

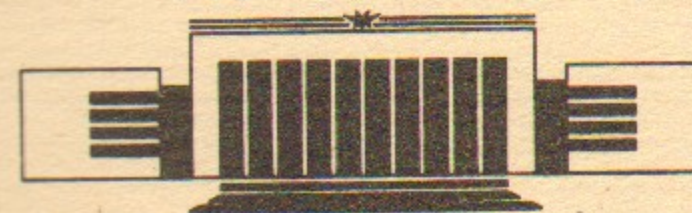


56
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ
им. Г.И. Будкера СО РАН

Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев

ВОЛНА БЕРНШТЕЙНА – ГРИНА – КРУСКАЛА.
II.
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ С ЛЕНГМЮРОВСКОЙ
ВОЛНОЙ.
СТОХАСТИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ

ИЯФ 93-98



НОВОСИБИРСК

Волна Бернштейна – Грина – Крускала. II.
Взаимодействие с ленгмюровской волной.
Стохастические эффекты

Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев

Институт ядерной физики
им. Г.И. Будкера СО РАН
630090, Новосибирск, Россия

АННОТАЦИЯ

Проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию взаимодействия волны БГК ($N = 1$) с ленгмюровской волной ($N = 2$) с фазовыми скоростями $V_{\phi}^I > V_{\phi}^{II}$.

Показано, что основным процессом, к которому приводит взаимодействие, является стохастическая (образование стохастических слоев) или сильная стохастическая неустойчивость. Характер неустойчивости качественно определяется параметром Чирикова $\alpha = \frac{V_z^I + V_z^{II}}{V_{\phi}^I - V_{\phi}^{II}}$ ($V_z = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$). При $\alpha \leq 0.8$ образуются стохастические слои волны БГК и ленгмюровской волны. При $\alpha \sim 0.9 - 1.0$ слои пересекаются и начинается сильная стохастическая неустойчивость, при $\alpha > 1$ она развивается с самого начала.

Развитие сильной стохастической неустойчивости сопровождается вторичными нелинейными эффектами — ростом амплитуды волны БГК и ленгмюровской волны, что приводит к росту α .

Конечной стадией сильной стохастической неустойчивости является формирование новой квазистационарной структуры на фазовой плоскости, включающей всю область стохастического движения.

Показано, что волна БГК неустойчива относительно стохастической или сильной стохастической неустойчивости в результате возбуждения ленгмюровских волн полем ее объемного заряда.

The Bernstein-Greene-Kruskal Wave. II.
The Interaction with the Langmuir Wave.
Stochastic Phenomena

N.S. Buchelnikova, B.N. Laseev

Budker Institute of Nuclear Physics
630090, Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

The interaction of the BGK wave ($N = 1$) and the Langmuir wave ($N = 2$) with the phase velocities $V_{ph}^I > V_{ph}^{II}$ was studied in numerical experiments (PIC-method). It was shown that the interaction leads to the stochastic instability (the formation of the stochastic layers) or to the large scale stochasticity. The type of the instability is defined by the Chirikov parameter $\alpha = \frac{V_{tr}^I + V_{tr}^{II}}{V_{tr}^I - V_{tr}^{II}}$ ($V_{tr} = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$). If $\alpha \leq 0.8$ the stochastic layers near the separatrix of the BGK wave and of the Langmuir wave are formed. If $\alpha \sim 0.9 - 1.0$ the stochastic layers intersect and the large scale stochasticity takes place. If $\alpha > 1$ the large scale stochasticity develops from the very beginning.

The evolution of the large scale stochasticity is accompanied by the secondary nonlinear effects, which lead to the increase of the amplitude of the BGK and Langmuir waves and to the increase of the Chirikov parameter.

The final stage of the large scale stochasticity evolution is the formation of a new quasistationary structure on the phase plane, which includes the region of the stochastic motion.

It was shown that the BGK wave itself is unstable due to the interaction with the Langmuir waves excited by the electric field of the electron density distribution in the BGK wave, which leads to the stochastic instability or the large scale stochasticity.

В настоящей работе описаны численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию волны Бернштейна - Грина - Крускала (БГК) [1] с областью захвата равномерно заполненной электронами. В первой части этой работы [2] описан метод задания волны БГК и рассмотрены некоторые ее свойства. Отмечено, что распределение плотности электронов в волне БГК задает поле объемного заряда. Это поле помимо основной гармоники (рассматривается случай $\lambda = \mathcal{L}$, так что $N = 1$) имеет также гармоники $N = 2 - 3 \dots$, амплитуда которых быстро падает с N . Найдено, что даже в однородной бесстолкновительной плазме с неподвижными ионами развивается стохастическая неустойчивость движения электронов, которая приводит к образованию стохастического слоя в районе сепаратрисы волны БГК. Возможной причиной стохастической неустойчивости являются ленгмюровские волны $N = 2 - 3 \dots$, которые могут возбуждаться полем объемного заряда волны БГК, причем основную роль должна играть гармоника $N = 2$, так как ее амплитуда максимальна, а $(V_{\phi}^I - V_{\phi}^{II})$ минимальна.

В настоящей работе изучается взаимодействие волны БГК с ленгмюровской волной. задается ленгмюровская волна с $\lambda = \lambda^I/2$, т.е. гармоника $N = 2$, с амплитудой, превышающей амплитуду гармоники объемного заряда, и фазовой скоростью $V_{\phi}^{II} < V_{\phi}^I$. Исследуются случаи ленгмюровских волн с разной амплитудой и волн БГК с разной фазовой скоростью. Эти случаи можно характеризовать параметром Чирикова $\alpha = \frac{V_3^I + V_3^{II}}{V_3^I - V_3^{II}}$, где $V_3 = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$, V_3^I , V_3^{II} и V_{ϕ}^I , V_{ϕ}^{II} — амплитуда захвата и фазовая скорость волны БГК $N = 1$ и ленгмюровской волны $N = 2$.

Найдено, что взаимодействие волны БГК с ленгмюровской волной

приводит к стохастической неустойчивости движения электронов. При небольших амплитудах ленгмюровской волны ($\alpha \leq 0.8 - 0.9$) стохастическая неустойчивость приводит к образованию стохастических слоев в районе сепаратрисы волны БГК и ленгмюровской волны. С ростом амплитуды и α ширина слоев растет. Когда слои начинают пересекаться, развивается сильная стохастическая неустойчивость, при которой частицы движутся в области пересекающихся слоев волны БГК и ленгмюровской волны. При $\alpha > 0.9 - 1.0$, сильная стохастическая неустойчивость играет определяющую роль. С ростом амплитуды ленгмюровской волны и α в области стохастического слоя оказывается вся область захвата ленгмюровской волны, но только часть области захвата волны БГК, так что даже при $\alpha \geq 1.0$ в волне БГК сохраняется ядро захваченных частиц. Только когда α становится больше двух, область сильной стохастической неустойчивости занимает полностью обе области захвата.

Развитие сильной стохастической неустойчивости сопровождается некоторыми новыми нелинейными эффектами. Так начальная стадия этой неустойчивости связана с выходом электронов из захвата волной БГК ($N = 1$) и с захватом их ленгмюровской волной ($N = 2$) с $V_{\phi}^{II} < V_{\phi}^I$. Поскольку захват электронов волной $N = 2$ происходит в фазе торможения, это приводит к росту амплитуды $N = 2$ и, следовательно, ведет к росту α и ускорению стохастической неустойчивости. В результате растет число электронов, выходящих из захвата волной $N = 1$ и захватываемых волной $N = 2$. Выход электронов из захвата волной БГК приводит к дисбалансу числа ускоряющихся и тормозящихся захваченных электронов. В результате амплитуда волны БГК и α растут. Таким образом, развитие сильной стохастической неустойчивости сопровождается изменением амплитуды волны БГК и ленгмюровской волны.

На конечной стадии сильной стохастической неустойчивости формируется новая структура, занимающая на фазовой плоскости область, включающую частично или полностью области захвата волны БГК и ленгмюровской волны, а также их стохастические слои. При этом электроны движутся во всей стохастической области. Число ускоряющихся и тормозящихся электронов в каждый момент времени одинаково. В результате энергия образовавшейся структуры сохраняется, если нет захвата электронов плазмы, а сама структура имеет характер квазистационарного образования типа разновидностей волн БГК.

При изучении случаев, когда ленгмюровская волна не задается, найдено, что волна БГК неустойчива относительно стохастической или сильной стохастической неустойчивости в результате возбуждения ленгмюровских волн полем ее объемного заряда. При малых плотностях объем-

ного заряда неустойчивость приводит к формированию стохастического слоя в районе сепаратрисы волны БГК, но практически не меняет ее параметров, что наблюдалось в работе [2]. С ростом плотности объемного заряда уменьшается фазовая скорость волны БГК, растет амплитуда ленгмюровских волн и соответственно растет α . В результате при стохастической неустойчивости растет ширина стохастического слоя волны БГК и ленгмюровских волн. При дальнейшем росте плотности слои пересекаются, развивается сильная стохастическая неустойчивость, становятся существенными вторичные нелинейные эффекты, приводящие к росту амплитуды самой волны БГК и ленгмюровских волн. При больших плотностях объемного заряда сильная стохастическая неустойчивость приводит к полному разрушению волны БГК и образованию новой структуры.

Численный эксперимент выполнялся методом частиц в ячейках. Рассматривалась одномерная система длиной $\mathcal{L}/r_d = 100$ или 200 с периодическими граничными условиями. Для электронов и ионов плазмы задавалось максвелловское распределение по скоростям с $T_e/T_i = 30$ $M/m = 10^{10}$, обрезанное на $V \sim \pm 2V_T(2V_T^i)$ из-за ограниченности числа счетных частиц ($N^e = N^i = 10^4$).

Метод задания волны БГК описан в первой части работы [2]. В начальный момент времени задавалась ленгмюровская волна с $\lambda^I = \mathcal{L}$, $N = 1$. Область захвата этой волны заполнялась электронами симметрично относительно фазовой скорости $V = V_{\phi}^I$ и $x = x_m^I$ (x_m — максимум сепаратрисы). Для более равномерного заполнения применялся метод "взвешивания", эквивалентный дроблению электрона на β частиц (будем называть их b -электроны) с массой m/β и зарядом e/β , но с тем же e/m , что у электрона. В настоящей работе задавалась ленгмюровская волна с начальными параметрами $V_{\phi}/V_T = 16$, $E = 17.7$ (здесь и далее приводится значение E нормированное на mr_d/eT_{oe}^2). Обычно, число электронов $N_b^0 = 50$, $\beta = 270$, так что число b -электронов $N_b = 13500$. При изменении N_b^0 сохранялось $N_b = 13500$ и менялось β . Фазовая скорость и амплитуда волны БГК зависят от N_b^0 и начальных параметров ленгмюровской волны и определяются в численном эксперименте методом последовательных приближений [2].

Для задания бегущей ленгмюровской волны в начальный момент времени задавались синусоидальные возмущения плотности и скорости электронов плазмы, соответствующие линейной монохроматической волне с $\lambda^{II} = \mathcal{L}/2$, $N = 2$. Отметим, что существует некоторая неопределенность в амплитуде ленгмюровской волны, так как задаваемая волна

складывается с волной, возбуждаемой полем объемного заряда волны БГК. В большинстве рассматриваемых случаев компонента объемного заряда мала [2].

Проводилось три серии численных экспериментов. В первой (случаи 1 и 2) и второй (случаи 1-1÷1-4) серии изучалось взаимодействие волны БГК и ленгмюровской волны при разных амплитудах ленгмюровской волны, в серии 3 (случаи 2-1÷2-3) — при разных N_b^0 и фазовых скоростях волны БГК. Начальные параметры волны БГК $N = 1$ и ленгмюровской волны $N = 2$ приведены в табл. 1.

Для исследования стохастических эффектов использовался метод, применявшийся нами ранее [3, 4]: внутри и вне области захвата волн $N = 1$, $N = 2$ задавались группы пробных частиц с $e = m = 0$, но с тем же e/m , что у электрона. Изучались траектории на фазовой плоскости пробных частиц и b -электронов. Обычно задается 10 групп пробных частиц по 10 частиц в группе и выводится 9 траекторий по одной в группе. Схема задания пробных частиц в разных случаях показана на рис. 1, а — г. На схеме и на фазовых плоскостях, приведенных ниже, частицы в разных группах обозначаются разными буквами. В случае 1 пробные частицы задаются только в области захвата волны БГК $N = 1$ с одинаковыми начальными $x_0 = x_m^I$ (рис. 1, а). В случаях 1-1, 2-2 выводятся только траектории b -электронов с $x_0 = x_m^I$ и V_0 в той же области, что на рис. 1, а. В случаях 2, 1-2 пробные частицы задаются по схеме рис. 1, б, в случаях 1-3 и 1-4 — по схеме рис. 1, в, г. В случае 2-3 пробные частицы не задавались и траектории не выводились. Начальные координаты частиц с траекториями приведены в табл. 2.

Стохастическая неустойчивость приводит к формированию стохастического слоя — области фазового пространства, в которой движение частиц является стохастическим. Границы стохастического слоя определялись по нескольким точкам: границы по скорости V определялись для точек $x \sim x_m^{I,II}$ и $x \sim x_0^{I,II}$ (x_m^N, x_0^N — максимум и узел сепаратрисы), границы по x — для точек $V = V_\phi^{I,II}$. Внешние границы стохастического слоя по V можно определить по максимальной и минимальной скорости b -электронов и пробных частиц на $x \sim x_m^{I,II}$ и $x \sim x_0^{I,II}$, внутренние границы по V на $x \sim x_m^{I,II}$ — по максимальной и минимальной начальной скорости V_0 частиц, выходящих из захвата и имеющих стохастические траектории, а также по максимальной и минимальной скорости на $x \sim x_m^{I,II}$ стохастических траекторий. Границы по x на $V \sim V_\phi^{I,II}$ можно определить как границы области, куда не попадают стохастические траектории. Мы не ставили своей целью точно определить границы

Начальные параметры волны БГК ($N = 1$) и ленгмюровской волны ($N = 2$) Таблица 1

Случай	Волна БГК				Ленгмюровская волна				α	N_b^0	$\frac{W_b^0}{W_e^0}$				
	$\frac{\lambda^I}{r_d}$	$\frac{V_{\phi 0}^I}{V_T}$	$\frac{V_+^I}{V_T}$	$\frac{V_-^I}{V_T}$	$\frac{\lambda^{II}}{r_d}$	$\frac{V_{\phi 0}^{II}}{V_T}$	$\frac{V_+^{II}}{V_T}$	$\frac{V_-^{II}}{V_T}$							
1	200	27.9	13.6	6.6	34.5	21.3	100	16.28	0.41*	0.81	17.09	15.47	0.64	50	4.58
2	200	27.9	13.6	6.6	34.5	21.3	100	16.28	3.58 (4.0)	2.40	18.68	13.88	0.77	50	4.58
1-1	100	15.1	15.6	5.0	20.1	10.1	50	8.15	0.21*	0.41	8.56	7.74	0.78	50	1.29
1-2	100	15.1	15.6	5.0	20.1	10.1	50	8.15	1.98 (2.2)	1.26	9.41	6.89	0.91	50	1.29
1-3	100	15.1	15.6	5.0	20.1	10.1	50	8.15	4.28 (4.5)	1.86	10.01	6.29	0.99	50	1.29
1-4	100	15.1	15.6	5.0	20.1	10.1	50	8.15	23.9 (24.2)	4.39	12.54	3.76	1.36	50	1.29
2-1	100	15.1	15.6	5.0	20.1	10.1	50	8.15	0.21*	0.41	8.56	7.74	0.78	50	1.29
2-2	100	14.0	13.5	4.7	18.7	9.3	50	8.15	0.42*	0.58	8.73	7.57	0.90	100	2.23
2-3	100	11.8	9.3	3.9	15.7	7.9	50	8.15	0.86*	0.83	8.98	7.32	1.30	200	3.14

$V_3^N = 2\sqrt{\frac{e\varphi^N}{m}}$; $E_0^{II}, V_{\phi 0}^{II}$ — амплитуда гармоники $N = 2$ по спектру, включающая компоненту поля объемного заряда, в скобках амплитуда задаваемой ленгмюровской волны; $V_+^I = V_{\phi 0}^I + V_{\phi 0}^{II}$; $V_-^I = V_{\phi 0}^I - V_{\phi 0}^{II}$; $V_+^{II} = V_{\phi 0}^{II} + V_{\phi 0}^I$; $V_-^{II} = V_{\phi 0}^{II} - V_{\phi 0}^I$. $\alpha = \frac{V_+^I + V_+^{II}}{V_{\phi 0}^I - V_{\phi 0}^{II}}$; N_b^0 — число захваченных электронов в волне БГК; W_b^0, W_e^0 — энергия электронов в волне БГК и начальная энергия электронов плазмы.
* — компонента поля объемного заряда (ленгмюровская волна не задавалась).

Начальные координаты x , V траекторий на фазовой плоскости Таблица 2

Случай	V_+^I	V_-^I	V_+^{II}	V_-^{II}	$N_{mp} = 1$	2	3	4	5	6	7	8	9
1	V	217.2	134.0	107.4*	97.2*	216.6	214.6	212.6	208.6	142.6	140.6	138.6	134.6
	$\frac{x}{r_d}$	100	100	50	50	100	100	100	100	100	100	100	100
2	V	217.2	134.0	118.3	86.3	216.5	134.7	129.7	121.7	111.7	92.9	118.1	86.5
	$\frac{x}{r_d}$	100	100	50	50	100	100	100	100	100	100	50	0
1-1	V	126.3	63.3	53.8*	48.6*	126.1	123.9	121.7	117.3	72.2	70.0	67.9	65.7
	$\frac{x}{r_d}$	50	50	25	25	50	50	50	50	50	50	50	50
1-2	V	126.3	63.3	59.6	42.8	126.3	63.3	62.2	60.5	56.1	46.2	59.4	43.0
	$\frac{x}{r_d}$	50	50	25	25	50	50	50	50	50	50	25	0
1-3	V	126.3	63.3	63.2	39.2	126.3	118.4	71.2	63.3	58.2	44.2	63.0	39.4
	$\frac{x}{r_d}$	50	50	25	25	50	50	50	50	50	50	25	0
1-4	V	126.3	63.3	79.0	23.4	126.3	110.5	79.1	63.3	78.8	64.9	37.5	23.6
	$\frac{x}{r_d}$	50	50	25	25	50	50	50	50	25	25	25	50
2-2	V	117.5	58.7	54.9*	47.5*	116.6	114.5	112.4	108.2	68.0	65.9	63.8	61.7
	$\frac{x}{r_d}$	50	50	25	25	50	50	50	50	50	50	50	50
2-3	V	98.3	49.7	56.4*	46.0*								

V нормировано на $V_T/2\pi$; $V_3 = 2\sqrt{\frac{eE}{m}}$; V_{30}^{II} — по E_0^{II} задаваемой волны $N = 2$, в случаях * — по компоненте поля объемного заряда E_b^{II} ; $V_+^I, V_-^I = V_{\phi 0}^I + V_{30}^I$; $V_+^{II}, V_-^{II} = V_{\phi 0}^{II} + V_{30}^{II}$; $V_+^{II}, V_-^{II} = V_{\phi 0}^{II} - V_{30}^{II}$.

стохастического слоя, поэтому приведенные данные имеют оценочный характер.

В работе [2] было рассмотрено развитие волны БГК в однородной бесстолкновительной плазме с неподвижными ионами в случаях 1 и 1-1. Было показано, что параметры волны БГК — фазовая скорость, амплитуда, энергия, распределение плотности и скорости захваченных частиц — практически (с точностью до нескольких процентов) не меняются во времени в течение $\sim 100 T_{oe}$. Незначительные изменения волны связаны с развитием стохастической неустойчивости, которая приводит к формированию стохастического слоя в районе сепаратрисы волны БГК. Границы и ширина стохастического слоя в случаях 1 и 1-1 приведены в табл. 3. Причиной развития стохастической неустойчивости может служить взаимодействие волны БГК с ленгмюровскими волнами — гармониками волны БГК, возбуждаемыми полем ее объемного заряда. Основную роль должна играть гармоника $N = 2$. Действительно, если предполагать, что амплитуда ленгмюровской волны $N = 2$ равна амплитуде гармоники $N = 2$ объемного заряда, то параметр Чирикова в случае 1 $\alpha \sim 0,64$, в случае 1-1 $\alpha \sim 0,78$. При таких α можно ожидать развития стохастического слоя заметной ширины. Не исключено, однако, что в этих случаях в развитии стохастических эффектов могут давать вклад паразитные шумы, связанные с погрешностями счета, погрешности при задании волны БГК и т.п., так что данные о ширине слоя в случаях 1 и 1-1 нельзя считать надежными.

Серия 1 и 2. Рассмотрим развитие волны БГК и ленгмюровской волны в случаях, когда в начальный момент времени задается ленгмюровская волна $N = 2$ с разными амплитудами, а параметры волны БГК постоянны.

Случай 2 (серия 1):

$$\lambda^I/r_d = 200; \quad V_{\phi 0}^I/V_T = 27.9; \quad V_{30}^I/V_T = 6.6$$

$$\lambda^{II}/r_d = 100 \quad V_{\phi 0}^{II}/V_T = 16.3 \quad V_{30}^{II}/V_T = 2.4 \quad \alpha = 0.77$$

Случай 1-2 (серия 2):

$$\lambda^I/r_d = 100; \quad V_{\phi 0}^I/V_T = 15.1; \quad V_{30}^I/V_T = 5.0$$

$$\lambda^{II}/r_d = 50 \quad V_{\phi 0}^{II}/V_T = 8.2 \quad V_{30}^{II}/V_T = 1.3 \quad \alpha = 0.91$$

Мы рассматриваем эти случаи вместе, так как развитие волн в них имеет сходные черты.

Таблица 3

Границы и ширина стохастического слоя. Случай 1 и 1-1
 $t/T_{oe} \sim 100$

Границы	Случай 1				Случай 1-1			
	$V_{\phi 0}^I = 175.6; V_{\phi 30}^I = 41.6$				$V_{\phi 0}^I = 94.8; V_{\phi 30}^I = 31.5$			
	V_{zp}	Δ	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{\phi 30}^I}$	V_{zp}	Δ	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{\phi 30}^I}$
$x \sim x_m$								
Верхняя								
Внешняя	222.5				129.5			
		5.3	0.84	0.13		3.2	0.51	0.10
$V_{\phi 0}^I + V_{\phi 30}^I$	217.2				126.3			
		0.6	0.19	0.01		0.3	0.05	0.01
Внутренняя	216.6				126			
Ширина слоя		5.9	1.03	0.14		3.5	0.56	0.11
$x \sim x_m$								
Верхняя								
Внешняя	131				62.2			
		3	0.48	0.07		1.1	0.18	0.04
$V_{\phi 0}^I - V_{\phi 30}^I$	134				63.3			
		0.6	0.19	0.01		0.7	0.11	0.02
Внутренняя	134.6				64.0			
Ширина слоя		3.6	0.67	0.08		1.8	0.29	0.06
$x \sim x_0$								
Верхняя								
	196				108			
		20	3.18	0.48		13	2.07	0.41
$V_{\phi 0}^I$	175.6				94.8			
		20	3.18	0.48		11	1.75	0.35
Нижняя	156				84			
Ширина слоя		40	6.36	0.96		24	3.82	0.76
$V \sim V_{\phi 0}^I$								
	$\frac{x_{rp} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^I/2)}$		$\frac{x_{rp} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^I/2)}$	
Правая	77	23	0.23		38	12	0.24	
Левая	77	23	0.23		37	13	0.26	

V нормировано на $V_T/2\pi$; $V_s = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$; $\Delta x = x_{zp} - x_0$.

Анализ траекторий на фазовой плоскости частиц с x_0, V_0 в области захвата волны БГК показывает, что большая часть частиц остается захваченной (типичные траектории таких частиц приведены в работе [2]). Однако некоторые частицы с x_0, V_0 , близкой к сепаратрисе, выходят из захвата. В дальнейшем такая частица то захватывается, то становится пролетной через случайные промежутки времени. Траектории частиц с близкими x_0, V_0 различаются и расходятся на фазовой плоскости, что указывает на развитие стохастической неустойчивости [4]. Типичная траектория такого типа (в системе волны $N = 1$) показана на рис. 2,а. Эта частица уже в $t/T_{oe} \sim 3.5$ выходит из захвата с $V > V_{\phi}^I$ и становится пролетной, но в $t/T_{oe} \sim 20$ вновь захватывается, совершает оборот, в $t/T_{oe} \sim 33$, выходит из захвата с $V < V_{\phi}^I$, в $t/T_{oe} \sim 40$ захватывается, совершает два оборота, выходит из захвата с $V < V_{\phi}^I$ и в $t/T_{oe} \sim 60$ надолго захватывается.

Заметная часть частиц с x_0, V_0 в области захвата ленгмюровской волны $N = 2$ также остается захваченной в своей волне. Но некоторые частицы выходят из захвата и их траектории приобретают стохастический характер. Типичная траектория такого типа в системе волны $N = 2$ показана на рис. 2,б. Видно, что траектория сильно промодулирована полем волны $N = 1$ и иногда совершает колебания в районе узла сепаратрисы $x \sim x_0^{II}$ и $V \sim V_{\phi 0}^{II}$. Однако четко просматривается, что частица сразу же выходит из захвата с $V < V_{\phi}^{II}$, но захватывается в соседнюю область захвата в $t/T_{oe} \sim 15$, совершает оборот, в $t/T_{oe} \sim 34$ выходит из захвата с $V > V_{\phi}^{II}$, вновь захватывается в $t/T_{oe} \sim 44$, совершает оборот, в $t/T_{oe} \sim 68$ выходит из захвата с $V > V_{\phi}^{II}$ и до $t/T_{oe} \sim 100$ остается пролетной.

Стохастическая неустойчивость приводит к формированию стохастических слоев в районе сепаратрис волны БГК и ленгмюровской волны. Развитие стохастического слоя можно видеть по фазовым плоскостям случая 1-2 в разные моменты времени (рис. 3), особенно четко слой проявляется в районе узла сепаратрисы. По рис. 3 видно, что с течением времени растут минимальные и максимальные скорости b -электронов, расширяется область, заполняемая b -электронами в районе $x \sim x_0^I$, куда могут попадать только стохастические b -электроны (рис. 3 $t/T_{oe} = 40$). Таким образом, с течением времени слой расширяется. В случае 2 расширение практически прекращается, т.е. слой устанавливается, к $t/T_{oe} \sim 60 - 80$. Из рис. 3,а видно, что функция распределения по скоростям в этом случае меняется незначительно, а число электронов со скоростями $V > V_{\max}^0$ и $V < V_{\min}^0$ примерно одинаково и невелико. В случае

1-2 за время $t/T_{oe} \sim 100$ слой не устанавливается и продолжает расти. Более того, по фазовой плоскости видно, что в $t/T_{oe} \sim 60 - 80$ появляются b -электроны со скоростями $V < V_{\phi}^{II}$ (рис. 3 $t/T_{oe} \sim 80$ и 100), что свидетельствует о пересечении стохастических слоев волн $N = 1$ и $N = 2$ и о начале сильной стохастической неустойчивости. Однако даже к $t/T_{oe} \sim 100$ только небольшое число b -электронов пересекает $V = V_{\phi}^{II}$ (рис. 3, б), так что нижнюю границу слоя волны БГК можно определить и по V_{\min} этих частиц и по V_{\min} основной части частиц. Отметим, что функция распределения по скоростям в случае 1-2 становится несимметричной — число замедлившихся электронов с $V < V_{\min}^0$ больше числа ускорившихся электронов с $V > V_{\max}^0$ (рис. 3, б).

Границы и ширина стохастических слоев по скорости V на $x \sim x_m^{I,II}$ и $x \sim x_0^{I,II}$ и по x на $V \sim V_{\phi 0}^{I,II}$ для волны БГК и ленгмюровской волны в случаях 2 и 1-2 приведены в таблицах 4 и 5.

Из таблиц 4 и 5 видно, что в случае 2 стохастический слой занимает незначительную часть области захвата волны БГК, слой волны БГК и ленгмюровской волны не пересекаются. В случае 1-2 верхняя граница слоя ленгмюровской волны лежит выше нижней границы слоя волны БГК, даже если ее определять по основной части электронов. Это делает возможным сильную стохастическую неустойчивость. Действительно, некоторое число b -электронов захватывается волной $N = 2$ и к $t/T_{oe} \sim 100$ оказывается в области нижней границы стохастического слоя волны $N = 2$ (рис. 3 $t/T_{oe} = 100$). Но к $t/T_{oe} \sim 100$ наблюдается только начальная стадия сильной стохастической неустойчивости — пробные частицы с x_0, V_0 в области захвата волны $N = 2$ к $t/T_{oe} \sim 100$ еще не пересекают V_{ϕ}^I волны БГК, хотя уже появляются частицы с близкими к V_{ϕ}^I скоростями. Мы не изучали дальнейшее развитие сильной стохастической неустойчивости в этом случае, так как это сделано для случаев 1-3 и 1-4.

Отметим, что нижняя граница по скорости на $x \sim x_0^{I,II}$ при сильной стохастической неустойчивости становится неопределенной, так как слой волн $N = 1$ и $N = 2$ пересекаются. При этом минимальная скорость в районе узлов x_0^I и x_0^{II} зависит от относительной фазы волн $N = 1$ и 2. Для случая 1-2 и в дальнейшем мы приводим границу, определенную по V_{\min} в фазе $x_0^I \sim x_0^{II}$, где слои не разделены и имеют общие границы.

На рис. 4, 6 показана зависимость от времени энергии поля W_E , возмущенной энергии электронов плазмы ΔW_e ($\Delta W_e = W_e - W_e^0$), потерь энергии b -электронов $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$, на рис. 5, 7 — амплитуды волны БГК E^I и ленгмюровской волны E^{II} . На всех кривых

Таблица 4

Границы и ширина стохастического слоя. Случай 2

Границы	$t/T_{oe} \sim 100$							
	N=1				N=2			
	$V_{\phi 0}^I = 175.6$	$V_{z0}^I = 41.6$	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{z0}^I}$	$V_{\phi 0}^{II} = 102.3$	$V_{z0}^{II} = 15.1$	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{z0}^{II}}$
$x \sim x_m$								
Верхняя								
Внешняя	224.5				125.4			
$V_{\phi 0} + V_{z0}$	217.2	7.3	1.16	0.17	117.4	8.0	1.27	0.53
Внутренняя	216.5	0.7	0.11	0.02	116.5	0.9	0.14	0.06
Ширина слоя		8	1.27	0.19		8.9	1.41	0.59
$x \sim x_m$								
Нижняя								
Внешняя	122.5				80			
$V_{\phi 0} - V_{z0}$	134.0	11.5	1.83	0.28	87.2	7.2	11.5	0.48
Внутренняя	134.7	0.7	0.11	0.02	87.2	0	0	0
Ширина слоя		12.2	1.94	0.30		7.2	11.5	0.48
$x \sim x_0$								
Верхняя	200				112.5			
$V_{\phi 0}$	175.6	24.4	3.88	0.58	102.3	10.2	1.62	0.67
Нижняя	144	31.6	5.03	0.77	86.5	15.8	2.51	1.06
Ширина слоя		56.0	8.91	1.35		26.0	4.13	1.73
$V \sim V_{\phi 0}$								
	$\frac{x_{гр} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^I/2)}$		$\frac{x_{гр} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^{II}/2)}$	
Правая	73	27	0.27		32	18	0.36	
Левая	77	23	0.23		26	24	0.48	

V нормировано на $V_T/2\pi$; $V_z = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}}$; $\Delta x = x_{zр} - x_0$.

Границы и ширина стохастического слоя.
Случай 1-2 $t/T_{oe} \sim 100$

Таблица 5

Границы	N=1				N=2			
	$V_{\phi 0}^I = 94.8$	$V_{30}^I = 31.5$	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{30}^I}$	$V_{\phi 0}^{II} = 51.2$	$V_{30}^{II} = 7.9$	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{30}^{II}}$
Верхняя	$x \sim x_m$							
Внешняя	132				81.8 (66.8)*			
$V_{\phi 0} + V_{30}$		5.7	0.91	0.18		22.7	3.61	2.90
	126.3		2.3	0.07	0.07	(7.7)*	(1.23)*	(1.0)*
Внутренняя						1.3	0.21	0.16
	124		8.0	1.28	0.25	57.8	24.0	3.82
Ширина слоя						(9.0)*	(1.44)*	(1.16)*
Нижняя	$x \sim x_m$							
Внешняя	38 (54)*				35.9			
$V_{\phi 0} - V_{30}$		25.3 (9.3)*	4.03 (1.48)*	0.80 (0.30)*		7.4	1.18	0.94
	63.3		5.9	0.94	0.19	43.3	0.5	0.08
Внутренняя						0.5	0.08	0.06
	69.2		31.2 (15.2)*	4.97 (2.42)*	0.99 (0.49)*	43.8	7.9	1.26
Ширина слоя						1.0		
Верхняя	$x \sim x_0$							
$V_{\phi 0}$	108							
		13.2	2.10	0.41				
Нижняя								
	56		38.8	6.18	1.24			
Ширина слоя								
		52.0	8.28	1.65				
	$V \sim V_{\phi 0}$							
Правая		$\frac{x_{гр} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^I/2)}$		$\frac{x_{гр} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^{II}/2)}$
	31	19		0.38	14	11		0.44
Левая								
	26	24		0.48	16	9		0.36

V нормировано на $V_T/2\pi$; $V_3 = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}}$; $\Delta x = x_{гр} - x_0$.

* — для большей части частиц.

здесь и далее приведены усредненные за $\sim T_{oe}$ величины и не показаны малые колебания с периодом $\leq T_{oe}$, обычно не превышающие $\sim 1 - 2\%$. Из рис. 4, 5 видно, что в случае 2 амплитуды E^I , E^{II} и энергии остаются практически постоянными, изменения этих величин не превышают нескольких процентов. Отметим, что изменения E^I , W_E , ΔW_e скоррелированы с изменениями ΔW_b .

В случае 1-2 заметно растут потери энергии b -электронов (рис. 6). Это неудивительно, так как в этом случае при развитии стохастической неустойчивости развивается, в основном, нижний стохастический слой. При этом часть b -электронов, участвующих в формировании этого слоя, тормозится и теряет энергию. Энергии W_E , ΔW_e и амплитуды волн БГК и ленгмюровской в этом случае также растут, причем скорость роста увеличивается в $t/T_{oe} \geq 70$, когда начинает развиваться сильная стохастическая неустойчивость (рис. 6, 7). Природа этого эффекта будет рассмотрена ниже при описании случая 1-4.

Рассмотрим случаи 1-3 и 1-4 серии 2. В этих случаях параметры волны БГК те же, что в случаях 1-1 и 1-2: $\lambda^I/r_d = 100$; $V_{\phi 0}^I/V_T = 15.1$; $V_{30}^I/V_T = 5.0$. Параметры ленгмюровской волны — $N = 2$. $V_{\phi 0}^{II}/V_T = 8.2$; в случае 1-3 $V_{30}^{II}/V_T = 1.9$; $\alpha = 0.99$; в случае 1-4 $V_{30}^{II}/V_T = 4.4$; $\alpha = 1.36$. Поскольку в этих случаях $\alpha \sim 1$ или $\alpha > 1$, то можно ожидать развитие сильной стохастической неустойчивости.

Случай 1-3. По фазовым плоскостям (рис. 8) в разные моменты времени можно проследить развитие стохастического слоя волны БГК и начальную стадию сильной стохастической неустойчивости — захват b -электронов в ленгмюровскую волну $N = 2$. Из рис. 8 видно, что уже в $t/T_{oe} \sim 2$ волна $N = 2$ довольно сильно возмущает волну БГК. В результате в $t/T_{oe} \sim 2-4$ в районе справа от $x \sim x_0^I$ в области скоростей $V < V_{\phi 0}^I$ формируются "хвосты" b -электронов, вышедших из захвата волны БГК. Эти b -электроны переходят в район соседней (левой) области захвата $N = 1$, а b -электроны, вышедшие из захвата с $V > V_{\phi 0}^I$ в районе слева от $x \sim x_0^I$ переходят в район соседней (правой) области захвата $N = 1$. Эти процессы повторяются периодически (рис. 8 $t/T_{oe} = 10$). Частицы, вышедшие из захвата, в дальнейшем имеют траектории стохастического характера, показанные на рис. 2, а. Причем, траектории частиц с близкими x_0 , V_0 различаются, так что частицы из одного "хвоста" расходятся на фазовой плоскости.

В $t/T_{oe} > 15$ часть b -электронов, вышедших из захвата волны БГК, попадает в захват ленгмюровской волны (рис. 8 $t/T_{oe} = 18$) и принимает участие в формировании стохастического слоя волны $N = 2$ (рис. 8 $t/T_{oe} = 24$). Формирование этого слоя можно проследить по пробным частицам с x_0, V_0 в области захвата волны $N = 2$. В $t/T_{oe} \geq 5 - 10$ часть этих частиц выходит из захвата $N = 2$. В дальнейшем их траектории имеют стохастический характер типа показанных на рис. 2, б. В $t/T_{oe} \geq 25$ некоторые из этих частиц попадают в захват волны БГК. Захват b -электронов волной $N = 2$ и пробных частиц волной $N = 1$ свидетельствуют о начале развития сильной стохастической неустойчивости. С течением времени ширина стохастических слоев волн $N = 1$ и 2 растет (рис. 8 $t/T_{oe} = 40 - 56 - 100$). В $t/T_{oe} \sim 80 - 100$ вид фазовой плоскости, максимальные и минимальные скорости b -электронов и пробных частиц практически не меняются, что свидетельствует об установлении стохастических слоев. Функция распределения по скоростям в этом случае заметно меняется по сравнению с начальной и становится несимметричной (рис. 8, а).

Значительная часть частиц, попавших в стохастические слои, участвует в сильной стохастической неустойчивости и переходит из слоя волны $N = 1$ в слой $N = 2$ или наоборот. Типичная траектория в системе волн $N = 1$ и $N = 2$ показана на рис. 9, а, б. Эта частица сначала захвачена в $N = 2$, но через $1/2$ оборота выходит из захвата и захватывается в соседнюю область захвата, совершив несколько оборотов, в $t/T_{oe} \sim 45$ она выходит из захвата $N = 2$ с $V > V_{\phi}^{II}$ (рис. 9, б), а в $t/T_{oe} \geq 50$ захватывается волной $N = 1$, совершив ~ 2 оборота, в $t/T_{oe} \sim 73$ выходит из захвата с $V < V_{\phi}^I$, а в $t/T_{oe} \sim 91$ вновь захватывается волной $N = 1$ (рис. 9, а).

По виду фазовой плоскости в $t/T_{oe} \sim 100$ (рис. 8) и траекториям частиц с x_0, V_0 в области захвата $N = 1$ или $N = 2$ можно сделать вывод, что стохастический слой не занимает всей области захвата волны БГК и ленгмюровской волны — в волне БГК сохраняется ядро захваченных частиц, а в ленгмюровской волне “дырка” — область, куда не попадают b -электроны, участвующие в стохастическом движении (в $t = 0$ электронов в области захвата волны $N = 2$ нет). Границы и ширина стохастических слоев для волны БГК и ленгмюровской волны в случае 1-3 приведены в табл. 6.

Из табл. 6 видно, что в случае 1-3 верхние и нижние границы слоя волн $N = 1$ и $N = 2$ практически совпадают, а область стохастического движения занимает значительную часть областей захвата волн $N = 1$ и $N = 2$ и все пространство между ними. По функции распределения

Таблица 6

Границы и ширина стохастического слоя. Случай 1-3

		$t/T_{oe} \sim 100$							
		N=1				N=2			
		$V_{\phi 0}^I = 94.8; V_{30}^I = 31.5$				$V_{\phi 0}^{II} = 51.2; V_{30}^{II} = 11.7$			
Границы	V_{2p}	Δ	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{30}^I}$	V_{2p}	Δ	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{30}^{II}}$	
<u>Верхняя</u>		$x \sim x_m$							
Внешняя	132				128.8				
$V_{\phi 0} + V_{30}$		5.7	0.91	0.18		65.9	10.49	5.6	
	126.3				62.9				
		5.5	0.88	0.17		7.1	1.13	0.6	
Внутренняя	120.8				55.8				
Ширина слоя		11.2	1.79	0.35		73.0	11.62	6.2	
<u>Нижняя</u>		$x \sim x_m$							
Внешняя	30				30.5				
$V_{\phi 0} - V_{30}$		33.3	5.30	1.06		9.0	1.43	0.8	
	63.3				39.5				
		5.6	0.89	0.18		5.9	0.94	0.5	
Внутренняя	68.9				45.4				
Ширина слоя		38.9	6.19	1.24		14.9	2.37	1.3	
		$x \sim x_0$							
Верхняя	110								
$V_{\phi 0}$		15.2	2.42	0.48					
	94.8								
		42.8	6.81	1.36					
Нижняя	52								
Ширина слоя		58.0	9.23	1.84					
		$V \sim V_{\phi 0}$							
		$\frac{x_{rp} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^I/2)}$	$\frac{x_{rp} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^{II}/2)}$		
Правая	30	20	0.40		6	19	0.76		
Левая	28	22	0.44		6	19	0.76		

V нормировано на $V_T/2\pi$; $V_3 = 2\sqrt{\frac{e\varphi}{m}}$; $\Delta x = x_{2p} - x_0$.

(рис. 8, а) видно, что в область нижнего стохастического слоя ($V < V_{\min}^0$) попадает заметное число b -электронов, а в область верхнего ($V > V_{\max}^0$) — очень небольшое.

По кривым зависимости энергии от времени (рис. 10) видно, что с течением времени растут потери энергии b -электронов. Одновременно растут амплитуды волны БГК и ленгмюровской волны (рис. 11), а также энергии W_E и ΔW_e (рис. 10). Рост амплитуд и энергий практически прекращается в $t/T_{oe} \sim 80 - 90$, свидетельствуя о завершении основного процесса — формирования стохастических слоев.

Случай 1-4. В этом случае сильная стохастическая неустойчивость развивается практически с самого начала. Ее начальная стадия имеет характер организованного захвата b -электронов из волны БГК в ленгмюровскую волну, так что образуются “хвосты” b -электронов. По фазовым плоскостям (рис. 12) видно, что уже в $t/T_{oe} \sim 1 - 1.5$ справа от $x \sim x_0^I$ формируются “хвосты” b -электронов с $V < V_{\phi}^I$, которые в $t/T_{oe} \sim 2 - 2.5$ захватываются в обе области захвата ленгмюровской волны $N = 2$, одновременно некоторая часть b -электронов, выходящих из захвата волны БГК слева от $x \sim x_0^I$ с $V > V_{\phi}^I$, переходит в соседнюю (правую) область захвата $N = 1$ (рис. 12 $t/T_{oe} \sim 2.5 - 4$). Часть пробных частиц с x_0, V_0 в области захвата волны $N = 2$ также выходит из захвата $N = 2$, а в $t/T_{oe} \sim 2 - 4$ некоторые из них захватываются волной БГК. Дальнейшее развитие можно видеть по фазовым плоскостям рис. 12 в $t/T_{oe} \sim 4 - 8 - 12$. В это время процесс приобретает характер сильной стохастической неустойчивости, что подтверждают типичные траектории (рис. 13, а - з), блуждающие по стохастическим слоям волн $N = 1$ и $N = 2$. Так частица рис. 13, а, б с x_0, V_0 в волне БГК, совершив оборот в своей волне, захватывается волной $N = 2$, затем волной $N = 1$, снова волной $N = 2$, переходит в соседнюю область захвата $N = 2$, а через несколько оборотов снова захватывается волной $N = 1$. Частица рис. 13, в, г с x_0, V_0 в области захвата $N = 2$, совершив 1/2 оборота, захватывается волной $N = 1$, переходит в захват $N = 2$, повторяет этот цикл, переходит в другую область захвата $N = 2$, опять в $N = 1$ и т.д.

Из рис. 12 видно, что в $t/T_{oe} > 10 - 15$ идет интенсивное размешивание b -электронов на фазовой плоскости. Оно завершается к $t/T_{oe} \sim 40 - 50$. В дальнейшем фазовая плоскость почти не меняется, а функция распределения по скоростям имеет вид, показанный на рис. 8, б. К $t/T_{oe} \sim 50$ практически не остается просветов в области захвата $N = 2$, что показывает, что сильная стохастическая неустойчивость происходит во всей области захвата $N = 2$. Однако, в области захвата волны БГК сохраняется ядро захваченных частиц. В эту область не попадают частицы,

имеющие стохастические траектории. В $t/T_{oe} \sim 50 - 100$ ядро практически не меняется.

Границы и ширина стохастических слоев в случае 1-4 приведены в таблице 7. Видно, что внешние границы слоя волн $N = 1$ и $N = 2$ практически совпадают, а область стохастического движения занимает обе области захвата за исключением небольшого ядра захваченных частиц в волне БГК. По функции распределения (рис. 8, б) видно, что в область нижнего стохастического слоя попадает значительное число b -электронов.

Кривые зависимости от времени энергии (рис. 14) и амплитуды E^I, E^{II} (рис. 15) подтверждают, что главные события развиваются за $10 - 20 T_{oe}$, где все эти величины растут сначала (до $t/T_{oe} \sim 5 - 6$) быстро, затем медленнее. В дальнейшем все они практически постоянны или немного растут.

Таким образом, рост потерь энергии ΔW_b b -электронами во всех случаях, когда развивается сильная стохастическая неустойчивость, сопровождается ростом амплитуды ленгмюровской волны E^{II} , волны БГК E^I , а также ростом энергии поля W_E и электронов плазмы ΔW_e . Мы уже отмечали, что рост ΔW_b обусловлен тем, что ширина нижнего стохастического слоя волны БГК значительно больше, чем верхнего и соответственно число b -электронов, попадающих в нижний слой значительно больше, чем в верхний. Таким образом, b -электроны, участвующие в стохастическом движении, преимущественно тормозятся и теряют энергию, так что $\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$ растет.

При развитии сильной стохастической неустойчивости захват b -электронов в волну $N = 2$ происходит в фазе торможения, так что энергия электронов передается волне. Новые порции b -электронов, захватываемые волной $N = 2$, продолжают передавать ей энергию. Если часть этих b -электронов выходит из захвата волной $N = 2$ с $V < V_{\phi}^{II}$, то энергия передается необратимо и амплитуда волны E^{II} растет. Процесс того же типа проявляется и в том случае, когда захват b -электронов в $N = 2$ не происходит, но b -электроны, выйдя из захвата волны БГК, тормозятся в поле $N = 2$, передавая ей энергию. Это объясняет небольшой рост E^{II} в случаях 1-2, 1-3 до начала захвата b -электронов волной $N = 2$.

Рост амплитуды E^I волны БГК можно объяснить следующим образом. В волне БГК число ускоряющихся и тормозящихся захваченных электронов в любой момент времени одинаково, поэтому ее амплитуда постоянна. В случаях 1-3, 1-4 было показано, что развитие нижнего слоя

Таблица 7

Границы и ширина стохастического слоя. Случай 1-4

$t/T_{oe} \sim 100$

Границы	N=1				N=2			
	$V_{\phi 0}^I = 94.8; V_{30}^I = 31.5$				$V_{\phi 0}^{II} = 57.2; V_{30}^{II} = 27.6$			
	V_{ep}	Δ	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{30}^I}$	V_{ep}	Δ	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{30}^{II}}$
$x \sim x_m$								
Верхняя								
Внешняя	138				138			
		11.7	1.86	0.38		59.2	9.42	2.1
$V_{\phi 0} + V_{30}$	126.3				78.8			
		14.2	2.26	0.44		27.6	4.39	1.0
Внутренняя	112.1				51.2			
Ширина слоя		25.9	4.12	0.82		86.8	13.81	3.1
$x \sim x_m$								
Нижняя								
Внешняя	4				4			
		59.3	9.44	1.87		19.6	3.12	0.73
$V_{\phi 0} - V_{30}$	63.3				23.6			
		3.2	0.51	0.10		27.6	4.39	1.0
Внутренняя	66.5				51.2			
Ширина слоя		62.5	9.95	1.97		47.2	7.51	1.73
$x \sim x_0$								
Верхняя	110							
		15.2	2.42	0.48				
$V_{\phi 0}$	94.8							
		76.8	12.22	2.45				
Нижняя	18							
Ширина слоя		92.0	14.64	2.93				
$V \sim V_{\phi 0}$								
	$\frac{x_{rp} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^I/2)}$		$\frac{x_{rp} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^{II}/2)}$	
Правая	19	31	0.62		25	25	1.0	
Левая	17	33	0.66		25	25	1.0	

V нормировано на $V_T/2\pi$; $V_3 = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}}$; $\Delta x = x_{ep} - x_0$.

начинается с выхода из захвата b -электронов с $V < V_{\phi}^I$ справа от узла $x \sim x_0^I$, т.е. из фазы ускорения. В результате нарушается баланс ускоряющихся и тормозящихся b -электронов — ускоряющихся становится меньше — и энергия передается волне, так что ее амплитуда растет. Если выход из захвата b -электронов продолжается и сохраняется асимметрия числа электронов выходящих из захвата с $V < V_{\phi}^I$ и $V > V_{\phi}^I$, то будет продолжаться рост амплитуды и соответственно энергии ($W_E, \Delta W_e$) волны БГК.

Рост амплитуд волны БГК и ленгмюровской волны приводит к росту параметра Чирикова α , который определяет характер и скорость развития сильной стохастической неустойчивости. Таким образом, описанные эффекты играют роль вторичных нелинейных эффектов при развитии сильной стохастической неустойчивости при взаимодействии волны БГК и ленгмюровской волны с $V_{\phi}^{II} < V_{\phi}^I$.

Развитие сильной стохастической неустойчивости в случаях 1-3, 1-4 приводит к квазистационарному состоянию, когда амплитуды E^I, E^{II} остаются постоянными. Остаются постоянными также $W_E, \Delta W_e$ и энергия b -электронов. На фазовой плоскости наблюдается образование структуры, сохраняющейся во времени. В этой структуре есть область стохастического движения и невозмущенные ядра, сохраняются гармоники $N = 1$ и $N = 2$, но, в целом, она представляет новое образование, в котором захвачены все частицы. Постоянство энергии свидетельствует о том, что число ускоряющихся частиц равно числу тормозящихся, так что новая структура является разновидностью волн БГК.

Серия 3. Рассмотрим развитие волн БГК в случаях 2-1 \equiv 1-1, 2-2, 2-3, когда в волне БГК задается разное число электронов N_b^0 . При этом пропорционально N_b^0 меняется фазовая скорость и амплитуда волны БГК, а также амплитуда E_b^N гармоник поля, обусловленная распределением плотности b -электронов [2]. Ленгмюровская волна не задается, но возбуждается полем $E_b(x)$ объемного заряда волны БГК, причем наибольшую амплитуду имеет гармоника $N = 2$.

Случай 2-2

$N_b^0 = 100; \lambda^I/r_d = 100; V_{\phi 0}^I/V_T = 14.0; V_{30}^I/V_T = 4.7;$
 $\lambda^{II}/r_d = 50; V_{\phi 0}^{II}/V_T = 8.2; V_{30}^{II}/V_T = 0.6; \alpha = 0.90.$

Случай 2-3

$N_b^0 = 200; \lambda^I/r_d = 100; V_{\phi 0}^I/V_T = 11.8; V_{30}^I/V_T = 3.9;$
 $\lambda^{II}/r_d = 50; V_{\phi 0}^{II}/V_T = 8.2; V_{30}^{II}/V_T = 0.8; \alpha = 1.30.$

По величине α случай 2-2 близок к случаю 1-2, а случай 2-3 — к случаю 1-4, так что можно ожидать подобного характера развития стохастической неустойчивости.

В случае 2-2 по фазовым плоскостям (рис. 16) видно, что подобно случаю 1-2 вначале развивается стохастический слой волны БГК (рис. 16 $t/T_{oe} = 40 - 60$). В $t/T_{oe} > 70$ начинается захват b -электронов волной $N = 2$, т.е. начинается развитие сильной стохастической неустойчивости (рис. 16 $t/T_{oe} = 80 - 100$). Вид фазовой плоскости в $t/T_{oe} \sim 100$ несколько отличается от случая 1-2 (рис. 3), где четко виден слой волны $N = 2$. В случае 2-2 из-за малой амплитуды $N = 2$ скорее можно говорить о том, что слой волны $N = 2$ включается в слой волны БГК. Это подтверждает и вид функции распределения по скоростям в $t/T_{oe} = 100$ (рис. 16, а). Границы и ширина стохастического слоя для волны БГК в случае 2-2 приведены в табл. 8.

Энергии (рис. 17) и амплитуды волны БГК и ленгмюровской волны (рис. 18) в этом случае до $t/T_{oe} \sim 60$ меняются незначительно, но с началом развития сильной стохастической неустойчивости в $t/T_{oe} > 60 - 70$ быстро растут. Рост амплитуд E^I, E^{II} приводит к росту величины α — в $t/T_{oe} \sim 100 \alpha \sim 1.08$, что должно приводить к увеличению скорости развития сильной стохастической неустойчивости.

В случае 2-3 сильная стохастическая неустойчивость начинает развиваться в $t/T_{oe} \geq 5$, несколько позже, чем в случае 1-4, но имеет тот же характер организованного захвата b -электронов волной $N = 2$ (рис. 19 $t/T_{oe} = 10 - 15 - 20$). Анализ развития фазовой плоскости показывает, что в случае 2-3 в отличие от случая 1-4 в сильной стохастической неустойчивости участвуют все b -электроны волны БГК. Ядра захваченных b -электронов в этом случае не остается, что подтверждает вид функции распределения по скоростям (рис. 16, б). Развитие сильной стохастической неустойчивости приводит к размещиванию b -электронов на фазовой плоскости, что происходит уже к $t/T_{oe} \sim 35 - 40$ (рис. 19 $t/T_{oe} = 40$).

Границы и ширина области стохастического движения для волны БГК в случае 2-3 приведены в табл. 8.

Из рис. 20, 21 видно, что амплитуды волны БГК, ленгмюровской волны и энергии быстро растут в $t/T_{oe} \sim 5 - 10$. В $t/T_{oe} \sim 10$ амплитуды достигают величины $E^I \sim 14, E^{II} \sim 26$, чему соответствует $\alpha \sim 2.57$. Таким образом, развитие сильной стохастической неустойчивости в случае 2-3 происходит в условиях сильной нелинейности, когда, благодаря этой неустойчивости, растут амплитуды волн, определяющие скорость ее развития. Отметим, что в этом случае нарастает и амплитуда гармоники

Границы и ширина стохастического слоя. Таблица 8
Случай 2-2, $t/T_{oe} \sim 100$ Случай 2-3, $t/T_{oe} \sim 40$

Границы	Случай 2-2				Случай 2-3			
	V_{zp}^I	Δ	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{z0}^I}$	V_{zp}^I	Δ	$\frac{\Delta}{V_T}$	$\frac{\Delta}{V_{z0}^I}$
Верхняя	$x \sim x_m$							
Внешняя	122				110			
		4.5	0.72	0.15		11.7	1.86	0.49
$V_{\phi 0}^I + V_{z0}^I$	117.5				98.3			
		2.9	0.46	0.10		24.3	3.87	1.0
Внутренняя	114.6				74.0			
Ширина слоя		7.4	1.18	0.25		36.0	5.73	1.49
Нижняя	$x \sim x_m$							
Внешняя	46				8			
	(50)*	12.7	2.02	0.43		41.7	6.64	1.73
		(8.7)*	(1.38)*	(0.3)*				
$V_{\phi 0}^I - V_{z0}^I$	58.7				49.7			
		3.0	0.48	0.10		24.3	3.87	1.0
Внутренняя	61.7				74.0			
Ширина слоя		15.7	2.50	0.53		66.0	10.51	2.73
		(11.7)*	(1.86)*	(0.4)*				
	$x \sim x_0$							
Верхняя	102				94			
		13.9	2.21	0.47		20	3.18	0.82
$V_{\phi 0}^I$	88.1				74			
		28.1	4.47	0.95		48	7.64	1.98
Нижняя	60				26			
Ширина слоя		42.0	6.68	1.42		68	10.82	2.80
	$V \sim V_{\phi 0}^I$							
	$\frac{x_{rp} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^I/2)}$		$\frac{x_{rp} - x_m}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{r_d}$	$\frac{\Delta x}{(\lambda^I/2)}$	
Правая	37	13	0.26		500	50	1.0	
Левая	34	16	0.32		500	50	1.0	

V нормировано на $V_T/2\pi$; $V_z = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}}$; $\Delta x = x_{zp} - x_0$.

* — для большей части частиц.

$N = 3$ (рис. 21), что показывает, что и она участвует в сильной стохастической неустойчивости. Действительно, нижняя граница стохастической области лежит ниже фазовой скорости $V_{\phi}^{III}/V_T = 5.6$.

Амплитуды гармоник E^{II} , E^{III} , энергии становятся практически постоянными или слегка возрастают в $t/T_{oe} > 15 - 20$. Амплитуда волны БГК сильно меняется в $t/T_{oe} \sim 10 - 30$ и только после этого устанавливается. При этом амплитуда E^I уменьшается по сравнению с E_0^I , что указывает на перераспределение значительного числа b -электронов. Отметим, что к $t/T_{oe} \sim 40$ α устанавливается на уровне $\alpha \sim 2.28$.

Постоянство амплитуд E^I , E^{II} , E^{III} , энергии поля и электронов в $t/T_{oe} > 30$ показывает, что в случае 2-3, подобно случаям 1-3, 1-4 развитие сильной стохастической неустойчивости приводит к образованию квазистационарной структуры, представляющей собой область стохастического движения, образованную гармониками $N = 1, 2, 3$.

В серии 3 (случаи 2-1, 2-2, 2-3) ленгмюровская волна не задается, а возбуждается полем объемного заряда волны БГК. При изучении случая 2-1 \equiv 1-1 [2] наблюдалось образование стохастического слоя вблизи сепаратрисы волны БГК. Однако, не было полной уверенности, не являются ли причиной стохастической неустойчивости шумы, связанные с погрешностями вычислений. При увеличении числа электронов в волне БГК в случаях 2-2, 2-3 наблюдаются сильные стохастические эффекты, хотя шумы остаются примерно на том же уровне, что и в случае 2-1. Это показывает, что поле объемного заряда действительно возбуждает ленгмюровские волны, взаимодействие с которыми приводит к развитию стохастической неустойчивости. Отсюда можно сделать вывод, что волна БГК неустойчива относительно стохастической неустойчивости в результате возбуждения ленгмюровских волн полем ее объемного заряда. При малых плотностях объемного заряда неустойчивость приводит к формированию стохастического слоя, но практически не меняет параметров волны (случай 2-1). С ростом плотности ширина слоя растет, становятся существенными вторичные нелинейные эффекты, приводящие к росту амплитуды самой волны БГК и ленгмюровских волн (случай 2-2). При больших плотностях объемного заряда неустойчивость приводит к полному разрушению волны БГК (случай 2-3).

Сравним стохастические слои в разных случаях. В табл. 9 приведены данные по ширине верхнего и нижнего стохастических слоев в волне БГК $N = 1$ (Δ^I/V_{30}^I) и в ленгмюровской волне $N = 2$ (Δ^{II}/V_{30}^{II}), а также значения параметра Чирикова в $t = 0$ — $\alpha_0 = \frac{V_{30}^I + V_{30}^{II}}{V_{\phi 0}^I - V_{\phi 0}^{II}}$ и $t/T_{oe} \sim 100$ (в

случае 2-3 — $t/T_{oe} \sim 40$) — $\alpha_t = \frac{V_{3t}^I + V_{3t}^{II}}{V_{\phi 0}^I - V_{\phi 0}^{II}}$ ($V_{3t}^{I,II}$ определены по средней за период T_{oe} амплитуде E^I , E^{II} ; предполагается, что $V_{\phi t}^{I,II} \approx V_{\phi 0}^{I,II}$). Из табл. 9 видно, что в каждой серии с ростом α_0 растет ширина верхнего и особенно быстро нижнего слоя волны БГК. При этом за счет нелинейного роста амплитуд E^I и E^{II} значения α возрастают, так что $\alpha_t > \alpha_0$, что особенно заметно при $\alpha_0 \geq 0.9$.

На рис. 22, а — з схематически показаны начальные области захвата волны БГК $N = 1$ и ленгмюровской волны $N = 2$ и границы стохастического слоя этих волн в $t/T_{oe} \sim 100$. Напомним, что границы построены по отдельным точкам (внешняя и внутренняя граница по скорости V — по точкам $x \sim x_m^{I,II}$ и $x \sim x_0^{I,II}$ граница по x — по точкам $V \sim V_{\phi 0}^{I,II}$). Напомним также, что границы слоя волны $N = 2$ не определялись в тех случаях, когда она не задавалась, но возбуждалась полем объемного заряда.

Для качественного сравнения различных случаев можно использовать параметр Чирикова. При небольших $\alpha_0 \leq 0.8 - 0.9$ развивается стохастическая неустойчивость и образуются независимые стохастические слои волны БГК и ленгмюровской волны (случаи 1, 2, 1-1, рис. 22, а, б, в). При $\alpha_0 \sim 0.9 - 1.0$ вначале также образуются слои волн $N = 1$ и $N = 2$. С течением времени ширина слоев растет и они начинают пересекаться (рис. 22, г, д, ж), что приводит к развитию сильной стохастической неустойчивости (случаи 1-2, 1-3, 2-2). Сильная стохастическая неустойчивость развивается в области пересекающихся стохастических слоев волн $N = 1$ и $N = 2$. При этом в волне БГК сохраняется ядро захваченных частиц, а в ленгмюровской волне область, свободная от частиц, т.е. возникает структура типа электронной дырки — electron hole (рис. 22, г, д).

При $\alpha_0 > 1$ сильная стохастическая неустойчивость развивается практически с самого начала. Ее начальная стадия имеет характер захвата b -электронов ленгмюровской волной. В дальнейшем происходит размещение электронов на фазовой плоскости. При этом вся область захвата ленгмюровской волны оказывается в области стохастического движения. При не очень больших α , например, в случае 1-4, где α меняется от 1.36 до 1.53, сохраняется ядро захваченных частиц в волне БГК (рис. 22, е). При увеличении α до величины больше 2, например, в случае 2-3, где α меняется в пределах 1.30-2.57-2.28, область стохастического движения занимает всю область захвата волны БГК (рис. 22, з).

Мы рассматриваем систему двух волн, причем фазовая скорость ленгмюровской волны меньше фазовой скорости волны БГК. В такой системе

Ширина стохастического слоя волны БГК и ленгмюровской волны в разных случаях. Серии 1, 2, 3. $t/T_{oe} \sim 100$ (случай 2-3 $t/T_{oe} \sim 40$).

Случай	Серия 1		Серия 2			Серия 3			
	1	2	1-1	1-2	1-3	1-4	2-1	2-2	2-3
α_0	0.64	0.77	0.78	0.91	0.99	1.36	0.78	0.90	1.30
α_t	0.62	0.80	0.79	1.01	1.18	1.53	0.79	1.08	2.28

Ширина слоя волны БГК Δ^I/V_{30}^I

Верхний, $x \sim x_m$	0.14	0.19	0.11	0.25	0.35	0.82	0.11	0.25	1.49
Нижний, $x \sim x_m$	0.08	0.30	0.06	0.99 (0.49)*	1.24	1.97	0.06	0.53 (0.40)*	2.73
Верхний, $x \sim x_0$	0.48	0.58	0.41	0.41	0.48	0.48	0.41	0.47	0.82
Нижний, $x \sim x_0$	0.48	0.77	0.35	1.24	1.36	2.45	0.35	0.95	1.98

Ширина слоя ленгмюровской волны Δ^{II}/V_{30}^{II}

Верхний	0.59	3.1 (1.2)*	6.2	3.1
Нижний	0.48	1.0	1.3	1.7

$\alpha_{0,t} = \frac{V_{30,t}^I + V_{30,t}^{II}}{V_{30}^I - V_{30}^{II}}$ — параметр Чирикова в $t \sim 0$ и $t/T_{oe} \sim 100$ (случай 2-3 $t/T_{oe} \sim 40$); $V_3^N = 2\sqrt{\frac{e\varphi^N}{m}}$; x_m , x_0 — максимум и узел сепаратрисы.

* — для большей части частиц.

развитие сильной стохастической неустойчивости сопровождается новыми нелинейными эффектами (проявляются они и при развитии стохастической неустойчивости, но гораздо слабее). Начальная стадия сильной стохастической неустойчивости проявляется в захвате ленгмюровской волной электронов, вышедших из захвата волны БГК. При этом электроны тормозятся в поле ленгмюровской волны и передают ей энергию, так что ее амплитуда растет. Если часть электронов выходит из захвата волны $N = 2$ с $V < V_{\phi}^{II}$, то эффект имеет необратимый характер.

Второй эффект проявляется в росте амплитуды волны БГК. В исходной волне БГК число ускоряющихся захваченных электронов всегда равно числу тормозящихся, так что ее энергия и амплитуда постоянны. При развитии стохастической и сильной стохастической неустойчивости часть электронов выходит из захвата, причем, в область нижнего стохастического слоя электроны выходят из фазы ускорения, в область верхнего — из фазы торможения. Поскольку в область нижнего слоя выходит больше электронов, ускоряющихся захваченных электронов становится меньше, чем тормозящихся. В результате этого дисбаланса энергия передается волне БГК и амплитуда ее растет.

Росту амплитуд волны БГК и ленгмюровской волны соответствует рост параметра α , что приводит к росту скорости развития стохастической неустойчивости и к увеличению области стохастического движения.

Развитие сильной стохастической неустойчивости приводит к квазистационарному состоянию, причем, сохраняется энергия поля и амплитуда составляющих его гармоник. На фазовой плоскости формируется структура, сохраняющаяся во времени. В этой структуре электроны двигаются в пределах стохастической области. При этом в некоторых случаях сохраняется невозмущенное ядро захваченных электронов в волне БГК и "дырка" в ленгмюровской волне, в некоторых — только ядро, в некоторых область стохастического движения включает обе области захвата волны БГК и ленгмюровской волны. Постоянство энергии поля свидетельствует о том, что в новой структуре число ускоряющихся электронов равно числу тормозящихся, так что эта структура является разновидностью волны БГК.

В серии 3 (случаи 2-1 \equiv 1-1, 2-2, 2-3) изучались волны БГК с разным числом захваченных электронов и следовательно с разной плотностью объемного заряда. Ленгмюровская волна не задавалась, но возбуждалась полем объемного заряда. Полученные результаты показывают, что волна БГК неустойчива относительно стохастической или сильной стохастической неустойчивости в результате возбуждения ленгмюровских волн полем ее объемного заряда. При малых плотностях объемного заряда не-

устойчивость приводит к формированию стохастического слоя в районе сепаратрисы волны БГК, но практически не меняет ее параметров (случай 2-1 \equiv 1-1). С ростом плотности ширина слоя растет, становятся существенными вторичные нелинейные эффекты, приводящие к росту амплитуды самой волны БГК и ленгмюровских волн (случай 2-2). При больших плотностях объемного заряда неустойчивость приводит к полному разрушению волны БГК и образованию новой структуры (случай 2-3).

Литература

1. I.V. Bernstein, J.M. Greene, M.D. Kruskal. Phys. Rev. 108, 546, 1957.
2. Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев. Волна Бернштейна-Грина-Крускала. I. Препринт ИЯФ 93-97, Новосибирск.
3. Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин. Взаимодействие ленгмюровской волны с ионно-звуковой. Стохастические эффекты. I-IV. Препринты ИЯФ 88-139, 88-163, Новосибирск, 1988; 89-36, 89-106, Новосибирск, 1989.
4. Н.С. Бучельникова, Е.П. Маточкин. Ленгмюровские волны большой амплитуды. Электронная нелинейность и стохастические эффекты. I, II, III. Препринты ИЯФ 86-153, 86-154, 86-155, Новосибирск, 1986.

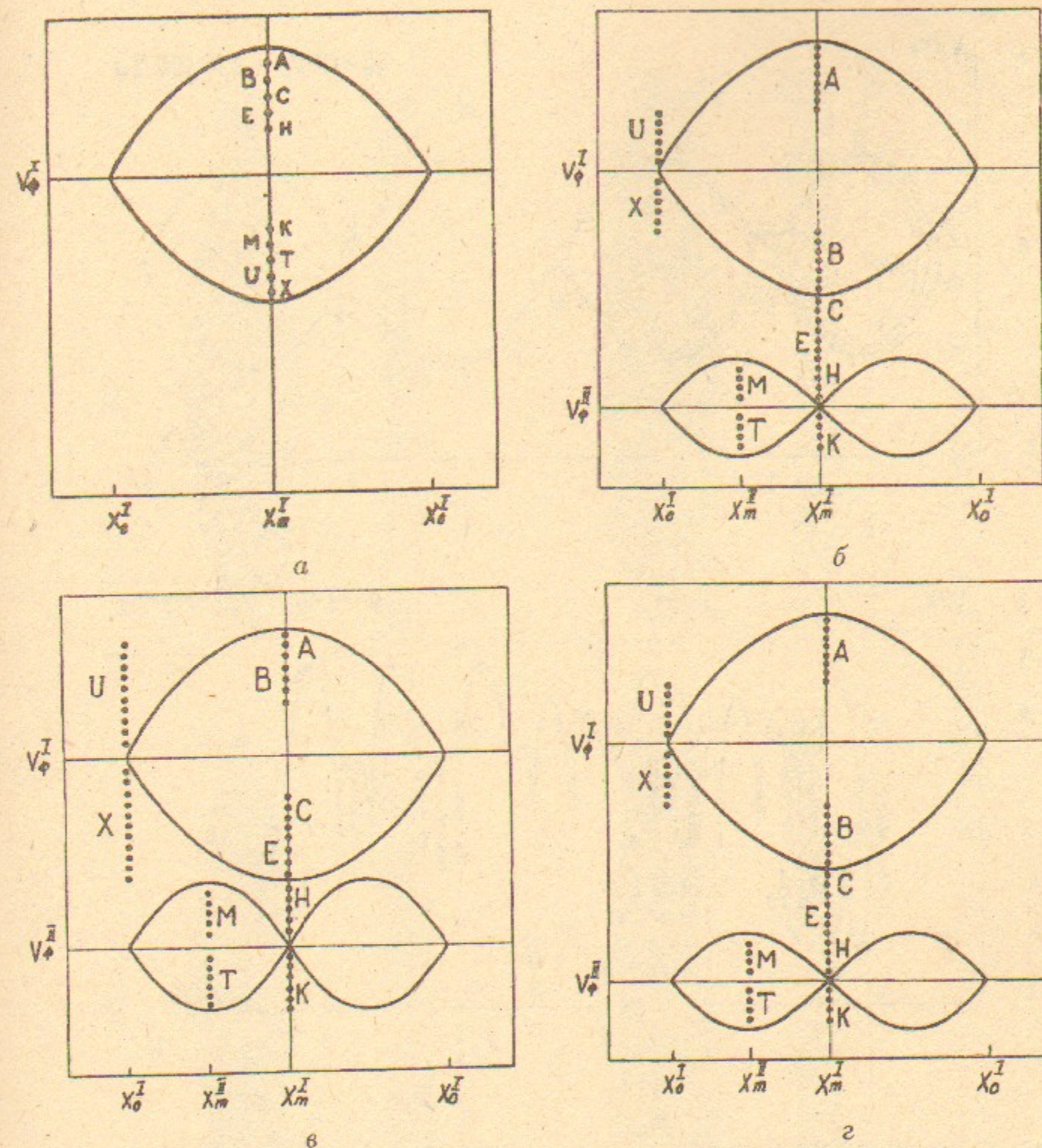
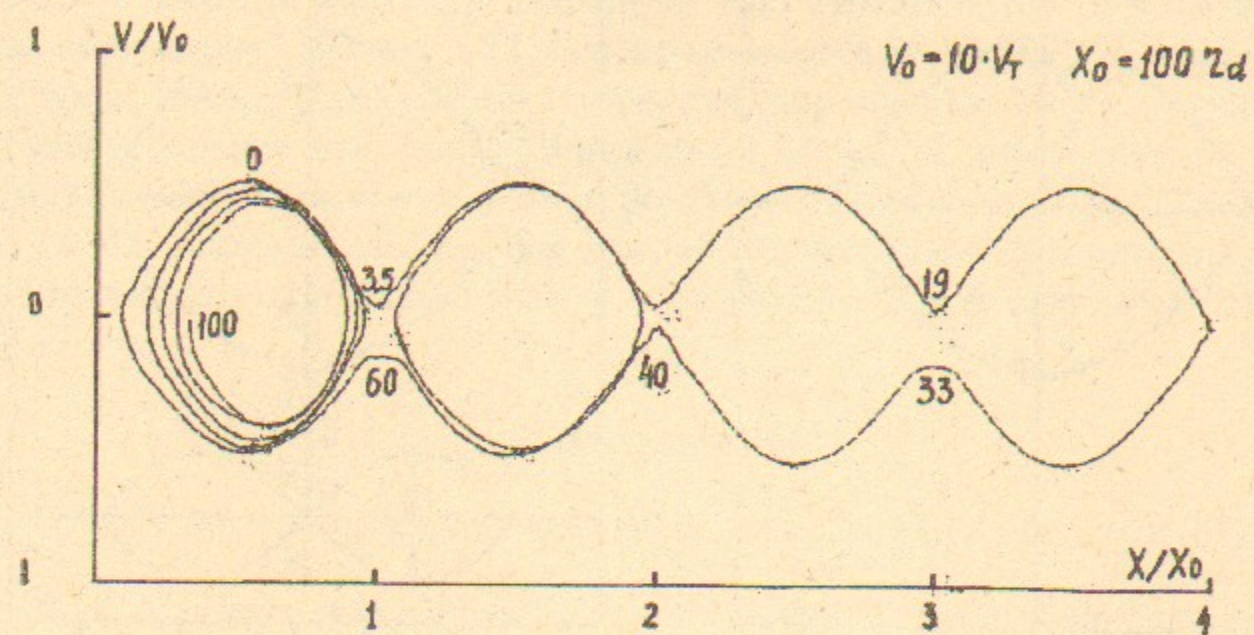


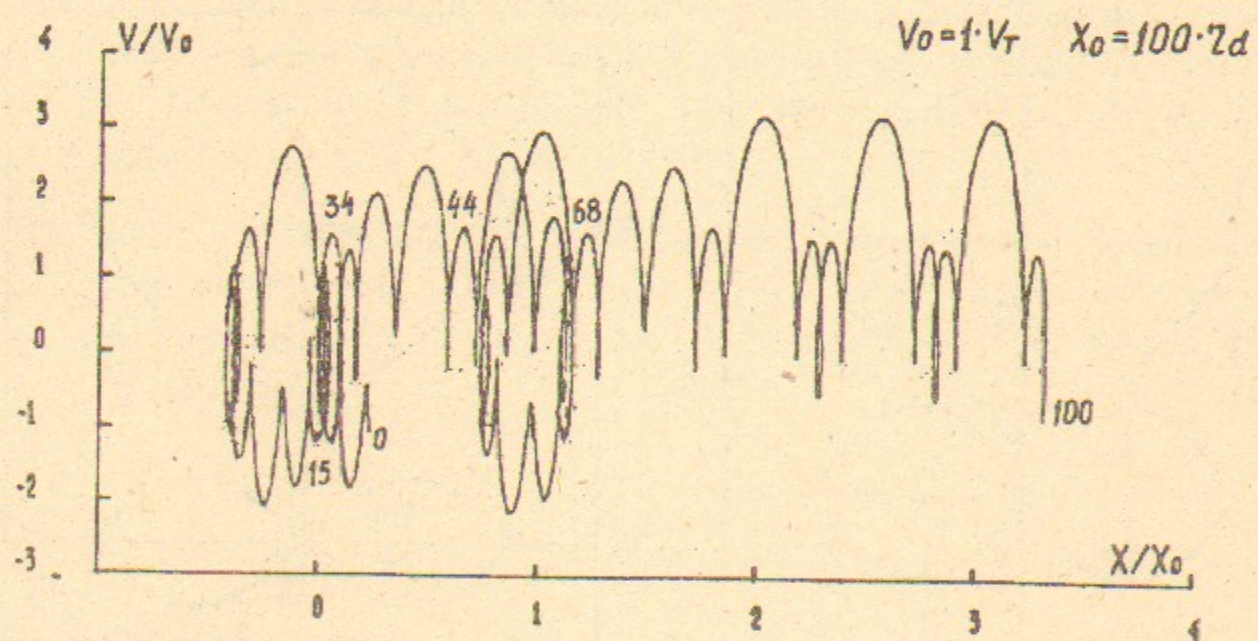
Рис. 1. Схема задания пробных частиц.

Рис.	а	б	в	г
Случай	1; 1-1, 2-2;	2, 1-2;	1-3;	1-4.

Буквами обозначены группы пробных частиц с разными начальными x_0, V_0 ; $x_0^I, x_m^{I,II}$ — узел и максимум сепаратрисы $N = 1$ или $N = 2$.



a



b

Рис. 2. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. Случай 1-2.

a — $x_0/r_d = 50$; $V_0/V_T = 20.10$; в системе волны $N = 1$, $V_{\phi 0}^I/V_T = 15.1$

b — $x_0/r_d = 25$; $V_0/V_T = 6.84$; в системе волны $N = 2$, $V_{\phi 0}^{II}/V_T = 8.15$

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

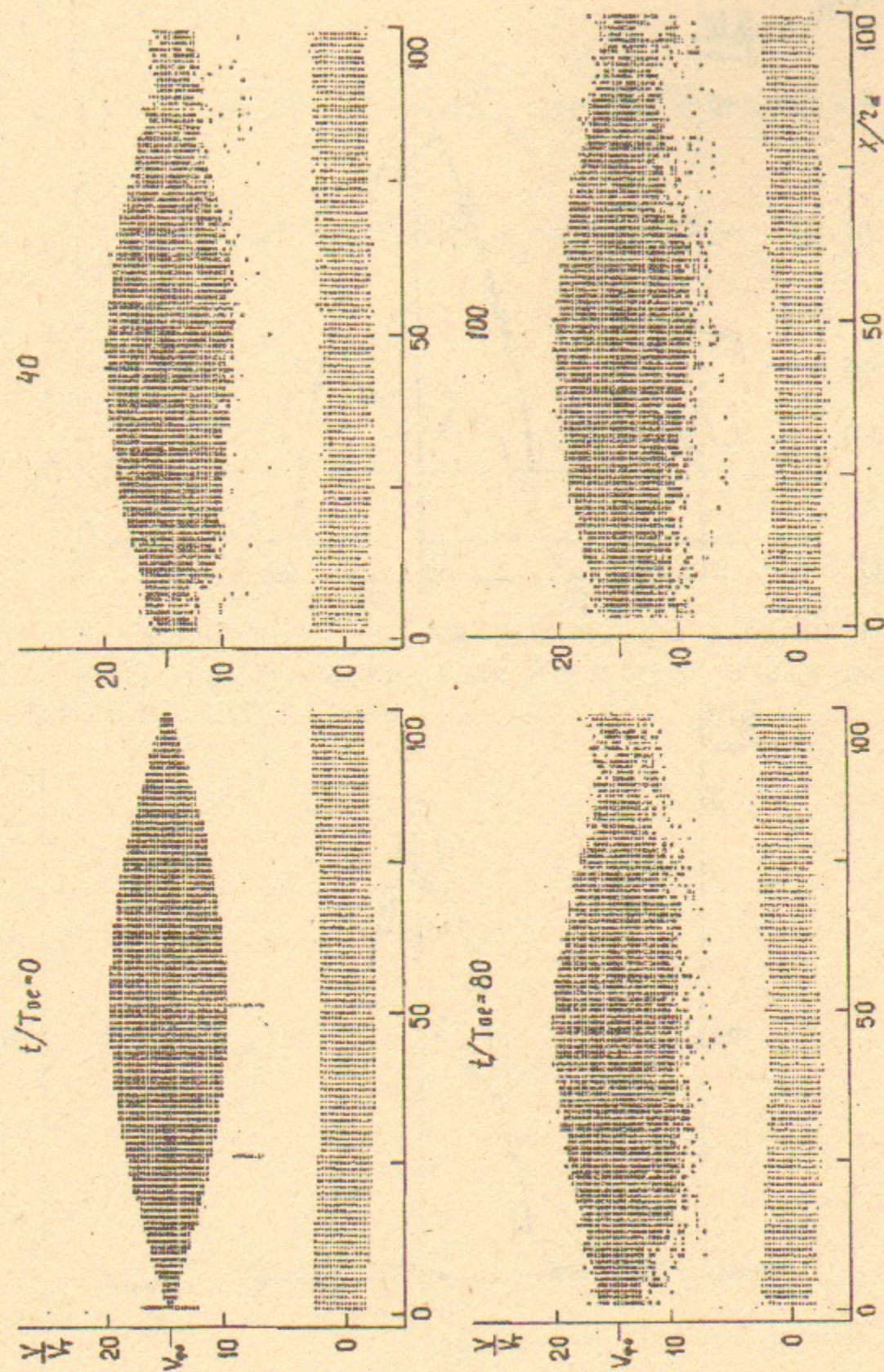


Рис. 3. Фазовые плоскости электронов. Случай 1-2.

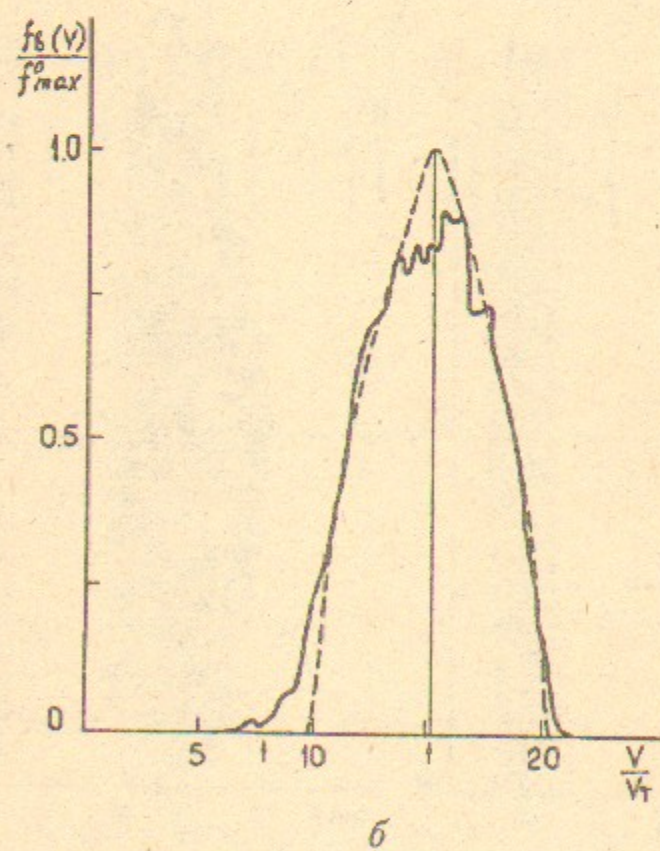
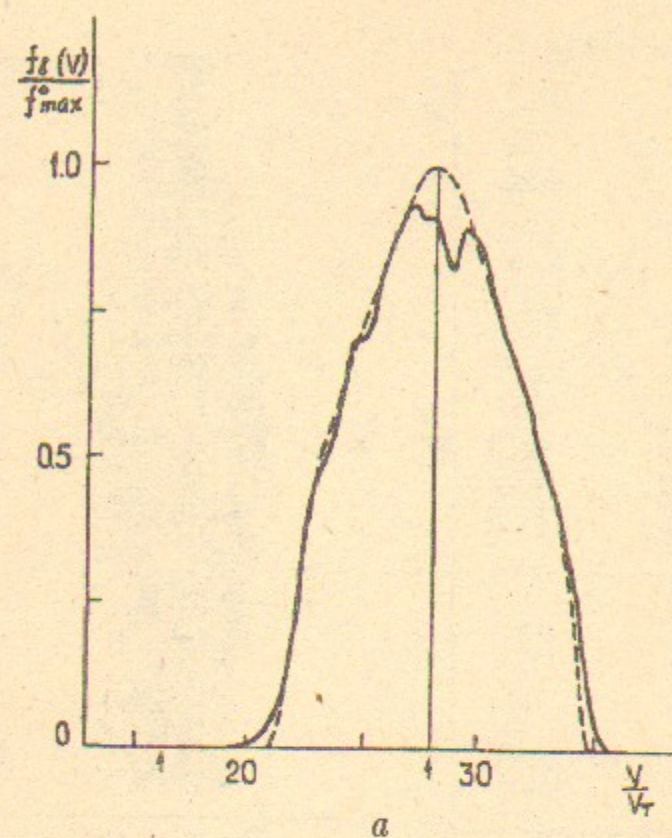


Рис. 3, а, б. Функция распределения плотности по скоростям. Пунктир — начальная функция распределения; стрелки — фазовые скорости волн $N = 1$ и $N = 2$. Случай 2 (а); случай 1-2 (б) $t/T_{oe} = 100$.

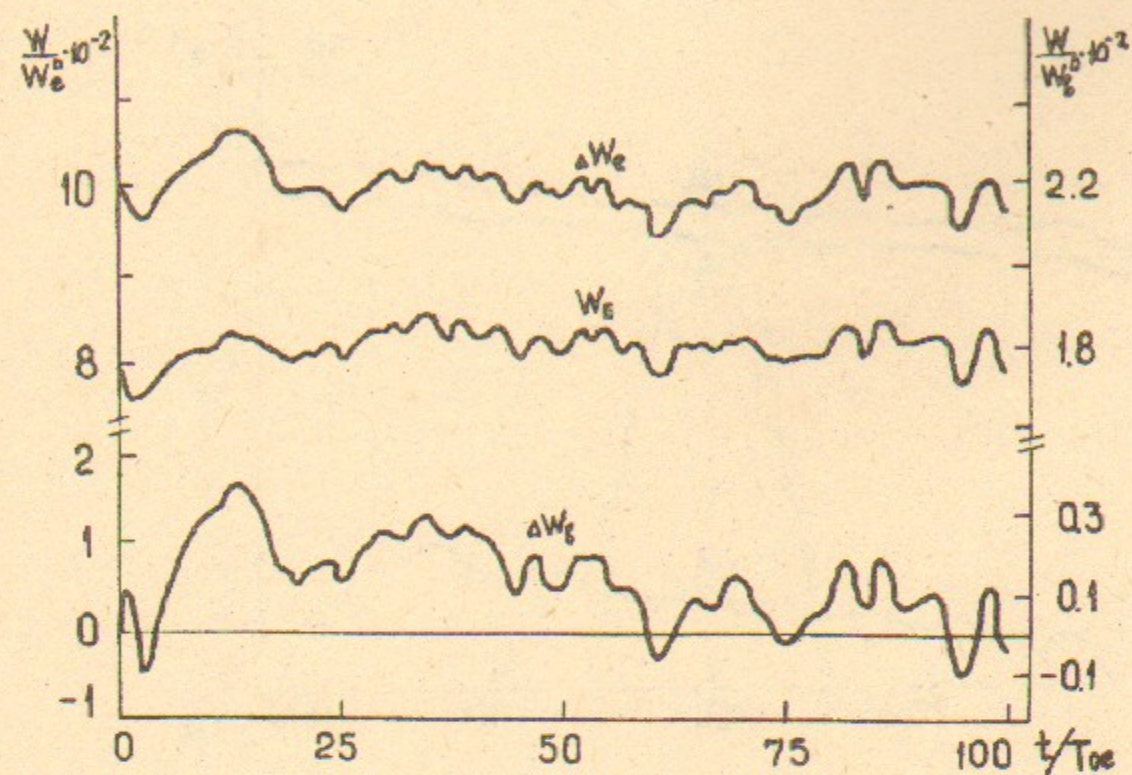


Рис. 4. Зависимость от времени потерь энергии b -электронов ($\Delta W_b = -(W_b - W_b^0)$), энергии поля W_E и энергии электронов плазмы ΔW_e ($\Delta W_e = W_e - W_e^0$). Случай 2.

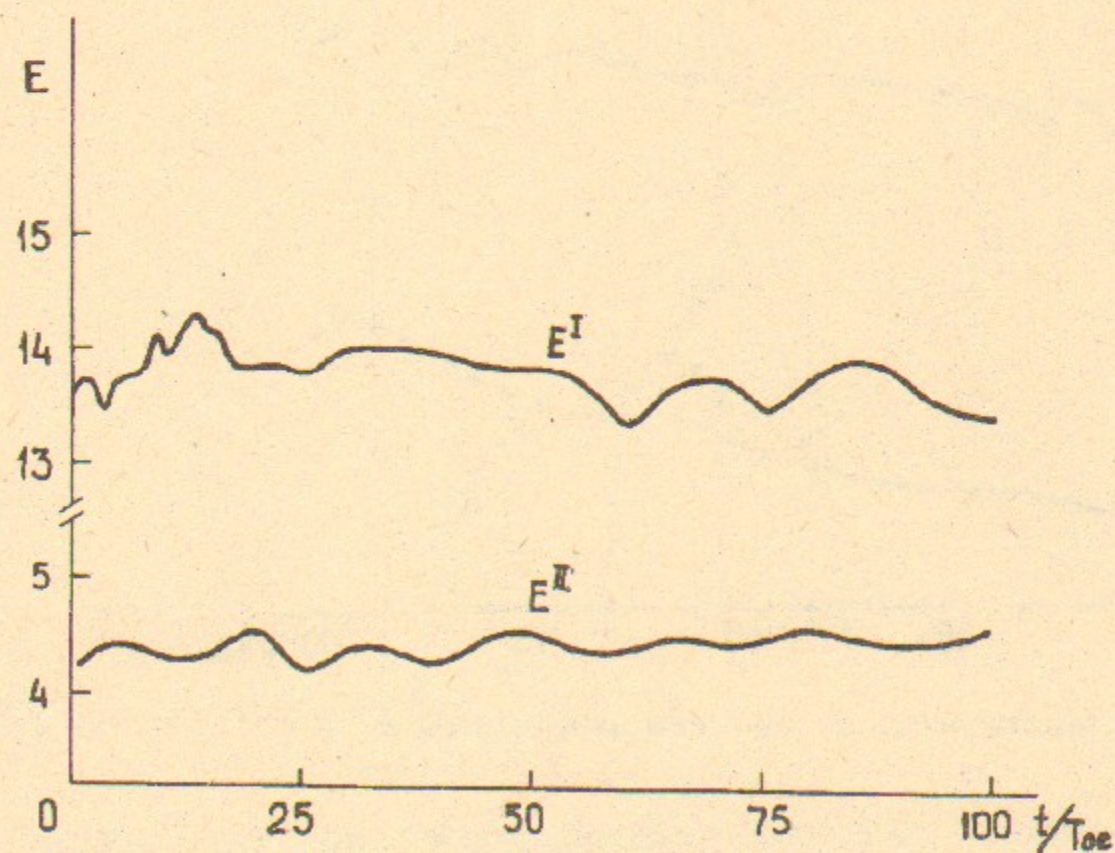


Рис. 5. Зависимость от времени амплитуды волны БГК E^I и ленгмюровской волны E^{II} . E нормировано на $m r_d / e T_{oe}^2$. Случай 2.

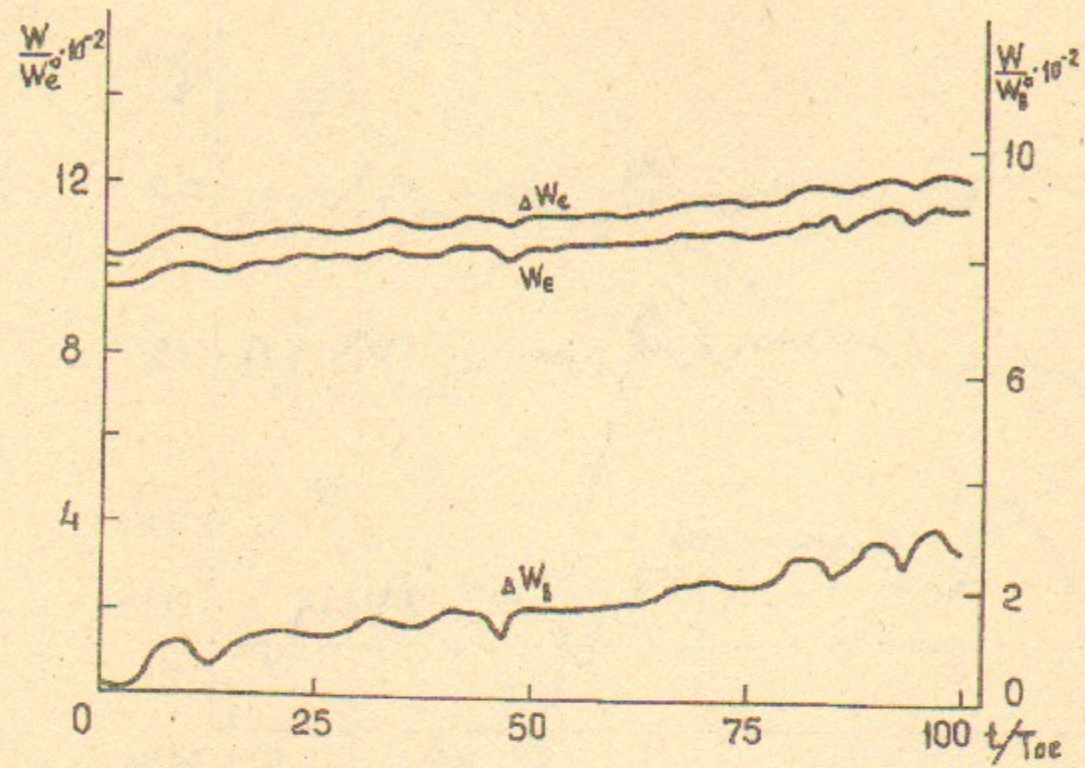


Рис. 6. Зависимость от времени энергии ΔW_b , W_E , ΔW_e . Случай 1-2.

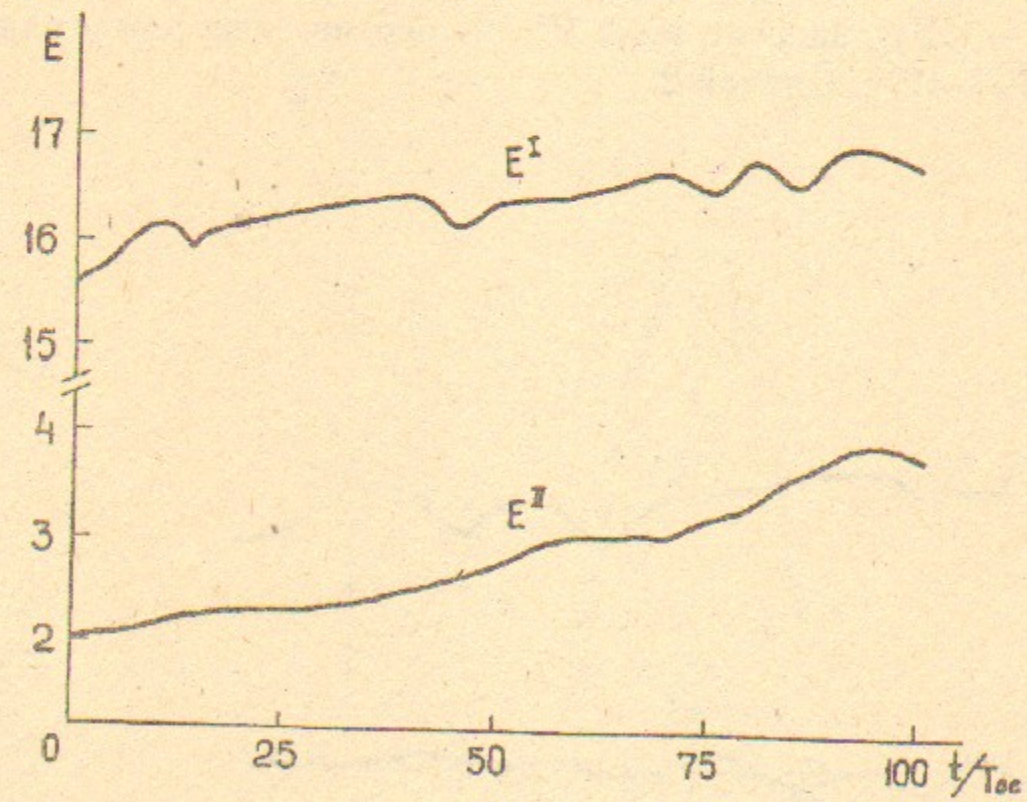
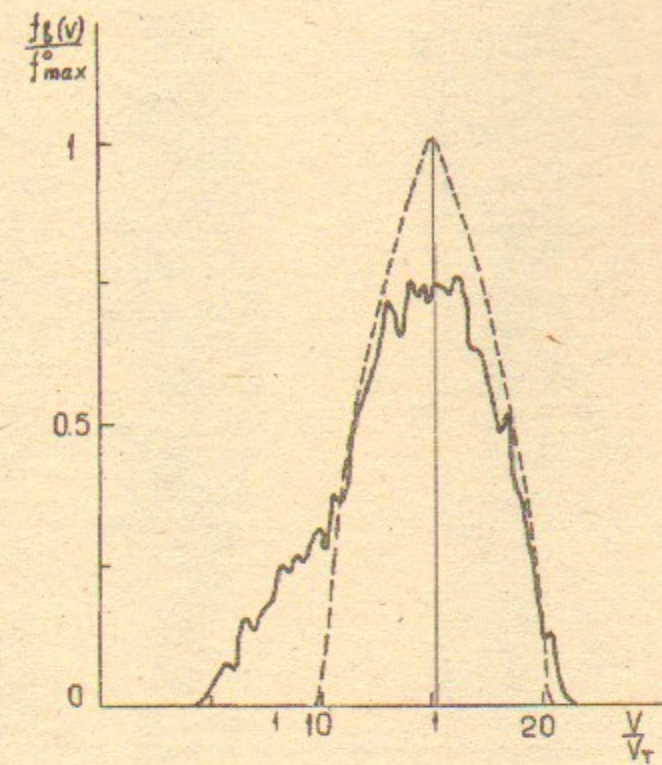
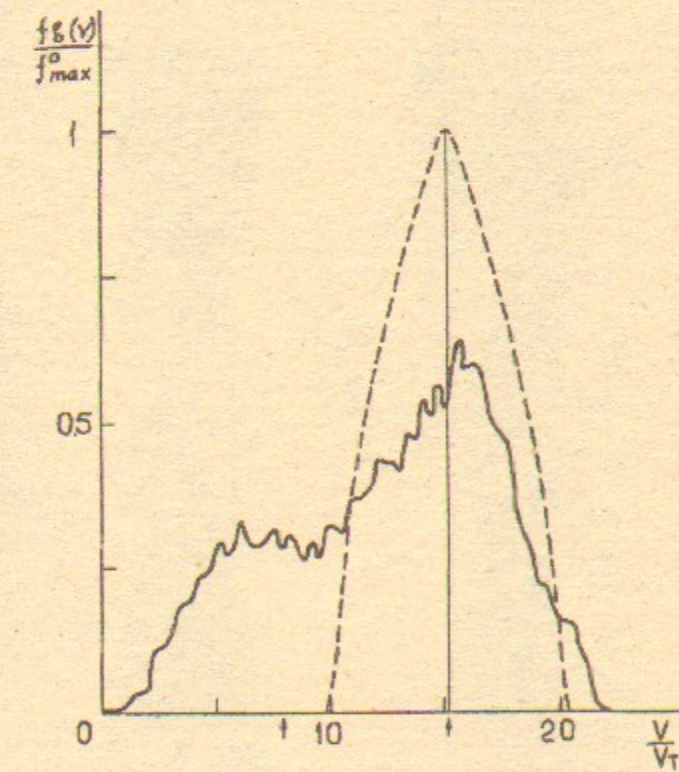


Рис. 7. Зависимость от времени амплитуды E^I и E^{II} . Случай 1-2.



а



б

Рис. 8, а, б. Функция распределения по скоростям. Пунктир — начальная функция распределения; стрелки — фазовые скорости волн $N = 1$ и $N = 2$. Случай 1-3 (а) и случай 1-4 (б). $t/T_{oe} = 100$.

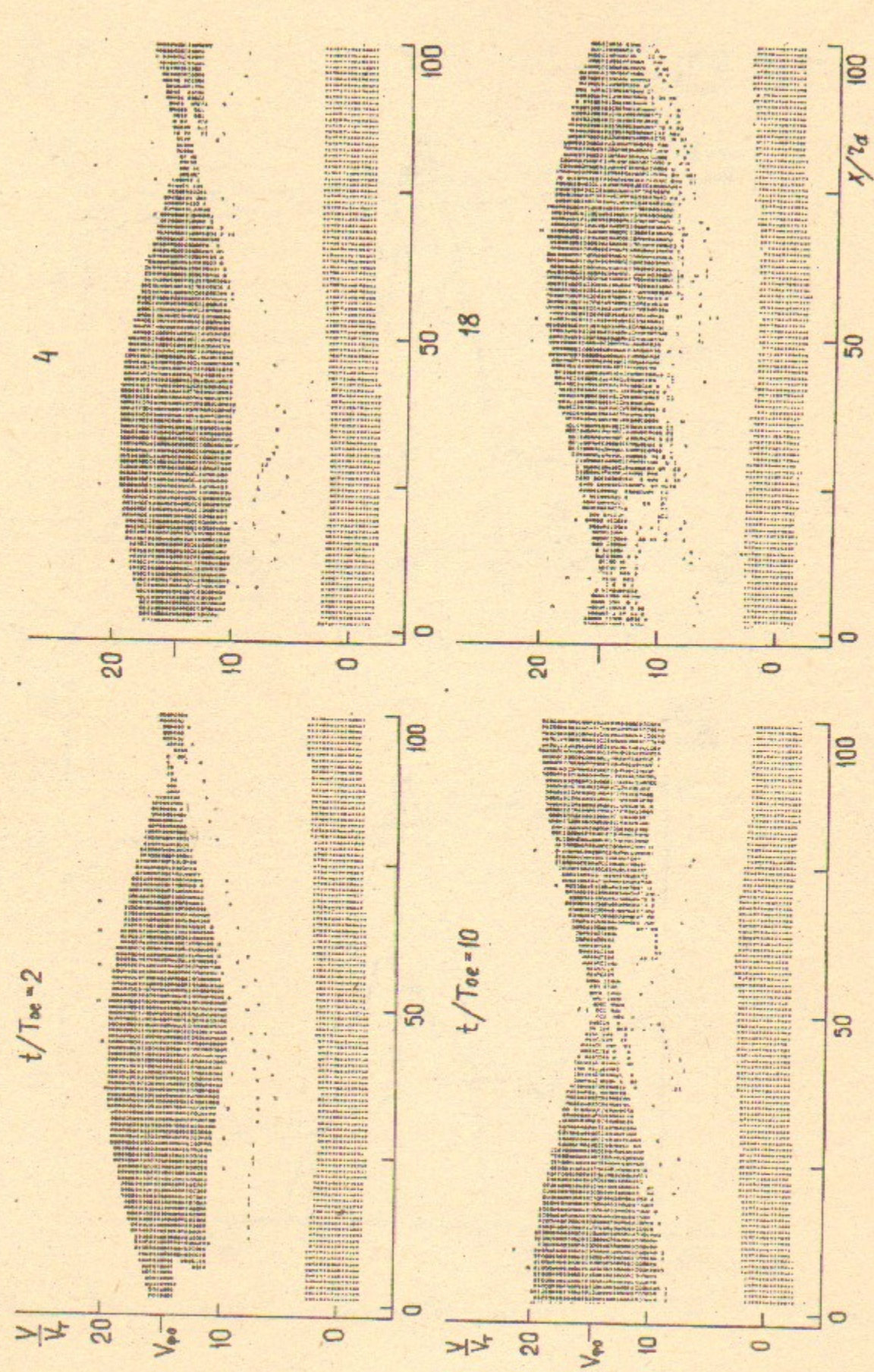


Рис. 8. Фазовые плоскости электронов. Случай 1-3.

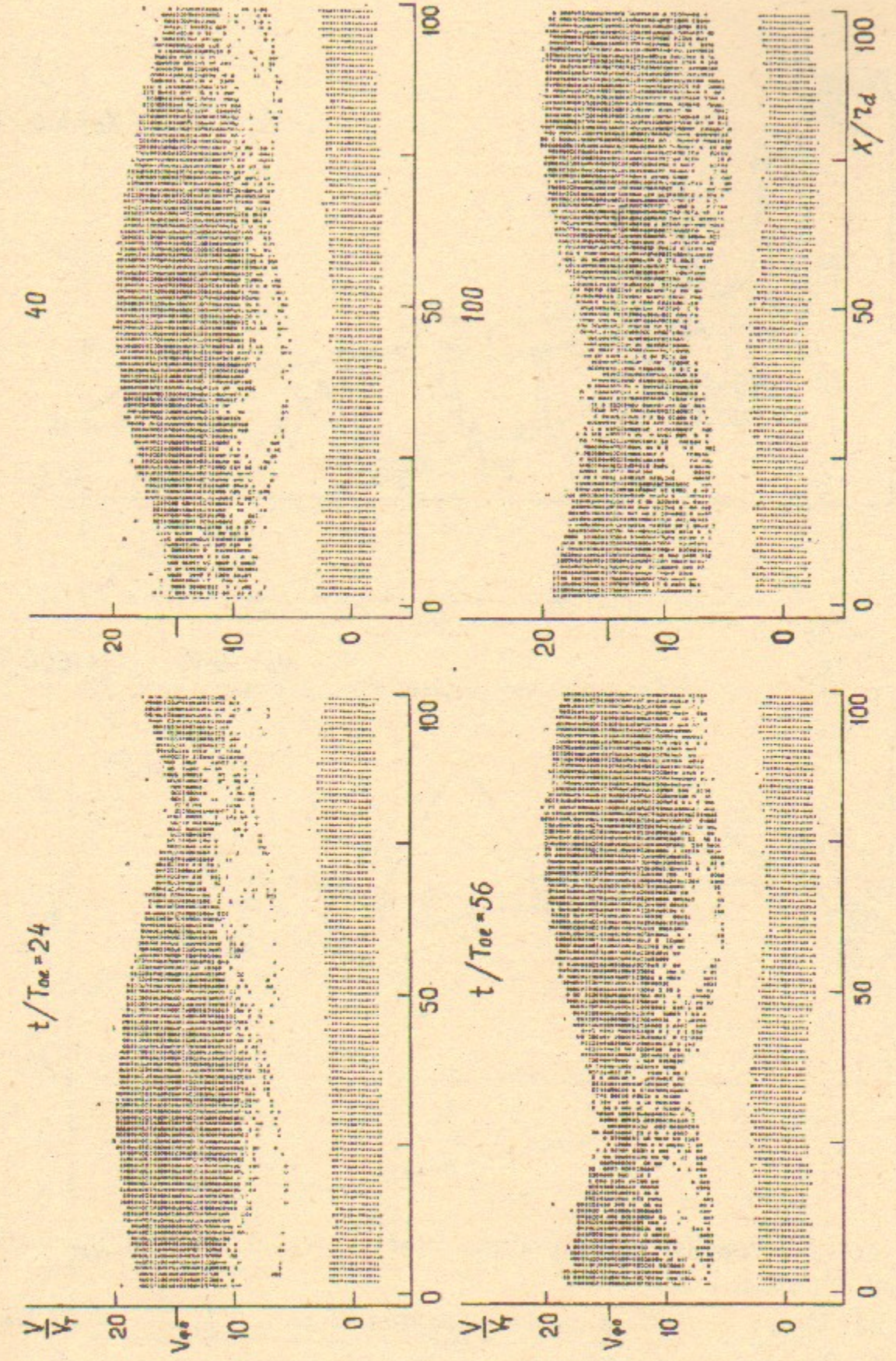


Рис. 8. Фазовые плоскости электронов. Случай 1-3.

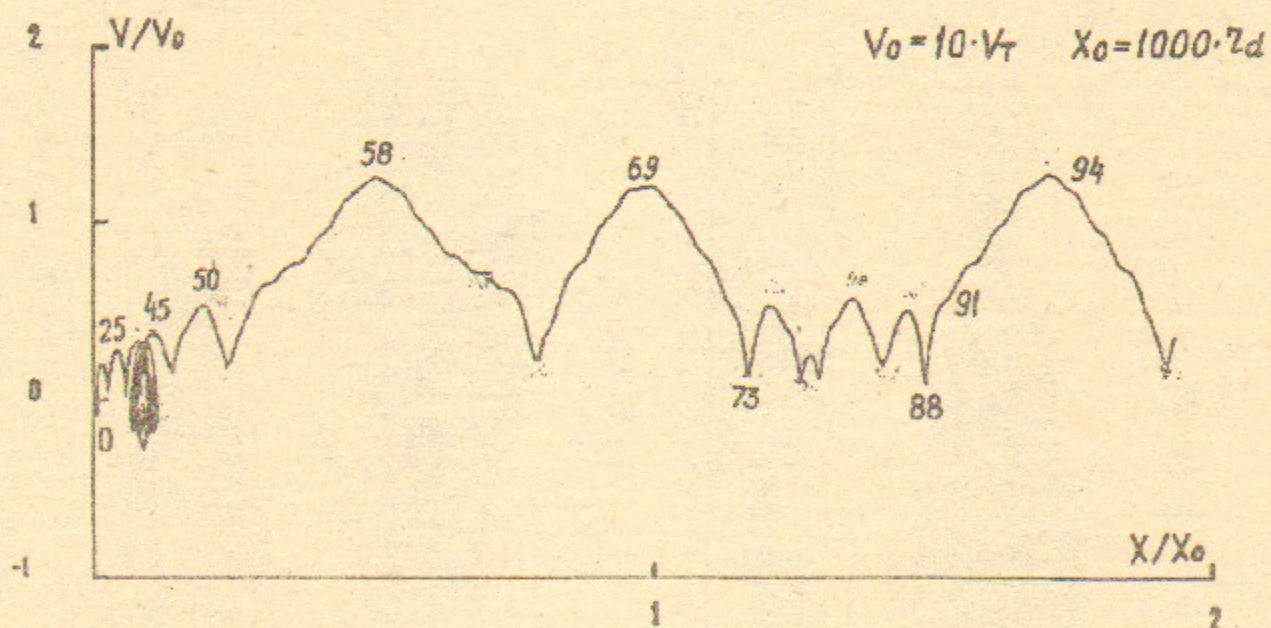
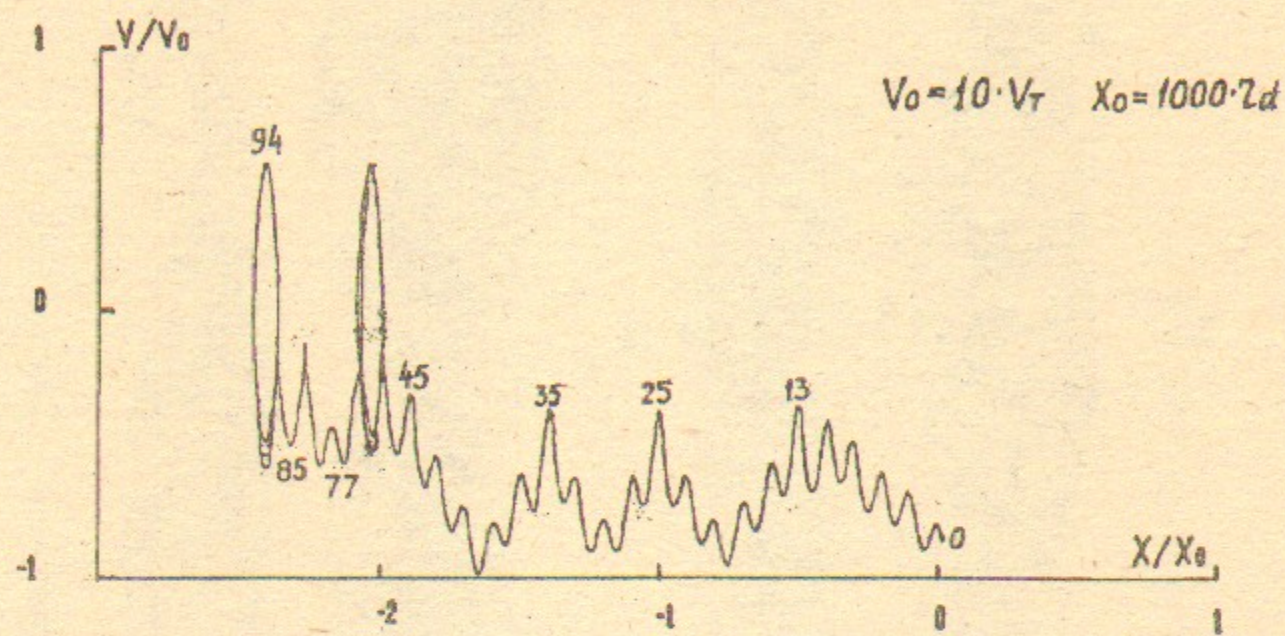


Рис. 9, а, б. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. Случай 1-3.
 $x_0/r_d = 25$; $V_0/V_T = 6.27$; в системе волны $N = 1$, $V_{\phi 0}^I/V_T = 15.1$ (а) и $N = 2$, $V_{\phi 0}^{II}/V_T = 8.15$ (б).
 Цифры на траектории — моменты времени, когда частица имеет данные x и V .

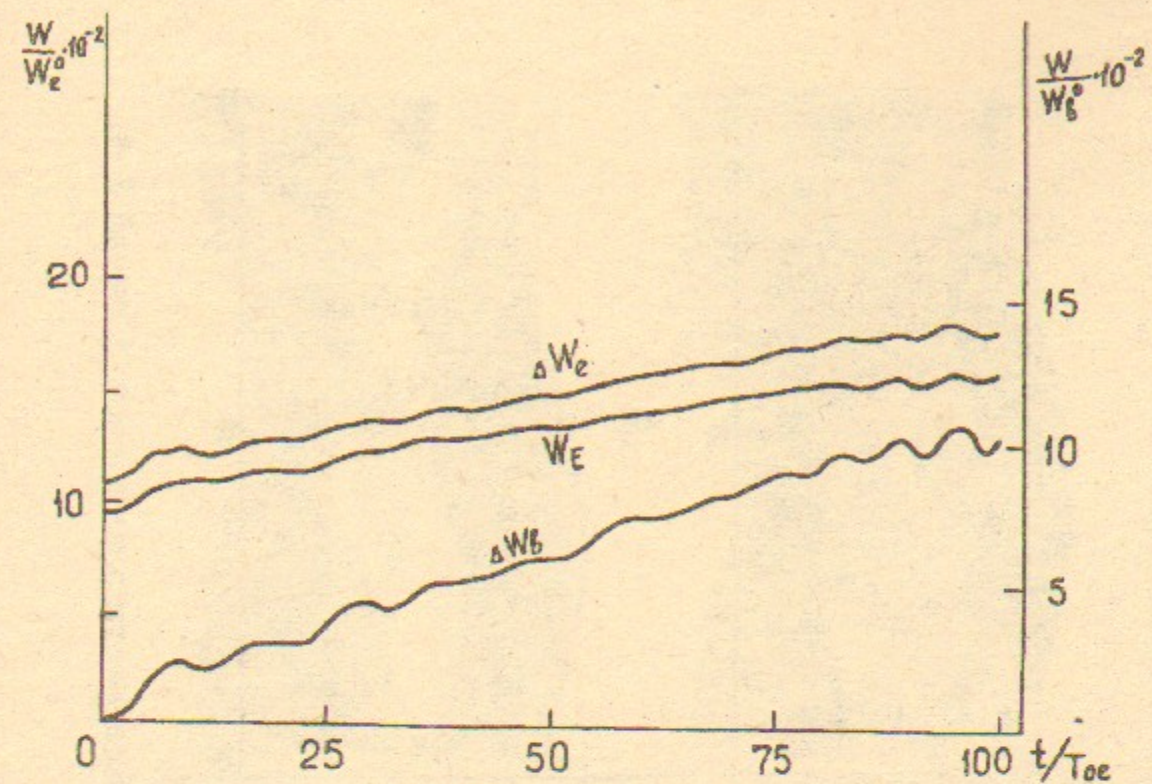


Рис. 10. Зависимость от времени энергии ΔW_b , W_E , ΔW_e . Случай 1-3.

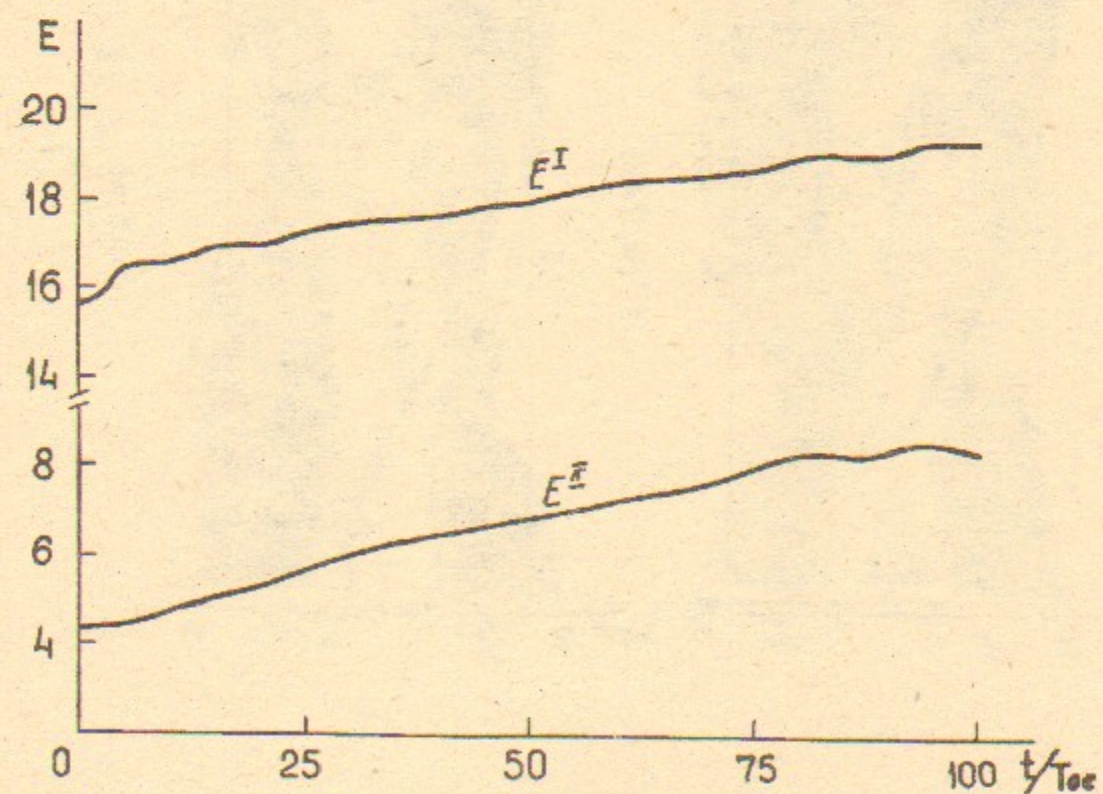


Рис. 11. Зависимость от времени амплитуды E^I и E^{II} . Случай 1-3.

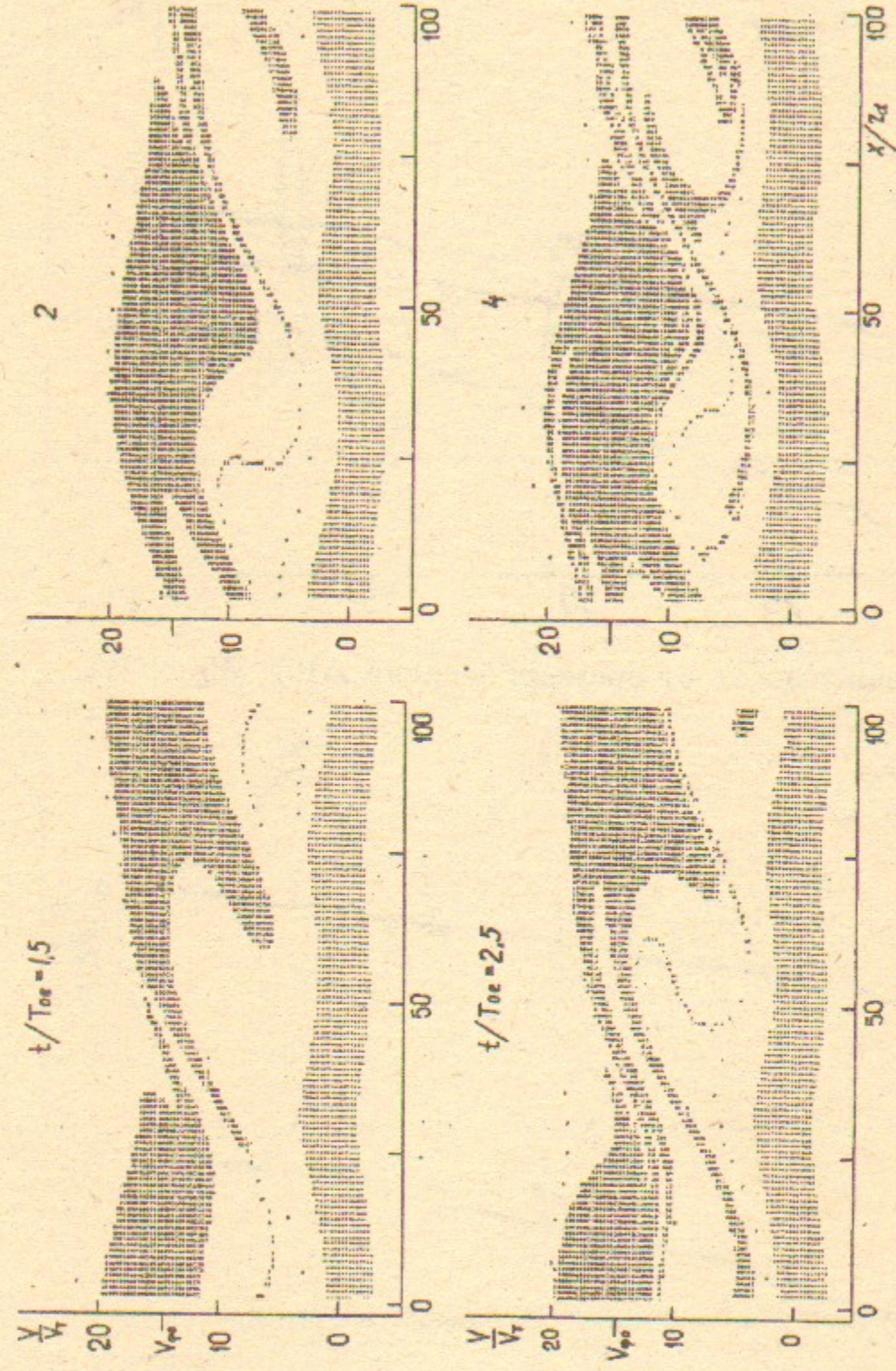


Рис. 12. Фазовые плоскости электронов. Случай 1-4.

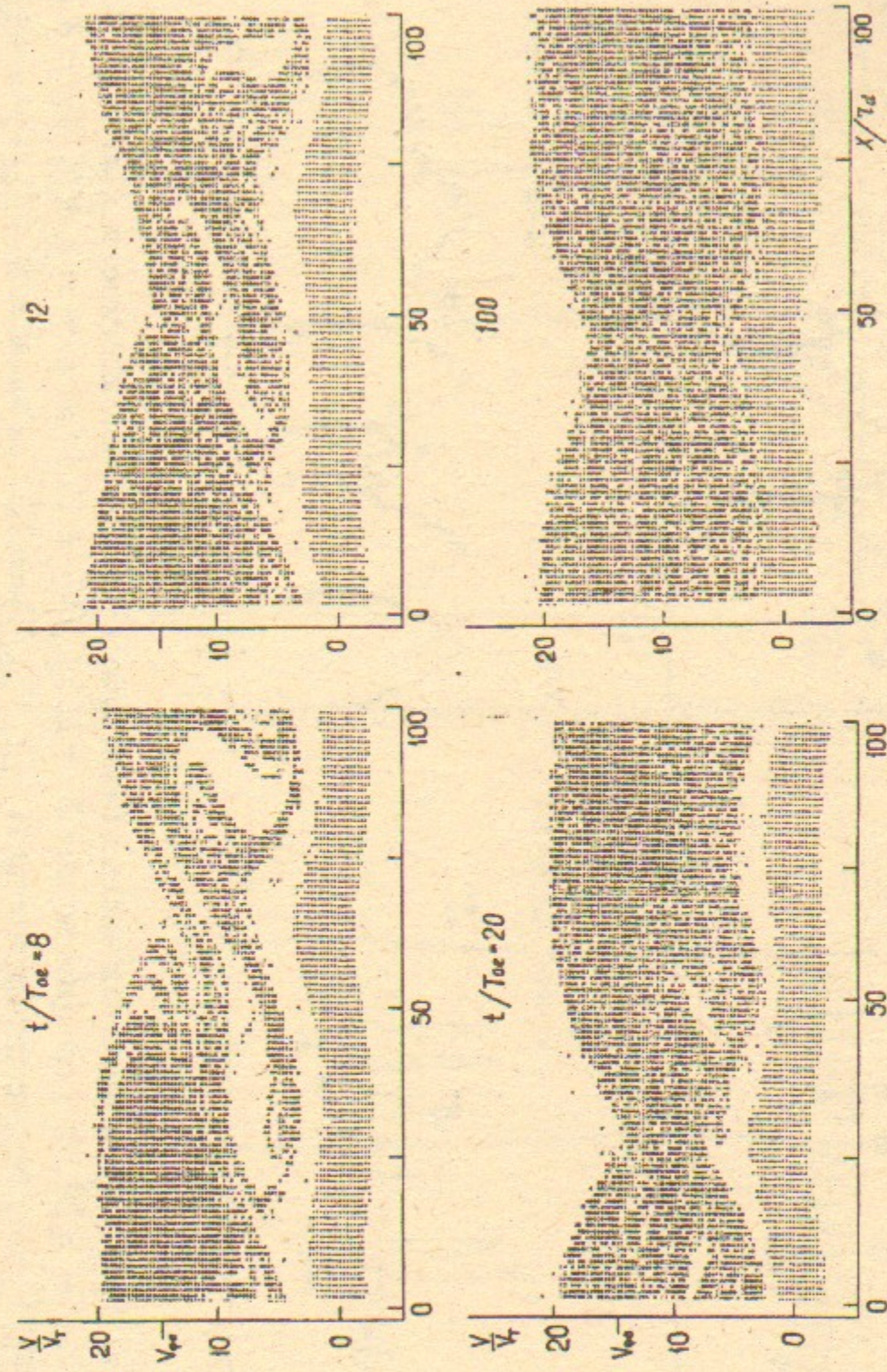


Рис. 12. Фазовые плоскости электронов. Случай 1-4.

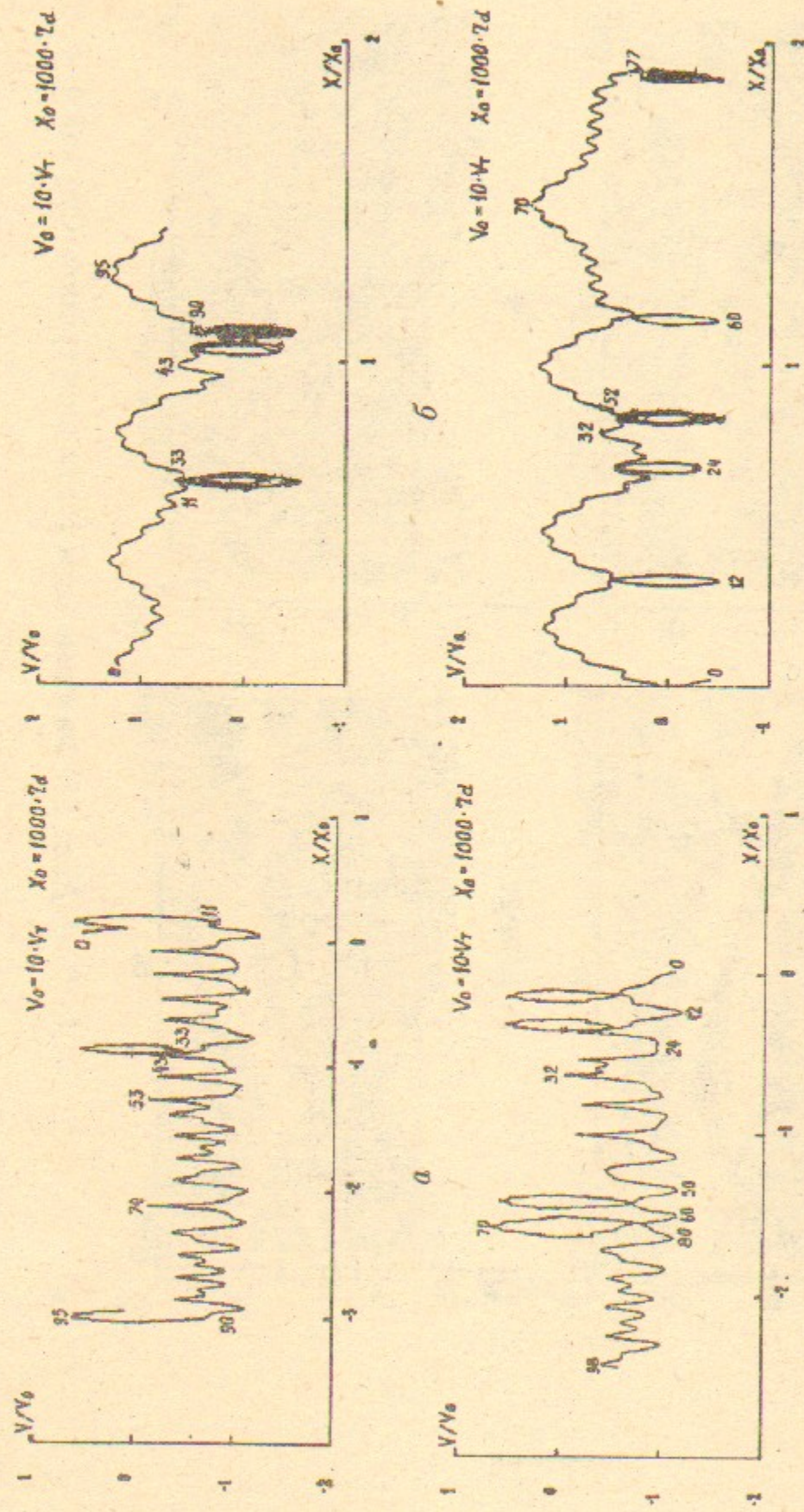


Рис. 13, а - г. Траектории пробных частиц (электронов) на фазовой плоскости. Случай 1-4. $x_0/r_d = 50$; $V_0/V_T = 20.10$; в системе волны $N = 1$, $V_{\phi 0}^I/V_T = 15.1$ (а) и $N = 2$, $V_{\phi 0}^{II}/V_T = 8.15$ (б). $x_0/r_d = 25$; $V_0/V_T = 3.76$; в системе волны $N = 1$, $V_{\phi 0}^I/V_T = 15.1$ (в) и $N = 2$, $V_{\phi 0}^{II}/V_T = 8.15$ (г). Цифры на траектории — моменты времени, когда частица имеет данные x и V .

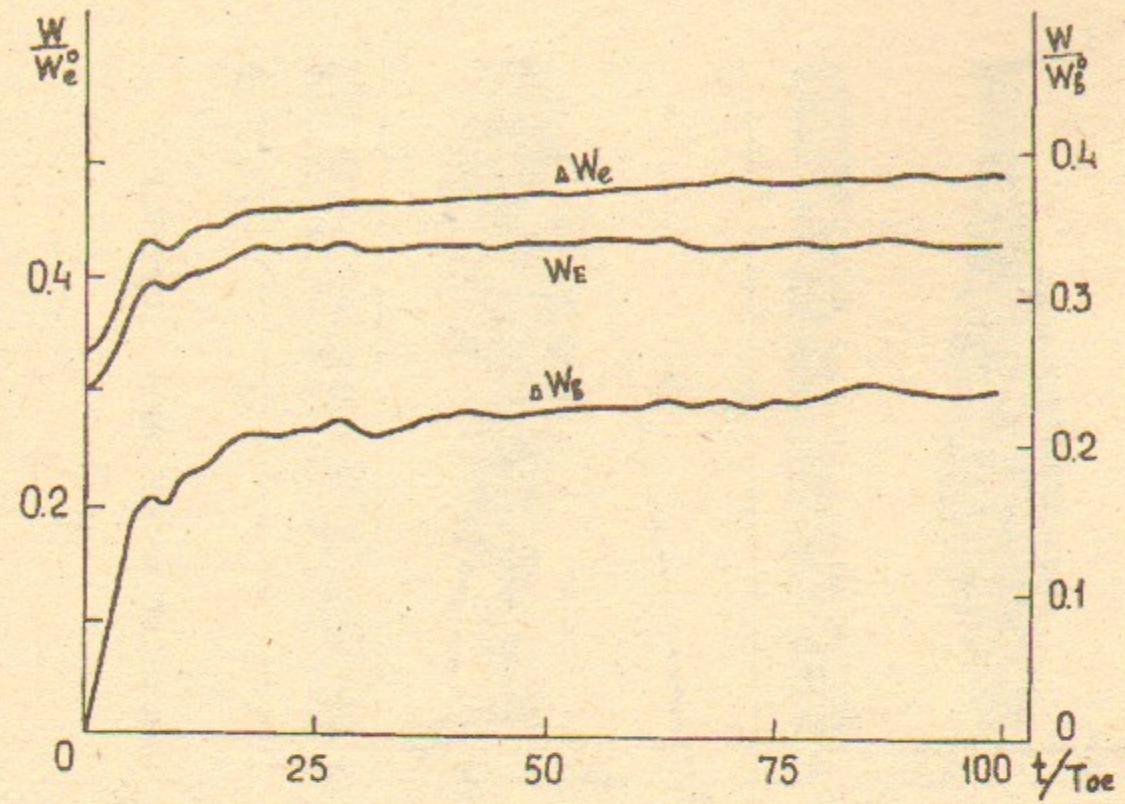


Рис. 14. Зависимость от времени энергии ΔW_b , W_E , ΔW_e . Случай 1-4.

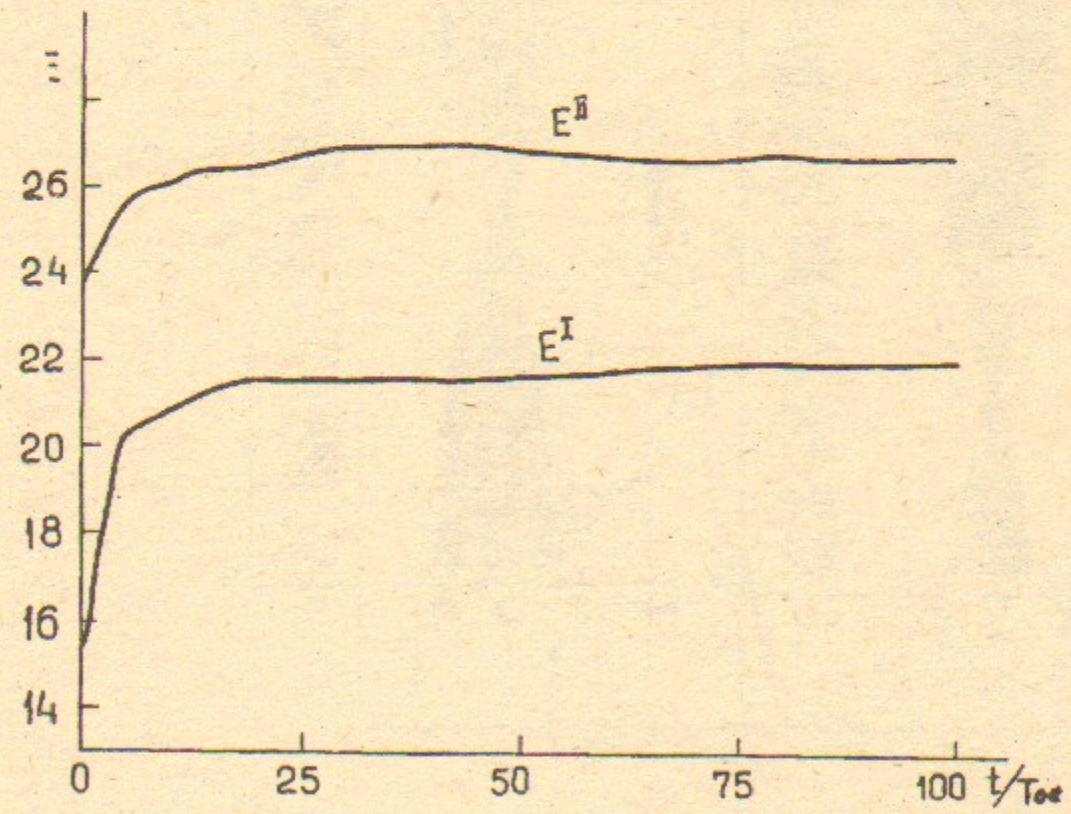


Рис. 15. Зависимость от времени амплитуды E^I и E^{II} . Случай 1-4.

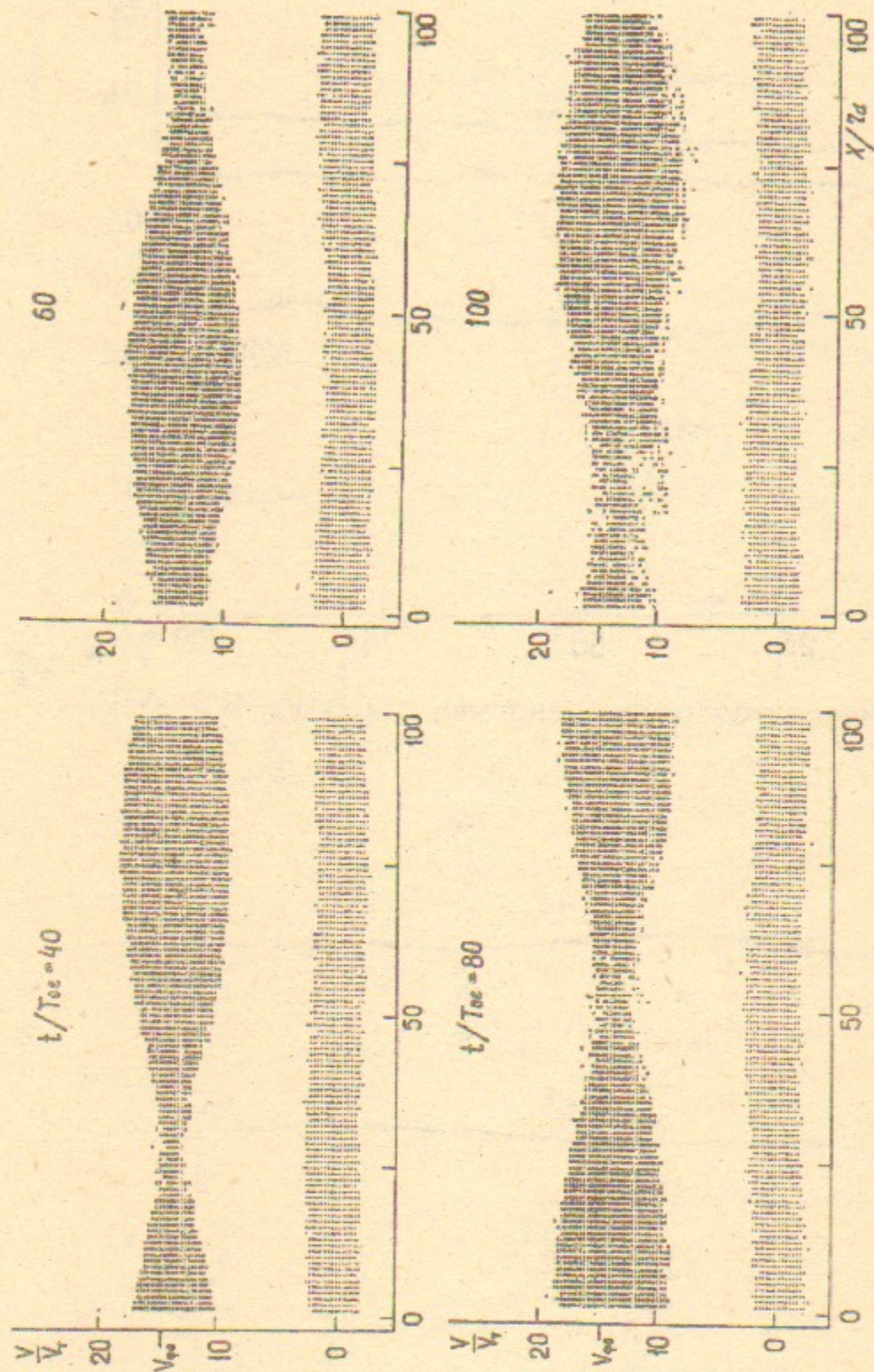


Рис. 16. Фазовые плоскости электронов. Случай 2-2.

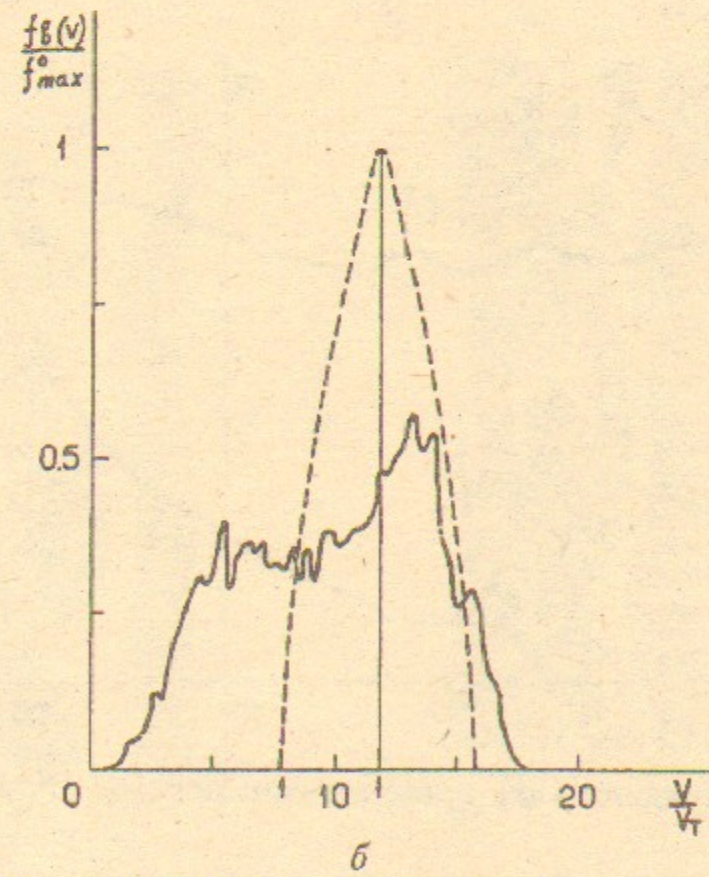
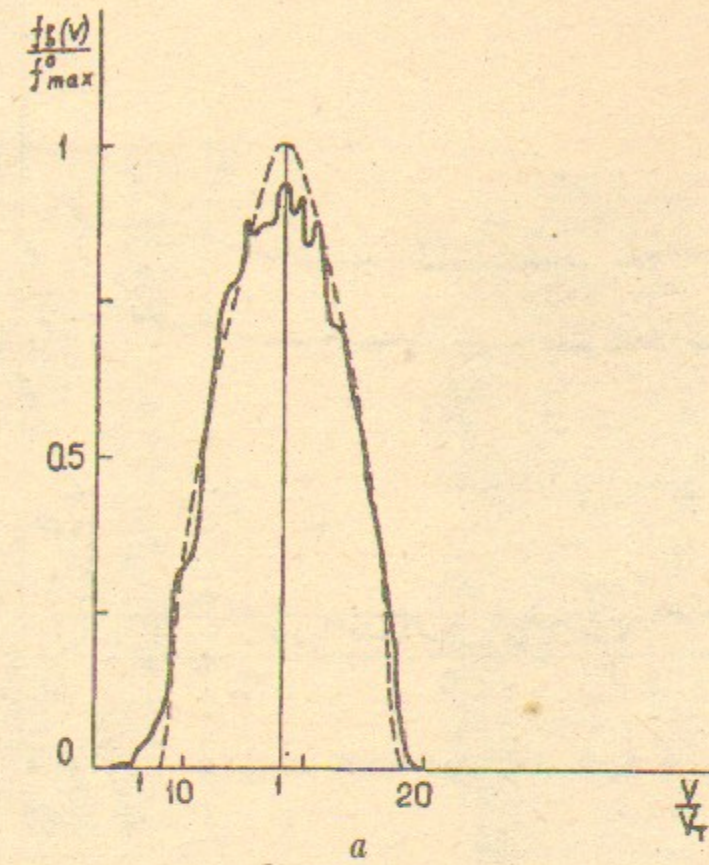


Рис. 16, а, б. Функция распределения по скоростям. Пунктир — начальная функция распределения; стрелки — фазовые скорости воли $N = 1$ и $N = 2$. Случай 2-2 $t/T_{oe} = 100$ (а) и случай 2-3 $t/T_{oe} = 40$ (б).

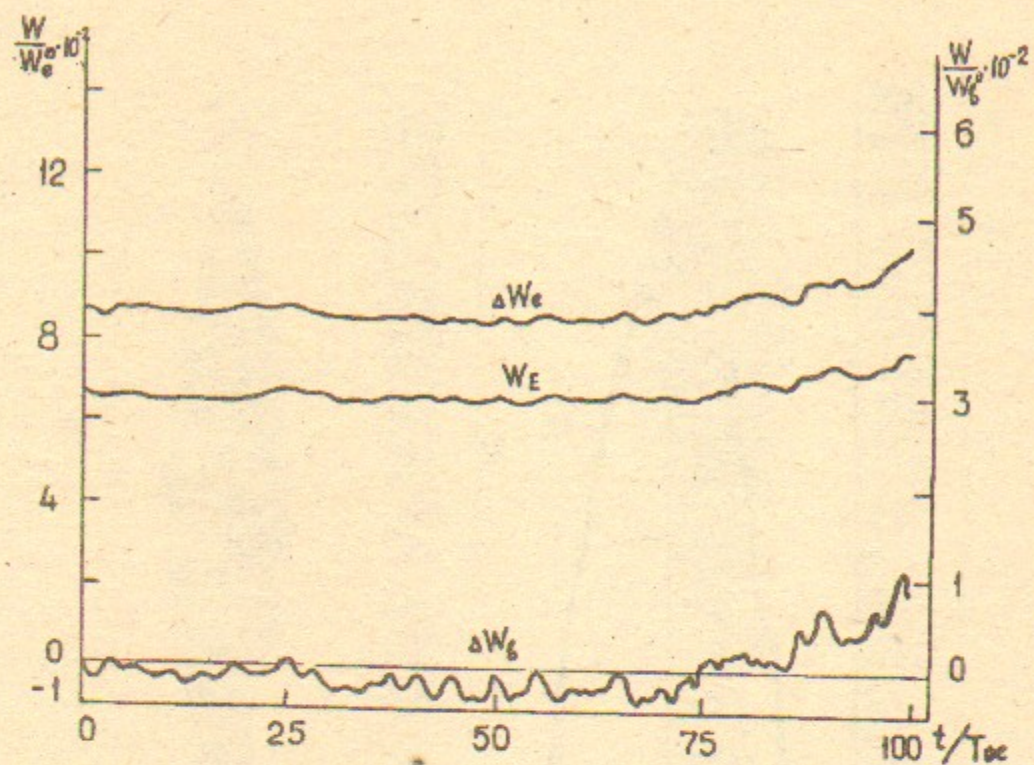


Рис. 17. Зависимость от времени энергии ΔW_b , W_E , ΔW_e .
Случай 2-2.

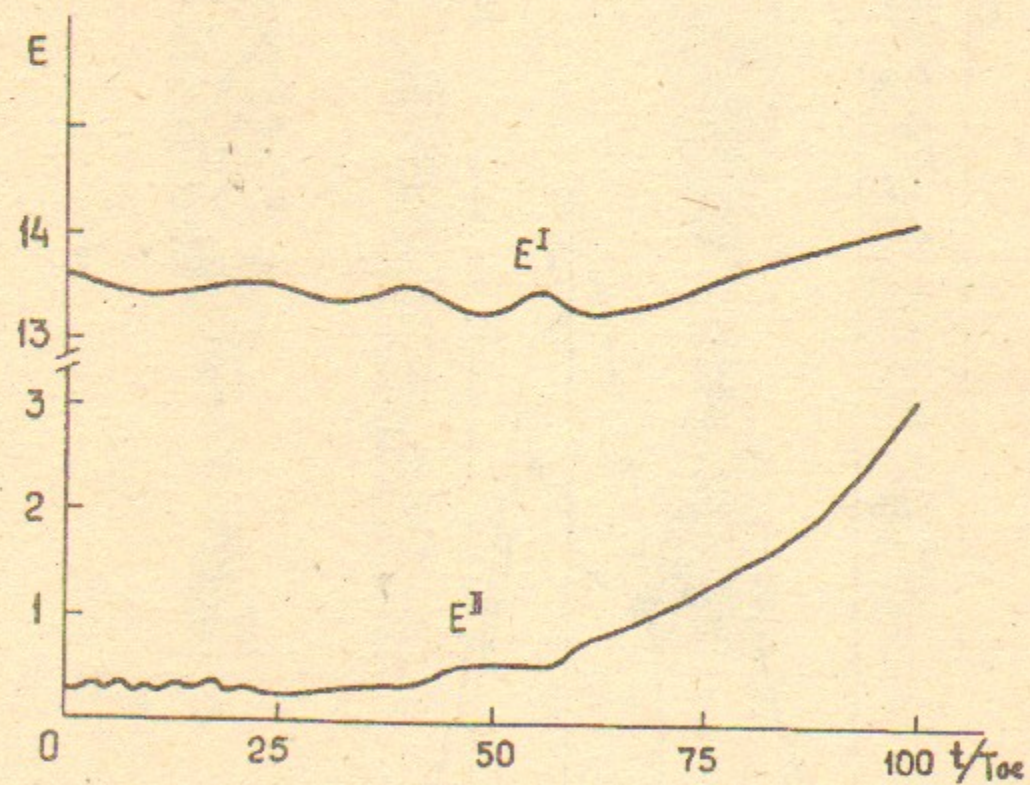


Рис. 18. Зависимость от времени амплитуды E^I и E^{II} . Случай 2-2.

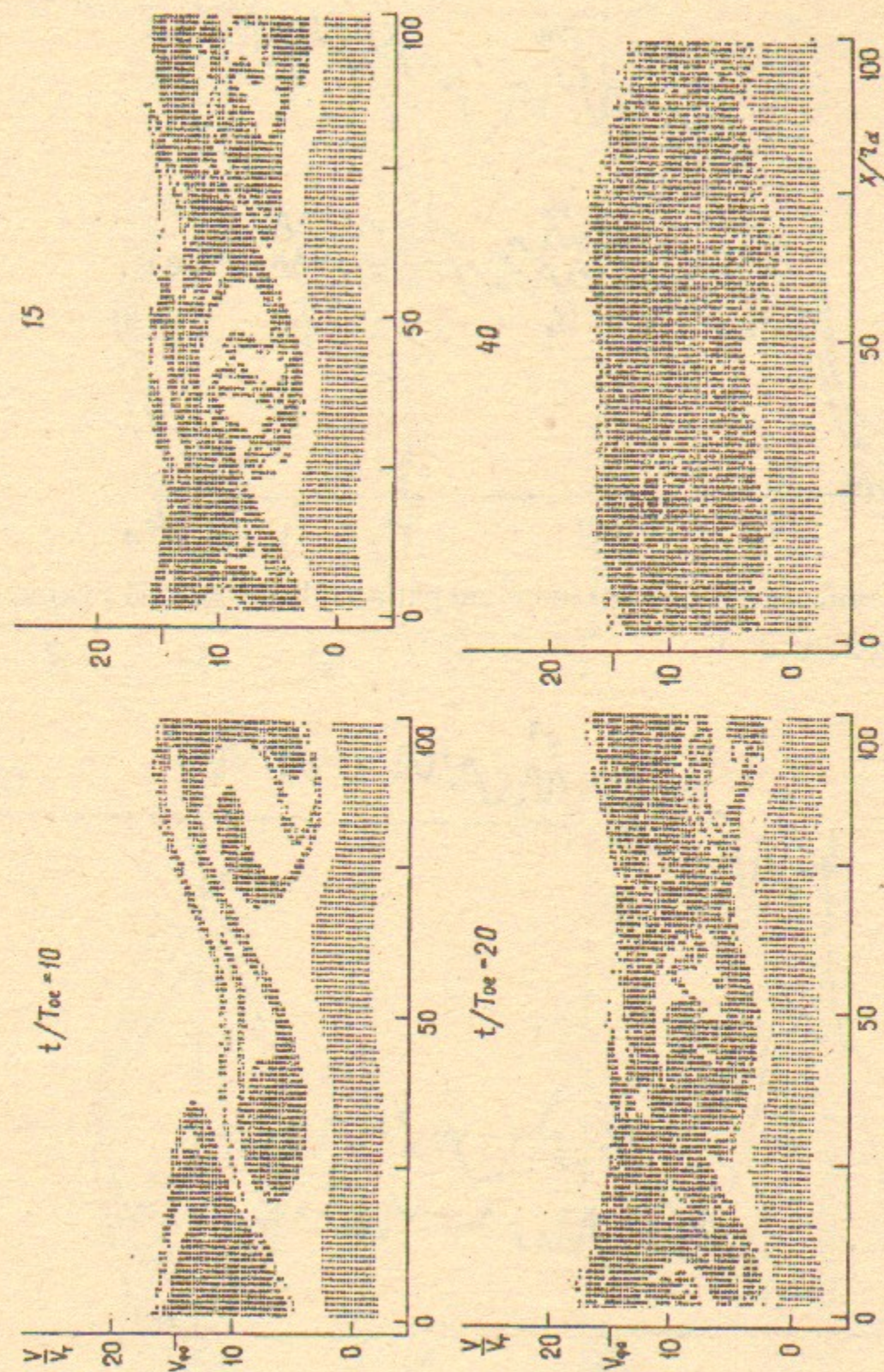


Рис. 19. Фазовые плоскости электронов. Случай 2-3.

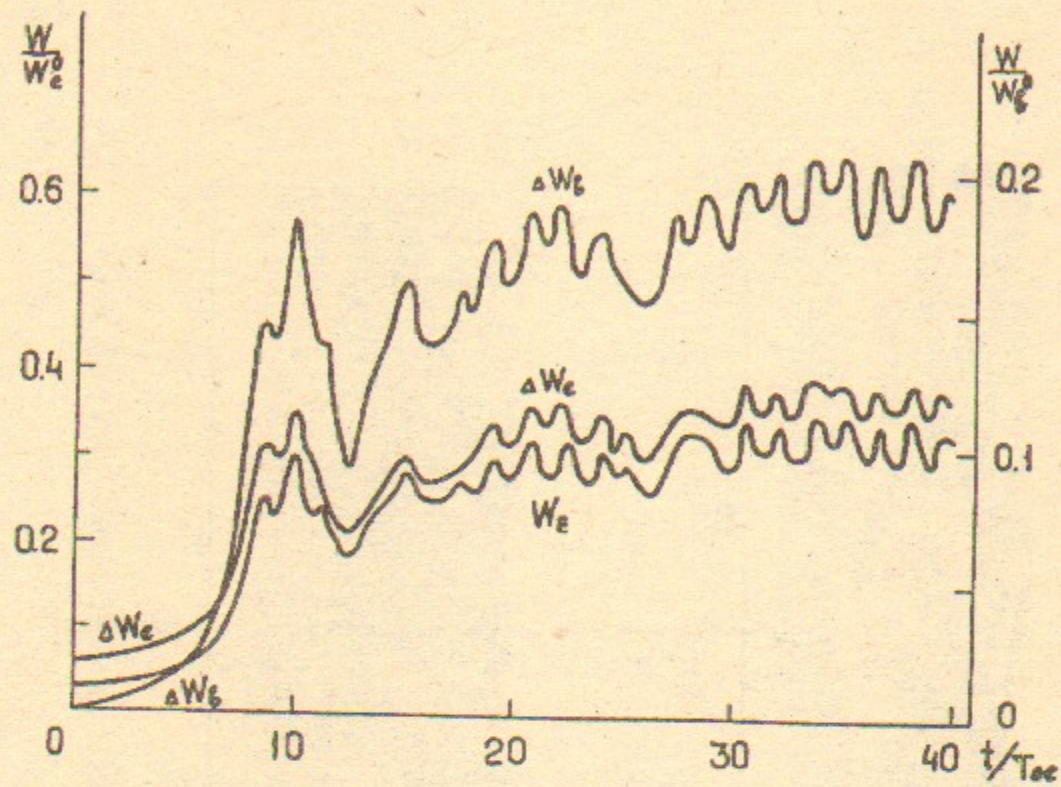


Рис. 20. Зависимости от времени энергии ΔW_b , W_E , ΔW_e (кривые не сглажены). Случай 2-3.

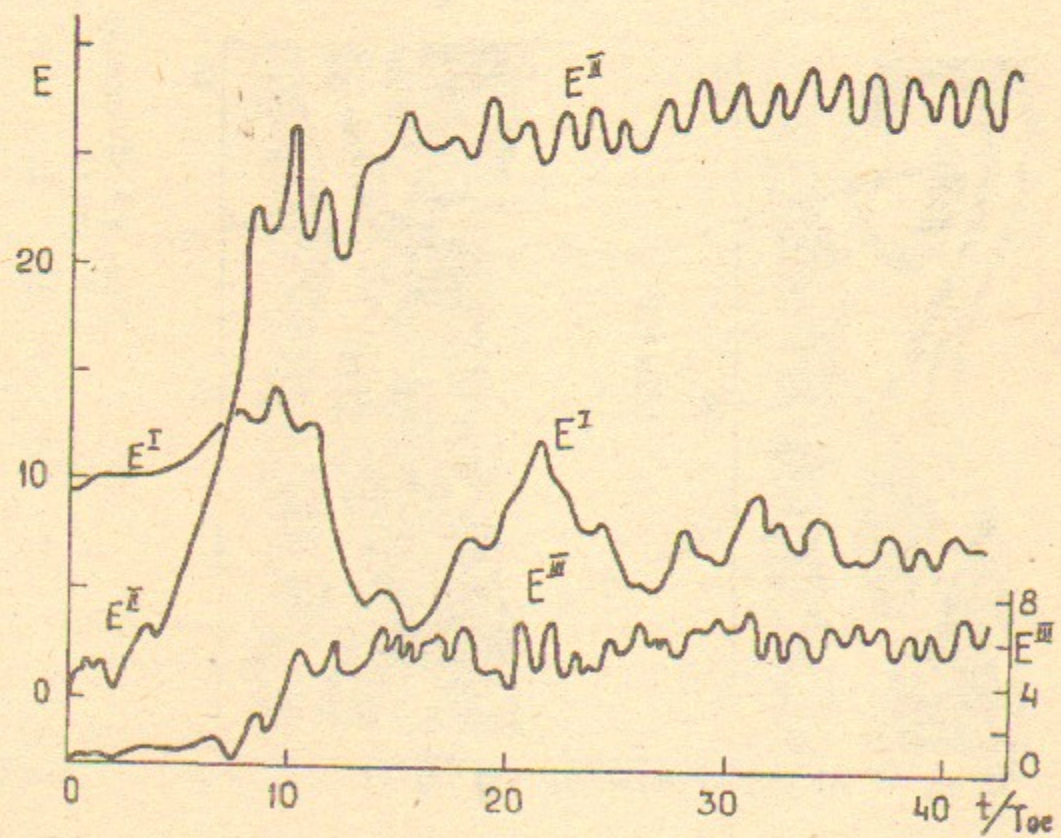
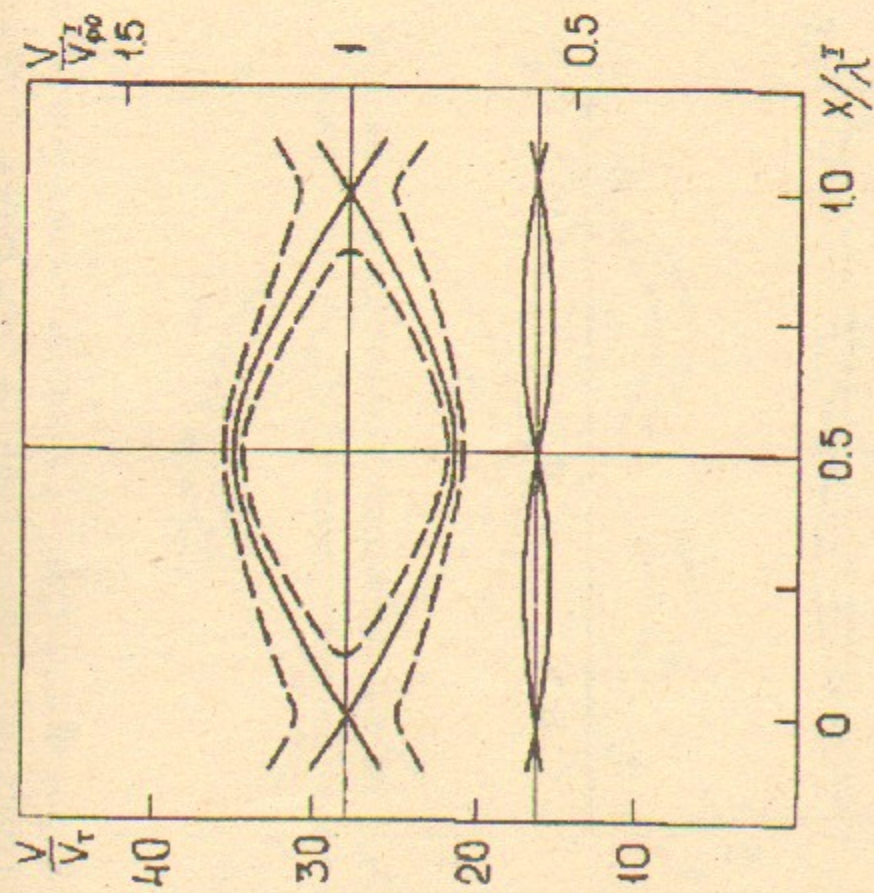
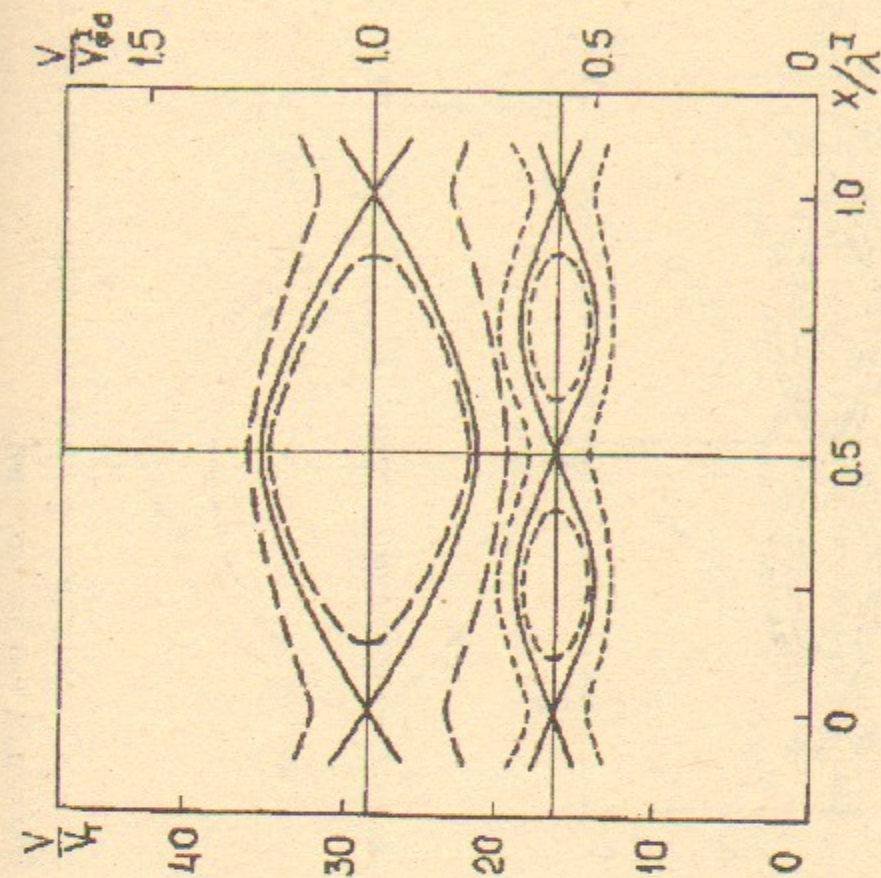


Рис. 21. Зависимость от времени амплитуды E^I , E^{II} и E^{III} (кривые не сглажены). Шкала E^{III} справа. Случай 2-3.



б

а

Рис. 22, а, б. Области захвата волны БГК $N = 1$ и ленгмюровской волны $N = 2$ в $t = 0$ и границы стохастических слоев в $t/T_{oe} \sim 100$. Схема.

Рис. а б
Случай 1 2

Широкий пунктир — границы слоя волны $N = 1$. Мелкий пунктир — границы слоя волны $N = 2$.

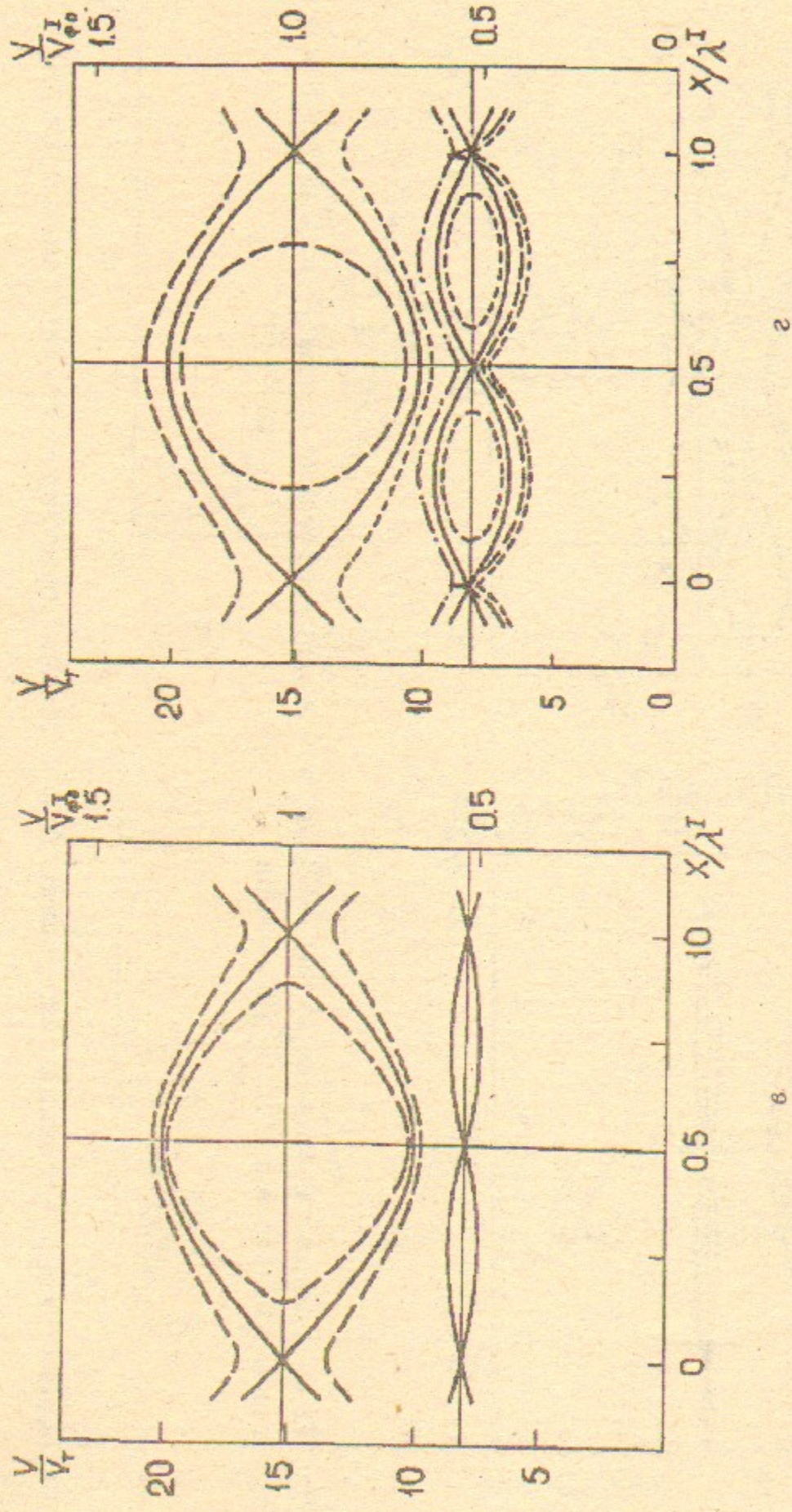


Рис. 22, б, г. Области захвата волны БГК $N = 1$ и ленгмюровской волны $N = 2$ в $t = 0$ и границы стохастических слоев в $t/T_{oe} \sim 100$. Схема.

Рис. 6
Случай 1-1

Рис. 2
Случай 1-2

Широкий пунктир — границы слоя волны $N = 1$. Мелкий пунктир — границы слоя волны $N = 2$. г — штрих-пунктир — граница слоя волны $N = 1$ для большей части частиц.

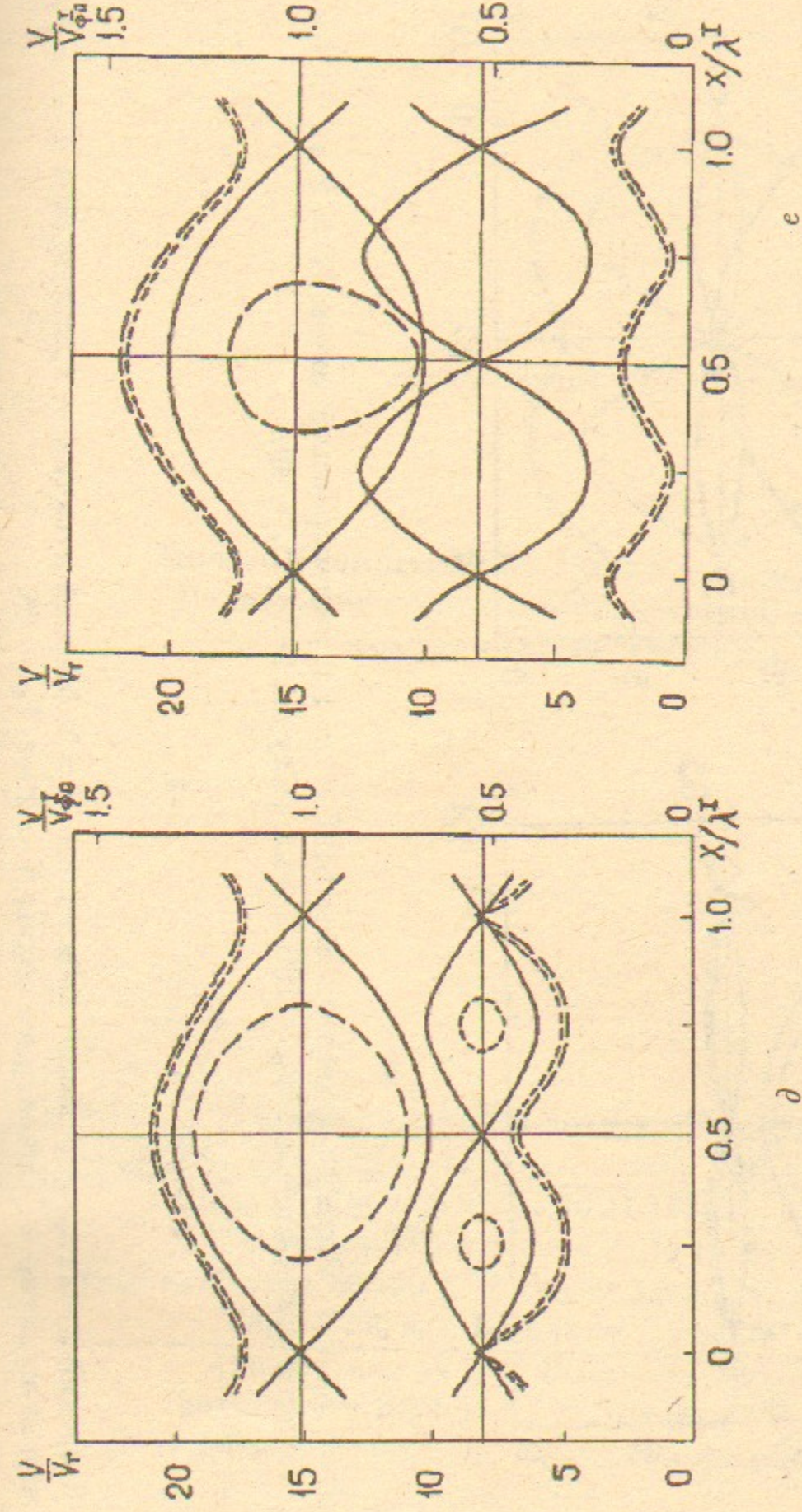
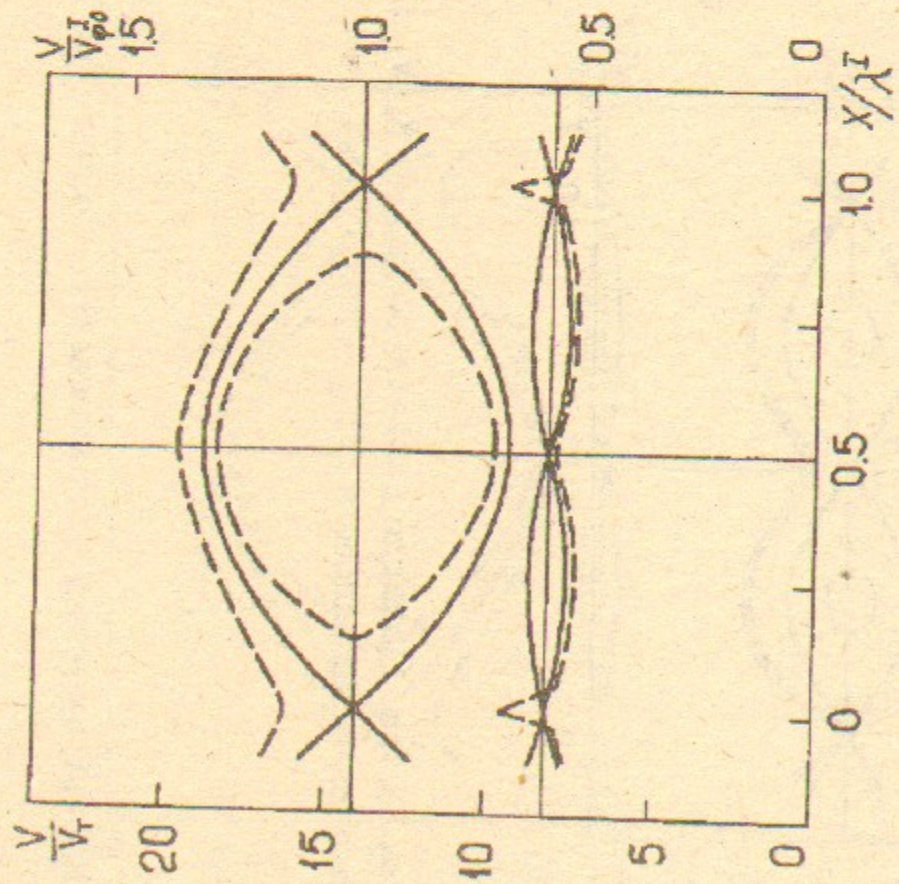


Рис. 22, д, е. Области захвата волны БГК $N = 1$ и ленгмюровской волны $N = 2$ в $t = 0$ и границы стохастических слоев в $t/T_{oe} \sim 100$. Схема.

Рис. д
Случай 1-3

Рис. е
Случай 1-4

Широкий пунктир — границы слоя волны $N = 1$. Мелкий пунктир — границы слоя волны $N = 2$.

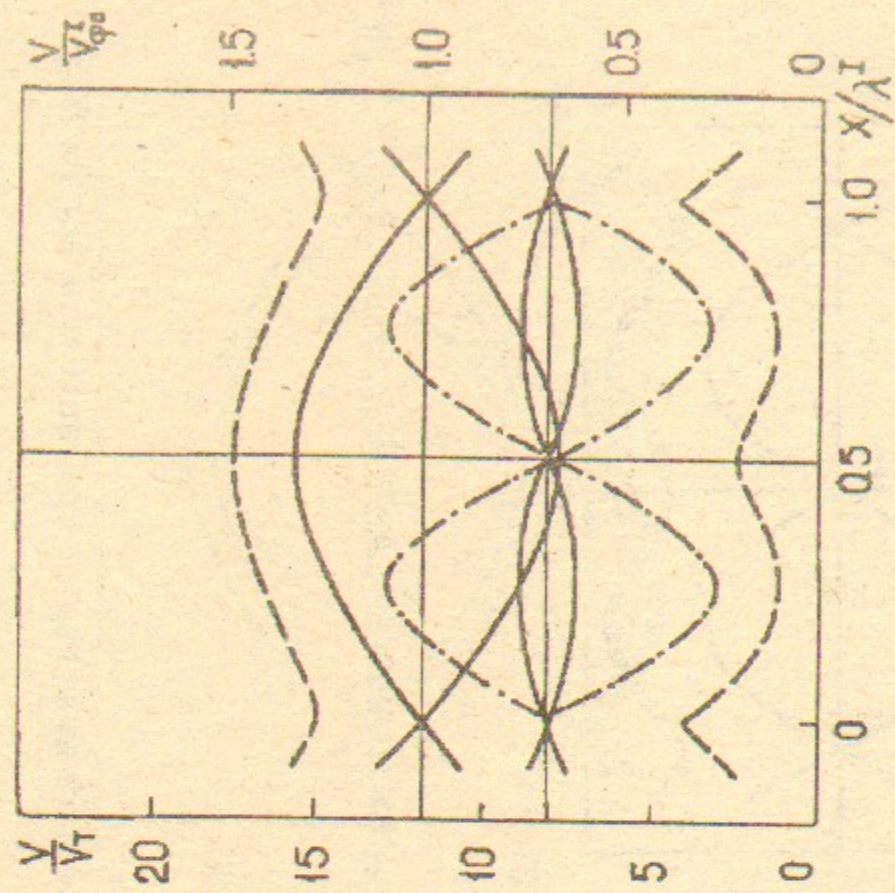


ж

Рис. 22, ж, з. Области захвата волны БГК $N = 1$ и ленгмюровской волны $N = 2$ в $t = 0$ и границы стохастических слоев в $t/T_{oe} \sim 100$. Схема. (Случай 2-3 $t/T_{oe} \sim 40$).

Рис. ж з
Случай 2-2 2-3

Широкий пунктир — границы слоя волны $N = 1$. Мелкий пунктир — границы слоя волны $N = 2$. з — штрих-пунктир — сепаратриса волны $N = 2$ в $t/T_{oe} \sim 40$.



з

Ответственный за выпуск С.Г. Попов
Работа поступила 4 ноября 1993 г.
Сдано в набор 15.11 1993 г.
Подписано в печать 21.12 1993 г.
Формат бумаги 60x90 1/16 Объем 3.6 печ.л., 3.0 уч.-изд.л.
Тираж 290 экз. Бесплатно. Заказ № 98.
Обработано на IBM PC и отпечатано на
ротопринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН,
Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.

Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев

Волна Бернштейна – Грина – Крускала. II.
Взаимодействие с ленгмюровской волной.
Стохастические эффекты