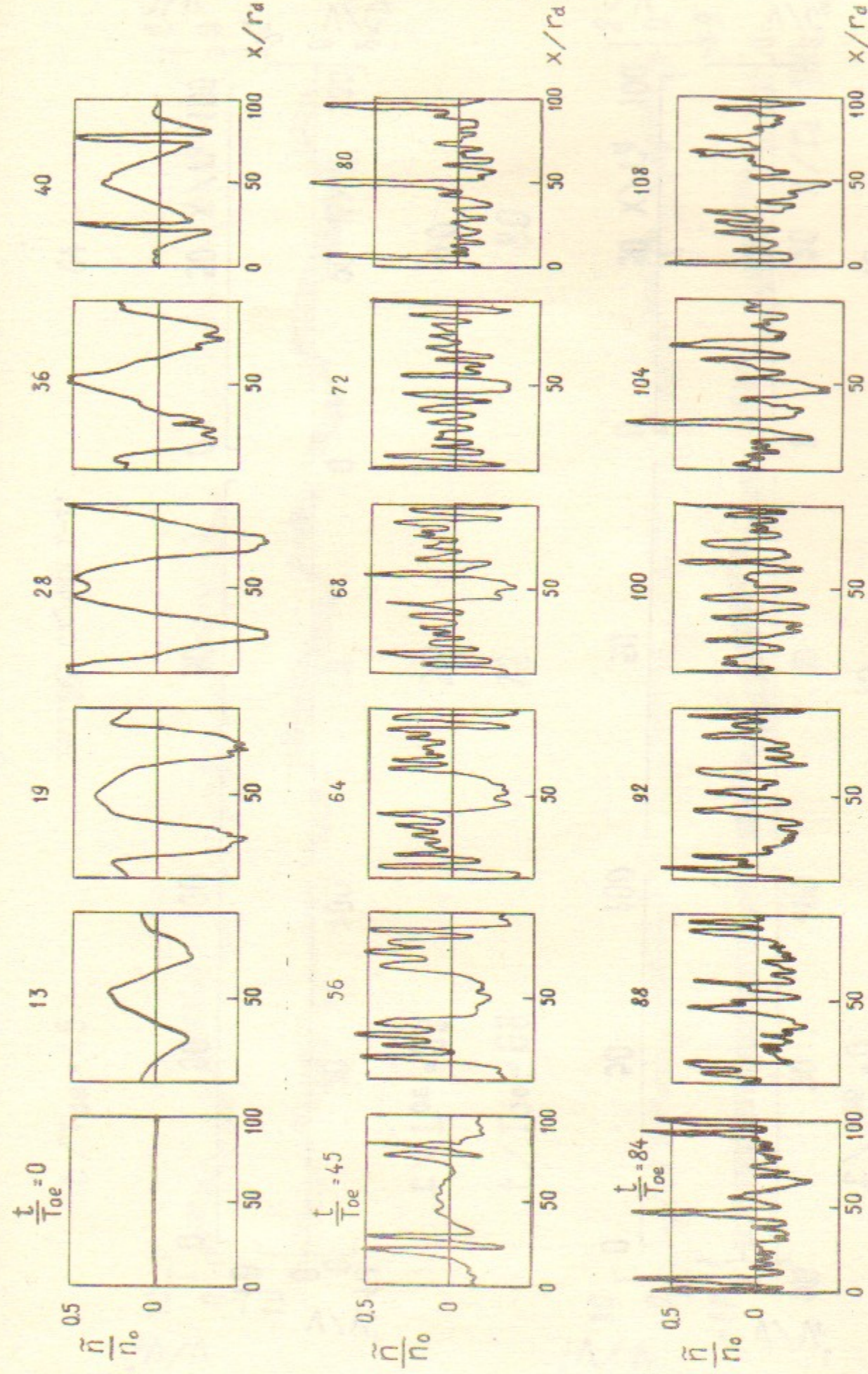
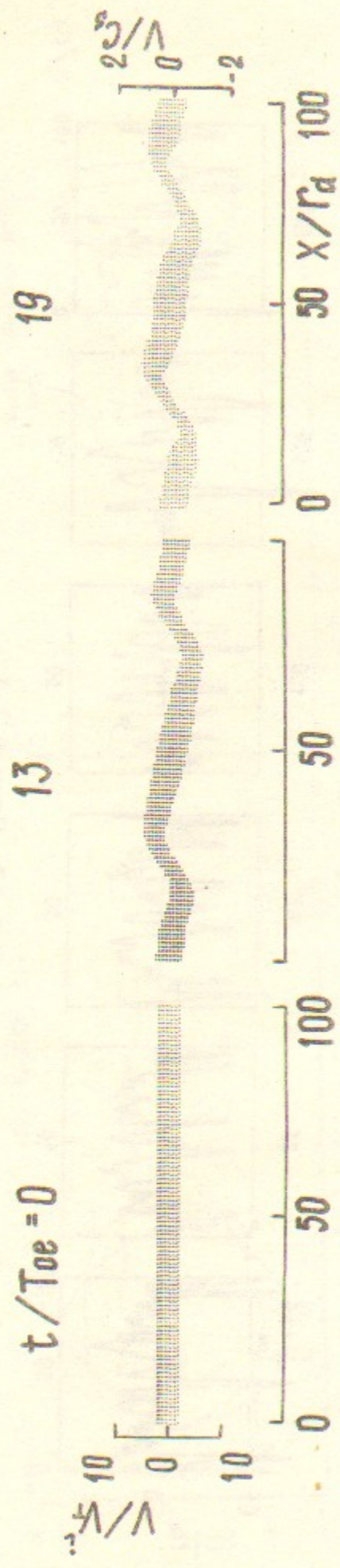


Рис.19. Случай 1-І.



44

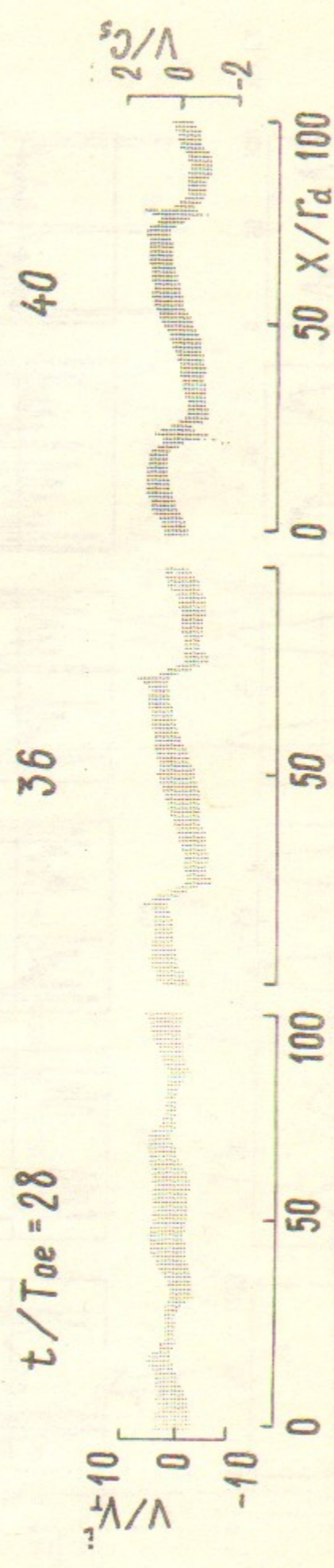
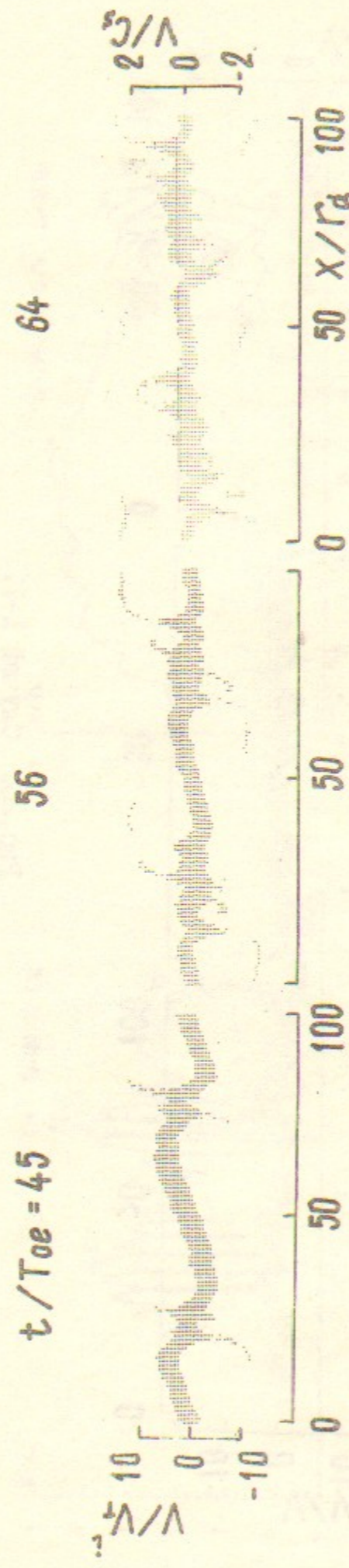


Рис. 20. Случай I-I.



45

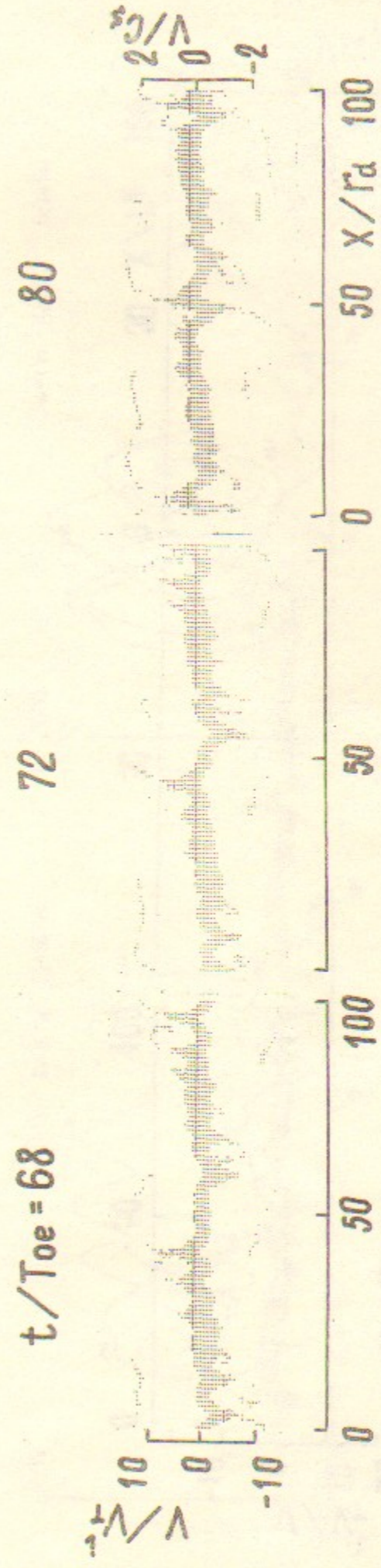
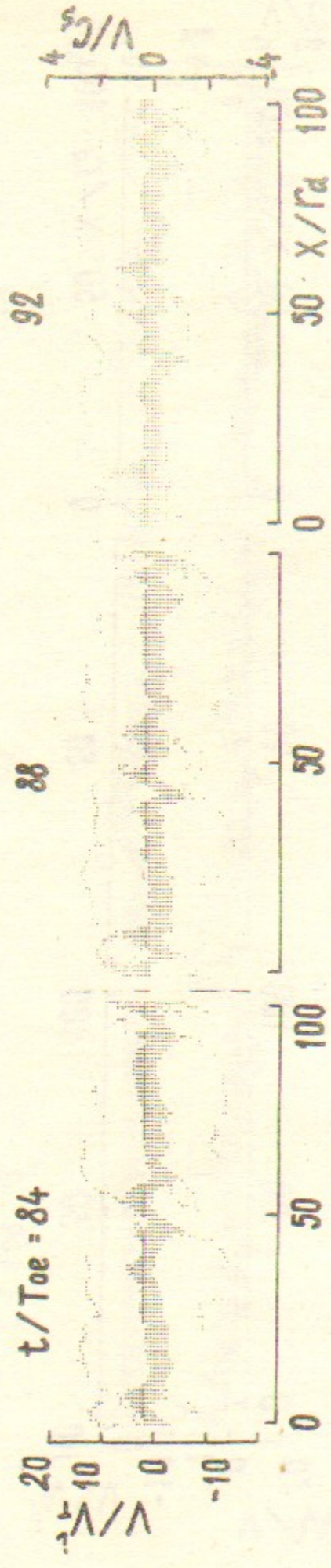
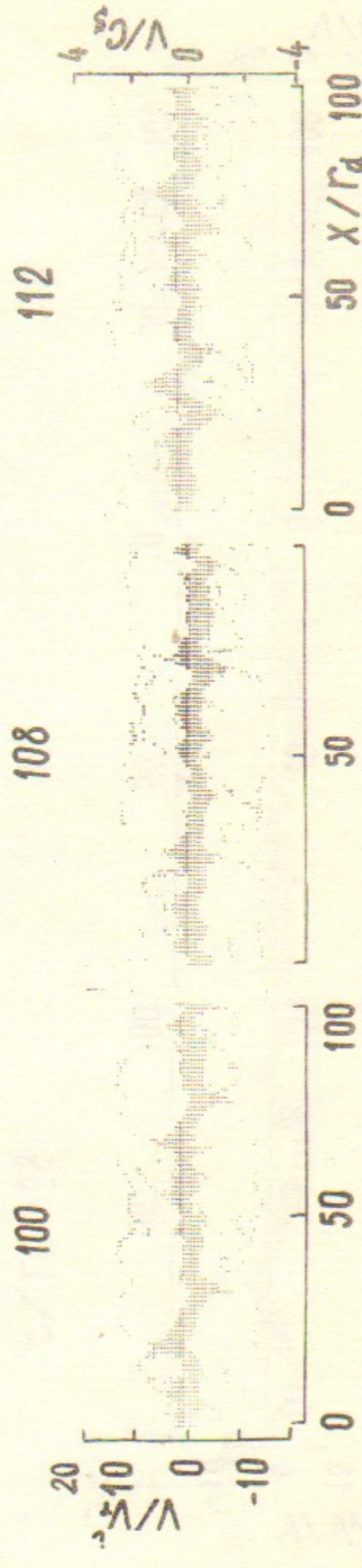


Рис. 20. Случай I-I.



88

92



108

112

Рис. 20. Случай I-I.

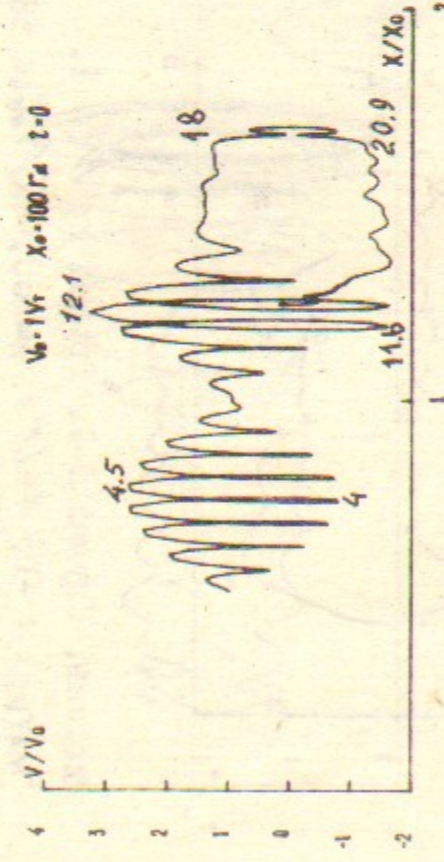


Рис. 21а. Случай I-I. Группа 2; $\mathcal{N} = 9$.

$V_0/V_T = 0,98, \chi_0/\Gamma_d = 50, t_0/T_{oe} = 0.$

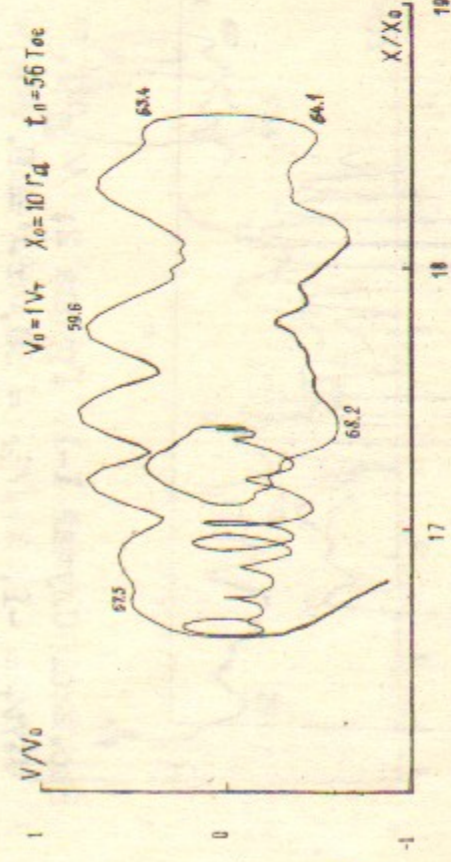


Рис. 21б. Случай I-I. Группа 2; $\mathcal{N} = 9$.

$V_0/V_T = 0,98, \chi_0/\Gamma_d = 50, t_0/T_{oe} = 56.$

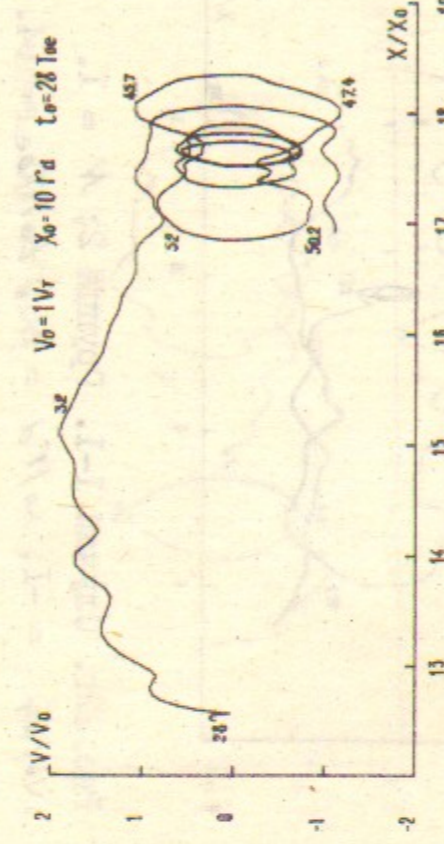


Рис. 21с. Случай I-I. Группа 2; $\mathcal{N} = 9$.

$V_0/V_T = 0,98, \chi_0/\Gamma_d = 50, t_0/T_{oe} = 28.$

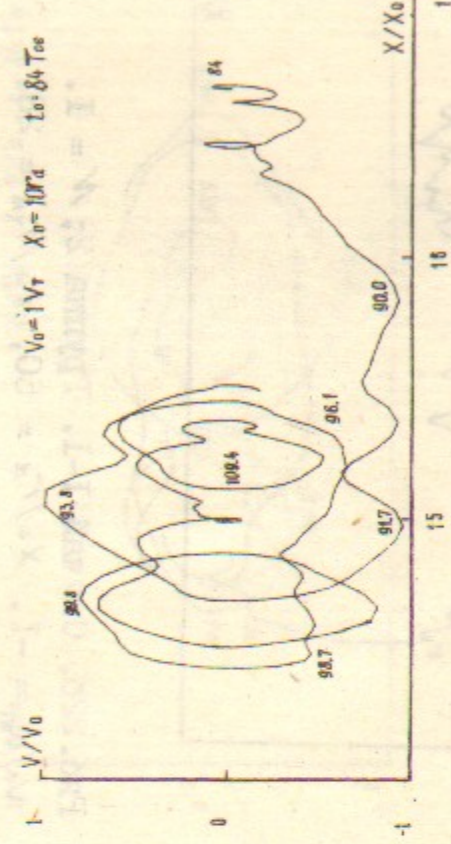


Рис. 21г. Случай I-I. Группа 2; $\mathcal{N} = 9$.

$V_0/V_T = 0,98, \chi_0/\Gamma_d = 50, t_0/T_{oe} = 84.$

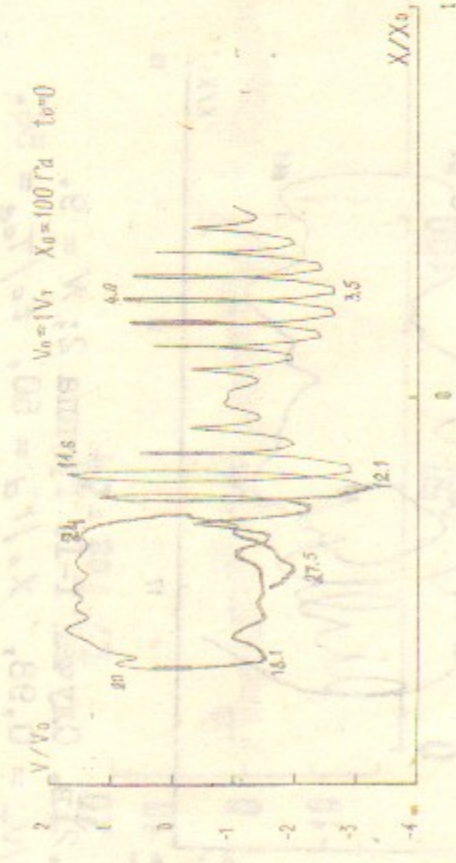


Рис. 22а. Случай I-I. Группа 2; $N = 1$.
 $V_0/V_T = -1$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0 = 0$.

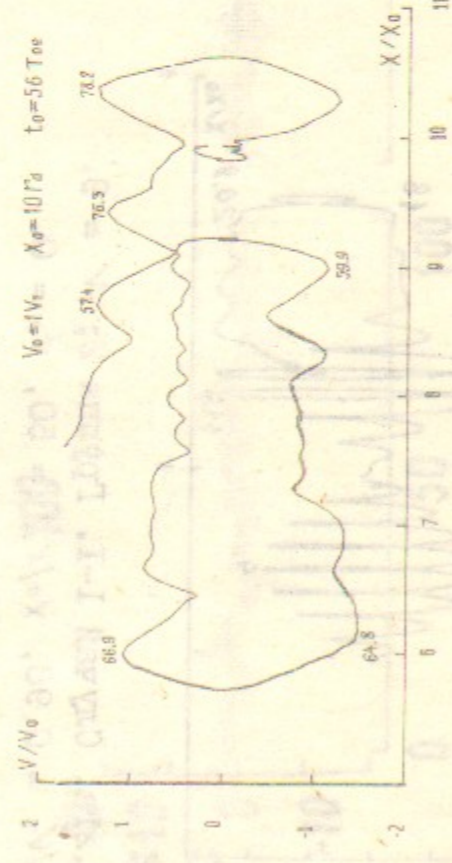


Рис. 22б. Случай I-I. Группа 2; $N = 1$.
 $V_0/V_T = -1$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 56$.

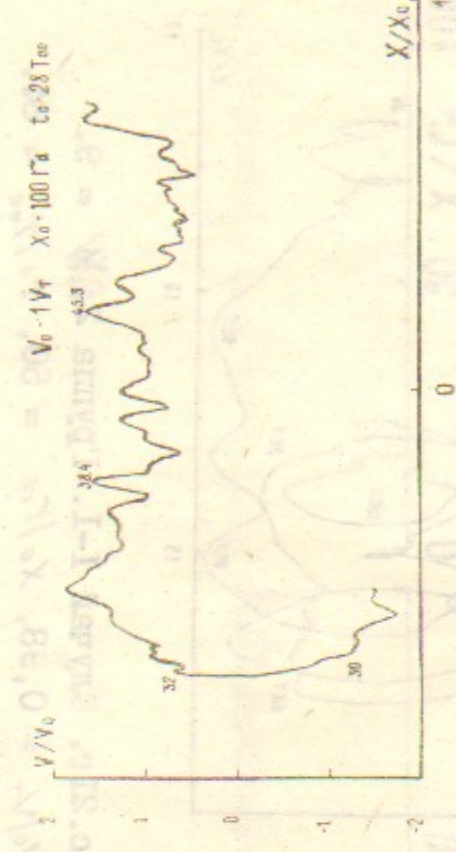


Рис. 22в. Случай I-I. Группа 2; $N = 1$.
 $V_0/V_T = -1$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 28$.

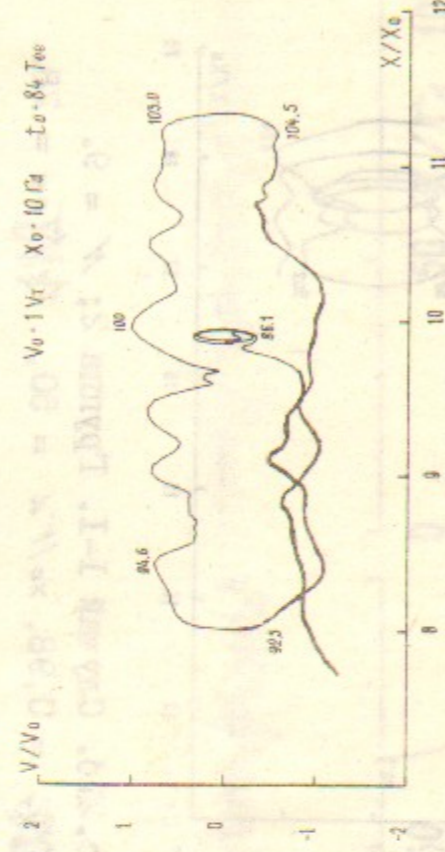


Рис. 22г. Случай I-I. Группа 2; $N = 1$.
 $V_0/V_T = -1$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 84$.

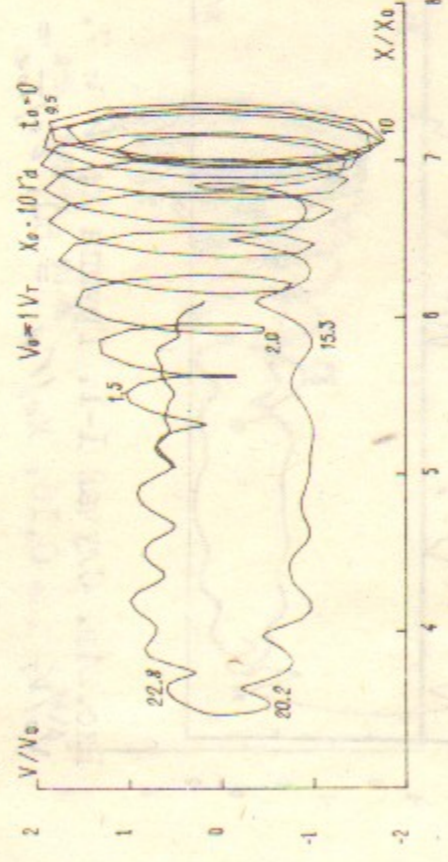


Рис. 23а. Случай I-I. Группа 2; $N = 8$.
 $V_0/V_T = 0,50$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0 = 0$.

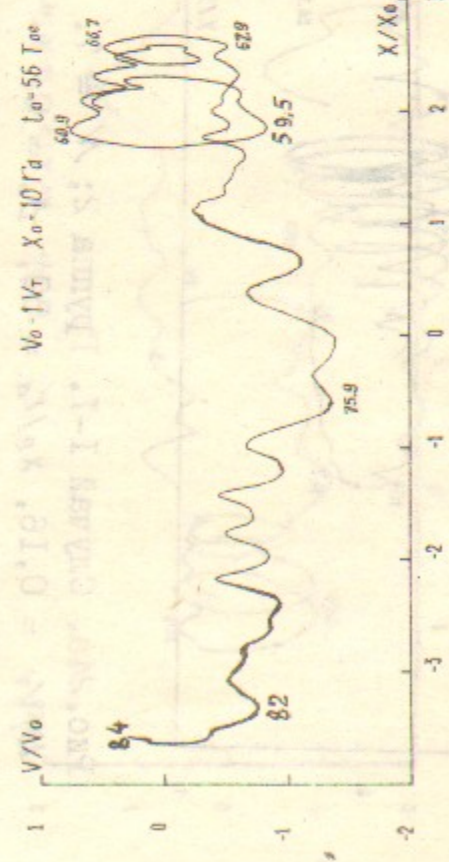


Рис. 23в. Случай I-I. Группа 2; $N = 8$.
 $V_0/V_T = 0,50$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 56$.

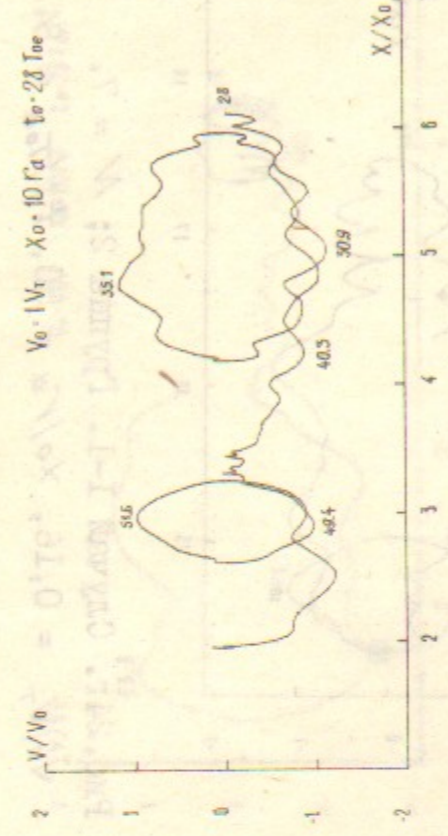


Рис. 23б. Случай I-I. Группа 2; $N = 8$.
 $V_0/V_T = 0,50$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 28$.

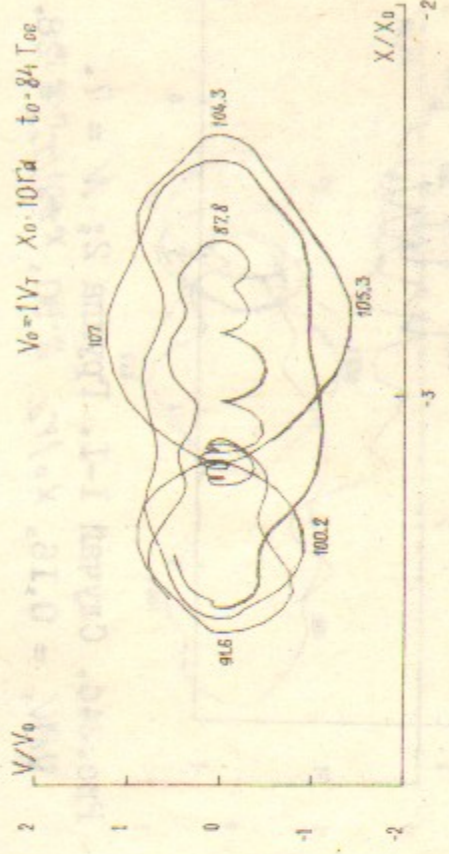


Рис. 23г. Случай I-I. Группа 2; $N = 8$.
 $V_0/V_T = 0,50$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 84$.

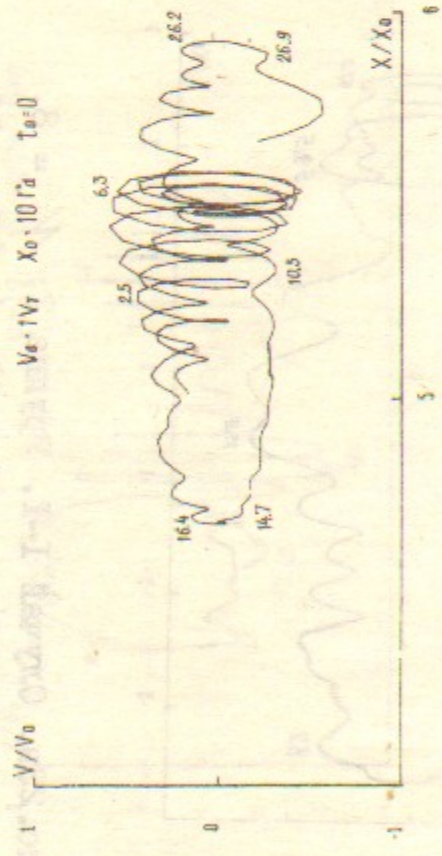


Рис. 24а. Случай I-I. Группа 2; $\mathcal{N} = 7$.
 $X_0/V_T = 0,16$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0 = 0$.

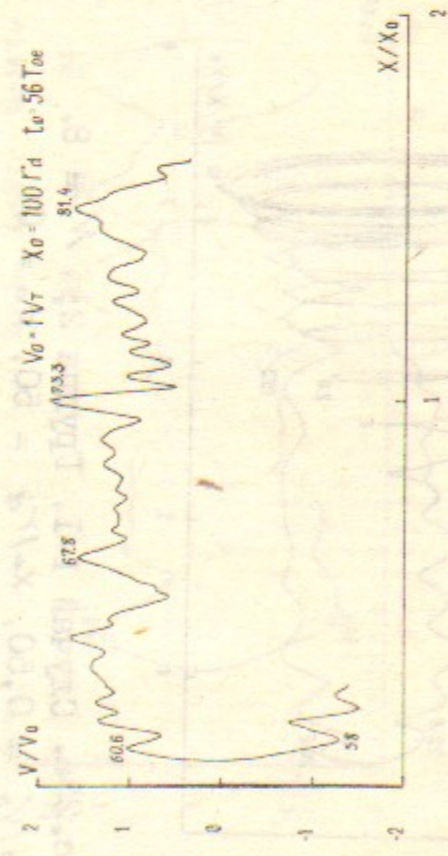


Рис. 24б. Случай I-I. Группа 2; $\mathcal{N} = 7$.
 $V_0/V_T = 0,16$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 56$.

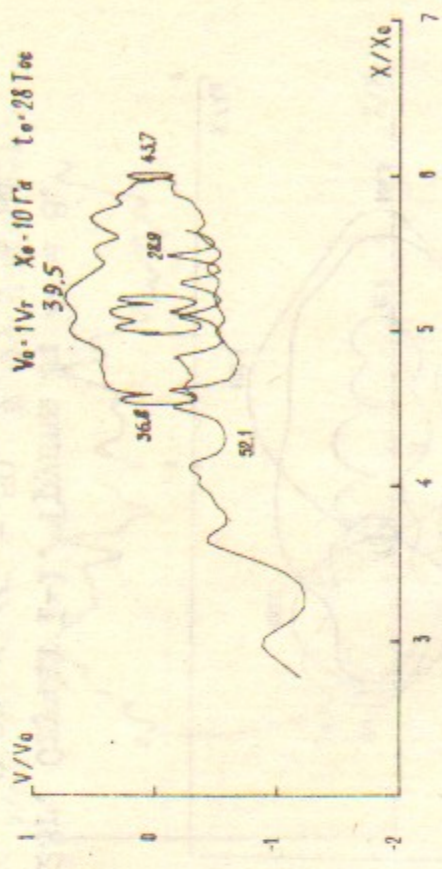


Рис. 24в. Случай I-I. Группа 2; $\mathcal{N} = 7$.
 $V_0/V_T = 0,16$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 28$.

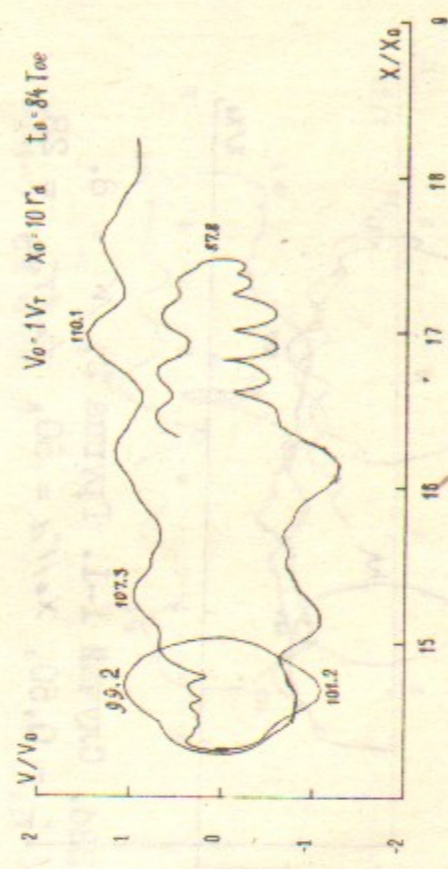


Рис. 24г. Случай I-I. Группа 2; $\mathcal{N} = 7$.
 $V_0/V_T = 0,16$, $X_0/\Gamma_d = 50$, $t_0/T_{oe} = 84$.

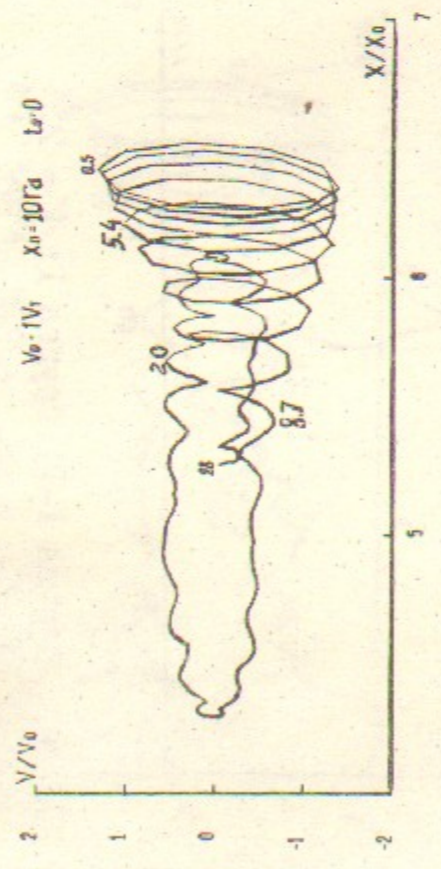


Рис. 25а. Случай I-I. Группа 1; $\mathcal{N} = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64$, $t_0 = 0$.

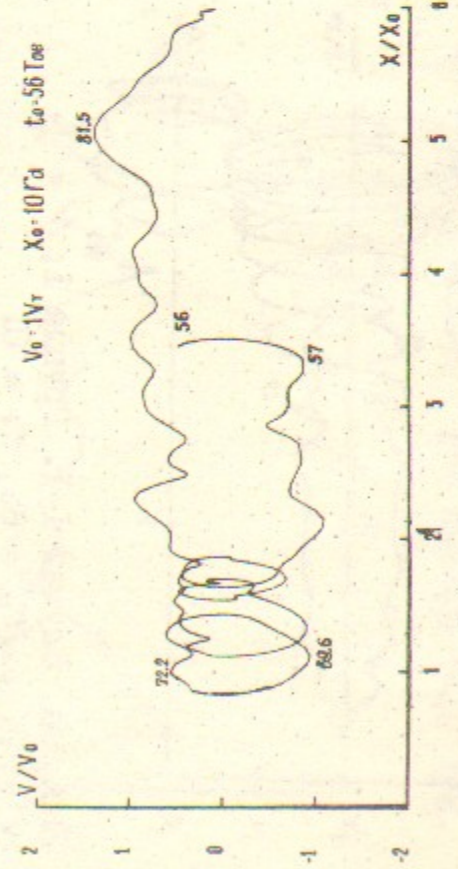


Рис. 25б. Случай I-I. Группа 1; $\mathcal{N} = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64$, $t_0/T_{oe} = 56$.

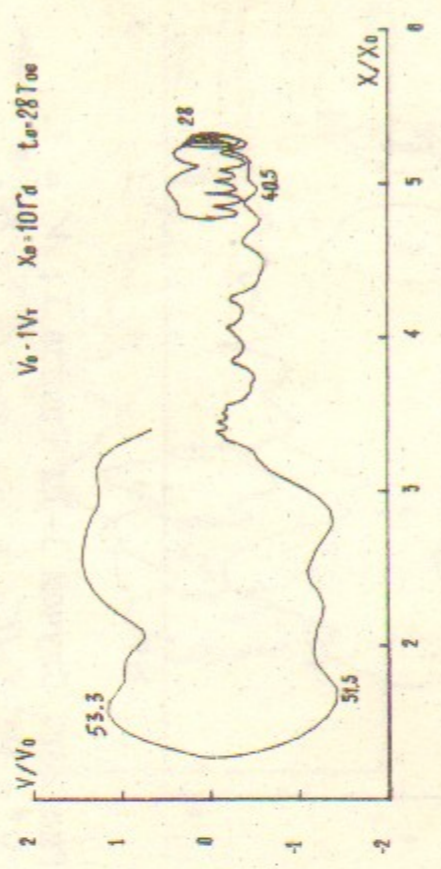


Рис. 25в. Случай I-I. Группа 1; $\mathcal{N} = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64$, $t_0/T_{oe} = 28$.

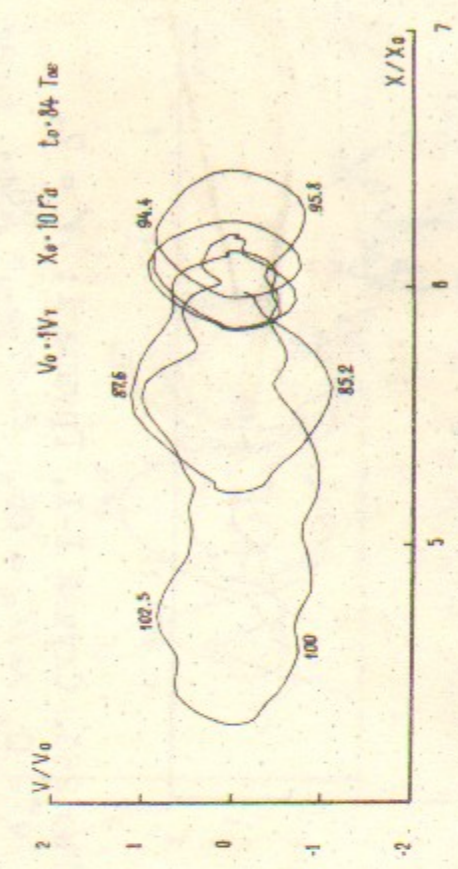


Рис. 25г. Случай I-I. Группа 1; $\mathcal{N} = 6$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma_d = 64$, $t_0/T_{oe} = 84$.

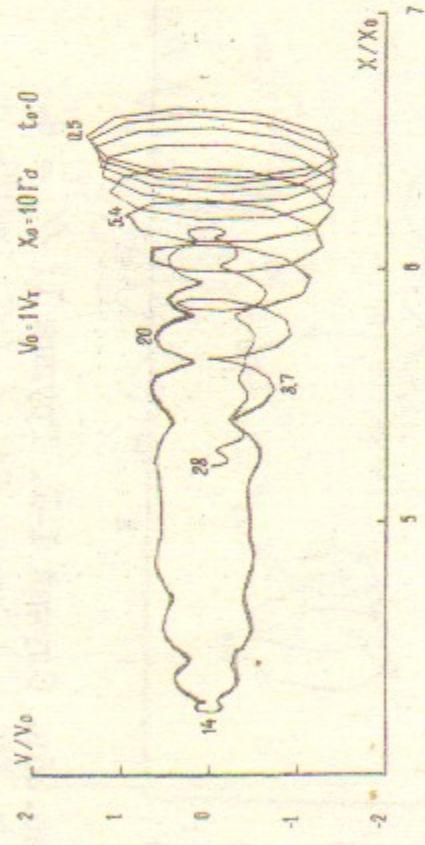


Рис. 26а. Случай I-I. Группа I; $\mathcal{N} = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma\alpha = 65$, $t_0 = 0$.

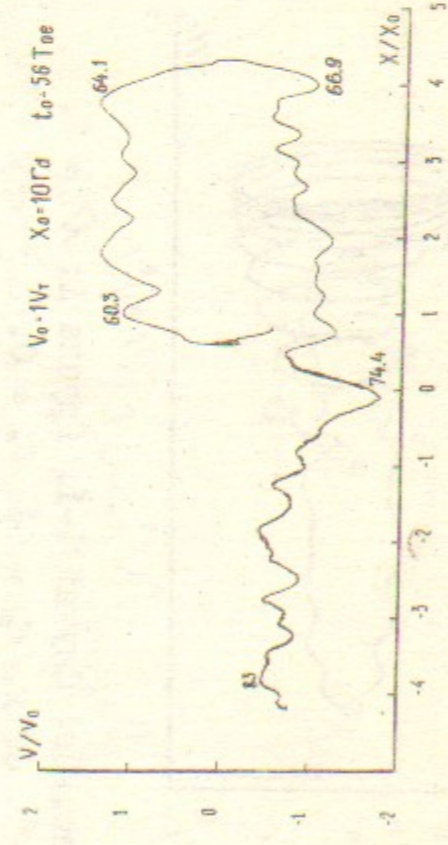


Рис. 26б. Случай I-I. Группа I; $\mathcal{N} = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma\alpha = 65$, $t_0/T_{0e} = 56$.

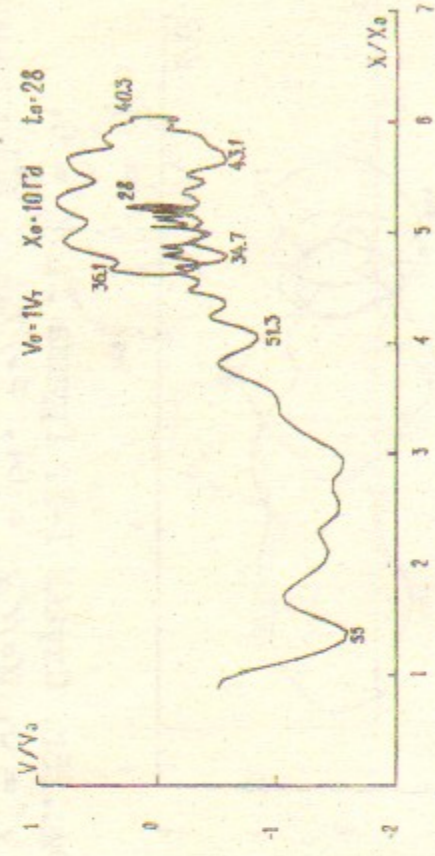


Рис. 26с. Случай I-I. Группа I; $\mathcal{N} = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma\alpha = 65$, $t_0/T_{0e} = 28$.

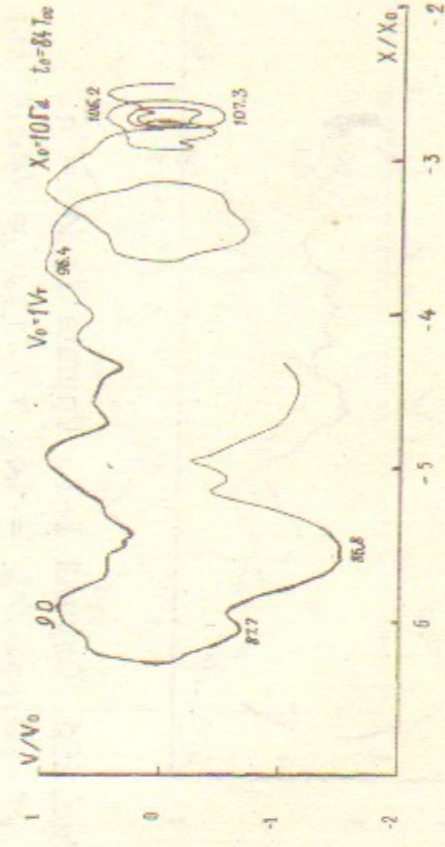


Рис. 26г. Случай I-I. Группа I; $\mathcal{N} = 7$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma\alpha = 65$, $t_0/T_{0e} = 84$.

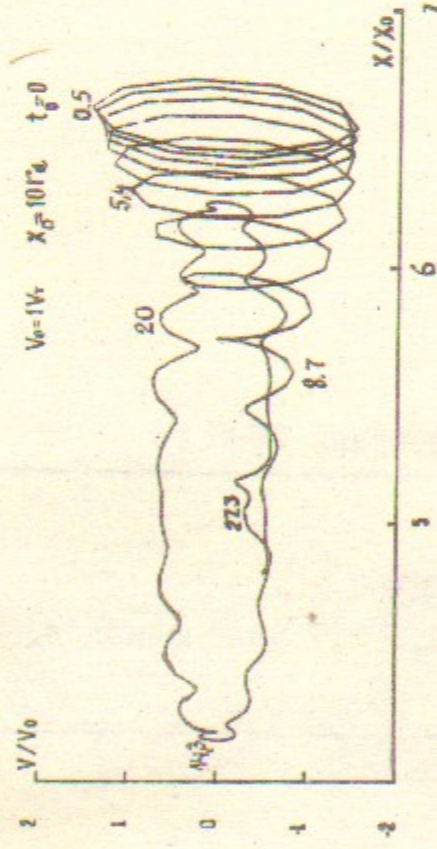


Рис. 27а. Случай I-I. Группа I; $\mathcal{N} = 8$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma\alpha = 66$, $t_0 = 0$.

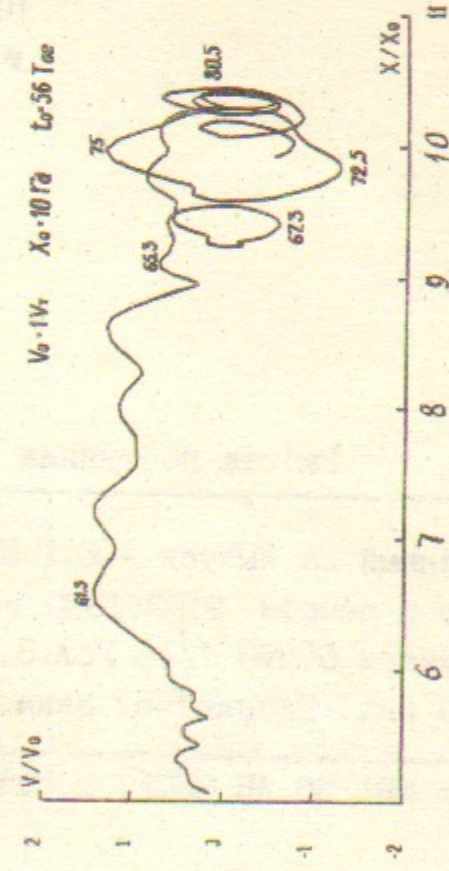


Рис. 27б. Случай I-I. Группа I; $\mathcal{N} = 8$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma\alpha = 66$, $t_0/T_{0e} = 56$.

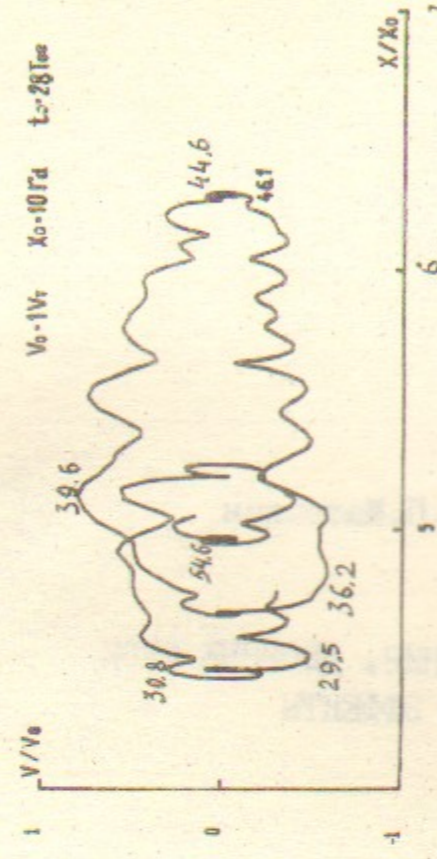


Рис. 27с. Случай I-I. Группа I; $\mathcal{N} = 8$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma\alpha = 66$, $t_0/T_{0e} = 28$.

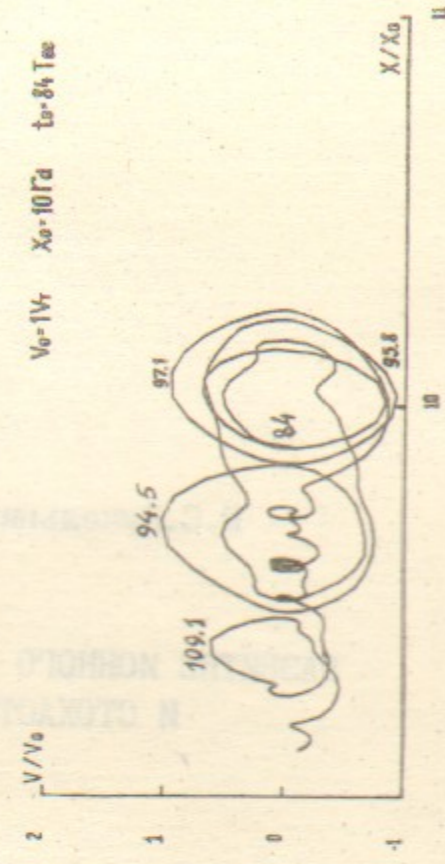


Рис. 27г. Случай I-I. Группа I; $\mathcal{N} = 8$.
 $V^0 = 0$, $X_0/\Gamma\alpha = 66$, $t_0/T_{0e} = 84$.

Н.С.Бучельникова, Е.П.Маточкин

РАЗВИТИЕ ИОННОГО ВОЗМУЩЕНИЯ, ДВОЙНЫЕ СЛОИ
И СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

Препринт

№ 90- 24

Работа поступила - 12 февраля 1990 г.

Ответственный за выпуск - С.Г.Попов

Подписано к печати 2.03.1990 г. МН 02134

Формат бумаги 60x90 1/16 Усл.3,4 печ.л., 2,7 учетно-изд.л.

Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 24

Ротапринт ИЯФ СО АН СССР, г.Новосибирск, 90