

НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ИНСТИТУТ ЯДЕРНОЙ ФИЗИКИ им. Г.И.Будкера СО РАН

Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин

ВОЛНЫ БГК И МОДУЛЯЦИОННАЯ
НЕУСТОЙЧИВОСТЬ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ
ХОЛОДНОГО ЭЛЕКТРОННОГО ПУЧКА
С ПЛАЗМОЙ. VII

ИЯФ 2002-6

НОВОСИБИРСК
2002

Волны БГК и модуляционная неустойчивость при взаимодействии холодного электронного пучка с плазмой. VII

Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин

Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера, 630090 Новосибирск

Аннотация

Проведены численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию неустойчивости холодного пучка электронов с параметрами $V_o/V_T = 31,8$; $n_b/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-2}$ в одномерной бесстолкновительной плазме с подвижными ионами ($M/m = 10^2$) в системе длиной $L/r_d = 200$. Проведено сравнение случаев с $n_b/n_o = (2,5 - 10) \cdot 10^{-3}$.

Показано, что развитие пучковой неустойчивости приводит к формированию волны БГК и при достаточно большой амплитуде этой волны $E^2/8\pi n_o T \geq 0.2$ к последующему развитию модуляционной неустойчивости. Скорость развития модуляционной неустойчивости растет при увеличении плотности пучка n_b/n_o и амплитуды формирующейся волны БГК. Развитие неустойчивости приводит к коллапсу, затуханию электрического поля и поглощению его энергии электронами плазмы. После сброса части энергии формируется волна БГК с амплитудой меньше пороговой для модуляционной неустойчивости.

Interaction of cold electron beam with plasma.

BGK waves and modulational instability. VII

N.S. Buchelnikova, V.E. Carlin

Abstract

The instability of a cold electron beam ($V_o/V_T = 31,8$; $n_b/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$ and $1 \cdot 10^{-2}$) in one-dimensional collisionless plasma with mobile ions ($M/m = 10^2$) in a system with the length $L/r_d = 200$ was studied in numerical experiments (PIC-method). The cases with $n_b/n_o = (2,5 - 10) \cdot 10^{-3}$ were compared.

It was shown that the evolution of the beam-plasma instability leads to the formation of a BGK-wave. If the amplitude of the wave is high enough ($E^2/8\pi n_o T \geq 0.2$) the modulational instability of the wave becomes essential. The growth rate of the instability increases with increasing of the beam density n_b/n_o and the amplitude of the BGK-wave. The evolution of the modulational instability leads to the collapse and the damping of the electric field due to the absorption of the field energy by the plasma electrons. When a part of the energy is absorbed, the BGK-wave with the amplitude lower than the threshold of the modulational instability is formed.

© *Институт ядерной физики им. Г.И.Будкера СО РАН*

В настоящей работе описаны численные эксперименты (метод частиц в ячейках) по исследованию неустойчивости холодного (монокроматического) пучка электронов большой скорости $V_o \gg V_T$ в одномерной бесстолкновительной плазме с подвижными ионами. Работа является продолжением работ [1-3], и прямым продолжением работы [4], в которой исследовалась неустойчивость пучка со скоростью $V_o/V_T = 31.8$ и плотностью $n_b^o/n_o \sim (2.5 \div 4) \cdot 10^{-3}$ в системе длиной $L/r_d = 200$. В настоящей работе исследуются случаи с большей плотностью пучка $n_b^o/n_o \sim 5 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-2}$. Параметры пучка и системы выбраны так, чтобы сателлитная неустойчивость [5,6] не играла роли [1,4] (кроме случая с $n_b^o/n_o = 1 \cdot 10^{-2}$).

В работах [1-4] показано, что пучковая неустойчивость приводит к развитию основной волны – гармонике с максимальным инкрементом. Параметры пучка и системы выбраны так, чтобы длина волны этой гармонике была кратна длине системы. При $V_o/V_T = 31.8$ длина волны $\lambda/r_d = 200$, так что $L/\lambda = 1$.

В работе [4] показано, что развитие пучковой неустойчивости, захват электронов пучка возбуждающейся волной и ”размешивание” захваченных электронов на фазовой плоскости приводят к формированию волны БГК-типа. Амплитуда этой волны растет с ростом плотности пучка. При малой плотности пучка и соответственно малой амплитуде волна БГК устойчива и имеет квазистационарный характер. При увеличении n_b^o/n_o и амплитуды вол-

на БГК становится неустойчивой относительно модуляционной неустойчивости. Найден порог развития модуляционной неустойчивости по амплитуде волны БГК $-E^2/8\pi n_o T \geq 0.2$.

В настоящей работе рассматриваются случаи с амплитудой волны БГК выше пороговой. Сравнение случаев, рассмотренных в работе [4] и в настоящей работе, показывает, что скорость развития модуляционной неустойчивости растет при увеличении n_b^o/n_o и амплитуды формирующейся волны БГК. Развитие модуляционной неустойчивости приводит к затуханию волны в результате сильной стохастической неустойчивости движения электронов плазмы [7]. Однако полного затухания волны не происходит – после сброса части энергии затухание прекращается или замедляется и формируется квазистационарная или слабо затухающая волна БГК с амплитудой, меньшей порога возбуждения модуляционной неустойчивости.

Численный эксперимент выполняется методом частиц в ячейках. Рассматривается одномерная система длиной $L/r_d = 200$ с периодическими граничными условиями. Для электронов и ионов плазмы задаётся максвелловское распределение с $T_e/T_i = 30$, $M/m = 10^2$, обрезанное на скорости $V \sim \pm 2.8 V_T$ из-за ограниченности числа счетных частиц ($N^e \sim 10^5$ на длине $100r_d$).

Задаётся холодный (монохроматический) пучок со скоростью $V_o/V_T = 31,8$. Для эффективного увеличения числа частиц пучка при сохранении отношения n_b/n_o применяется метод "взвешивания". "Взвешивание" эквивалентно тому, что один электрон дробится на α частиц с массой m/α и зарядом e/α , но с тем же отношением e/m как у электрона, так что движение этих частиц (назовем их b -электронами) не отличается от движения электронов.

Начальные параметры пучка в разных случаях приведены в таблице. Случаи 3-1, 3-2, 3-3 рассмотрены в работе [4], случаи 3-4 и 3-5 – в настоящей работе.

Начальные параметры пучка.

$$\lambda/r_d = 200; V_o/V_T = 31.8; N^e = 2.002 \cdot 10^5; N^{b'} = 2 \cdot 10^4$$

Случай	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
N^b	500	600	800	1000	2000
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.25	0.30	0.40	0.50	1.0
W_b^o/W_e^o	2.594	3.112	4.150	5.187	10.375

L - длина системы; V_o - скорость пучка, N^e , N^b , $N^{b'}$ - число электронов плазмы, электронов пучка и "взвешенных" b-электронов на длине L ; n_b^o , n_o - плотность электронов пучка и плазмы; W_b^o , W_e^o - начальная энергия электронов пучка и тепловая энергия электронов плазмы.

Во всех случаях в начальный момент времени задается затравочная ленгмюровская волна малой амплитуды $E_o/\frac{mr_d}{eT_{oe}^2} = 1$ с длиной волны $\lambda/r_d = 200$, номером гармоники $N = L/\lambda = 1$ и фазовой скоростью $V_\phi/V_T = 32.04$.

Задается 100 пробных частиц ($e = m = 0$, e/m то же, что и у электрона). Прослеживается 18 траекторий пробных частиц на фазовой плоскости. Задаются разные распределения пробных частиц по начальным координатам x_N^o , V_N^o , в частности, равномерное распределение 100 частиц с $V_N^o = 0$ в интервале $x/r_d \sim 0 \div 200$. Фазовые плоскости приводятся для типичного распределения: 20 частиц с $V_N^o = 31.8V_T = V_o$, равномерно распределенные в интервале $x/r_d \sim 40 - 120$; по 40 частиц со скоростями $V_N^o/V_T = 2.84$ (верхняя граница плазмы) и $V_N^o/V_T = -2.84$ (нижняя граница плазмы), равномерно распределенные по x_N^o в интервале $x/r_d \sim 0 - 200$.

Подробности постановки и описания численного эксперимента приведены в работе [1].

Отметим, что в тексте и на рисунках напряженность поля E и амплитуда гармоник E^N нормируется на mr_d/eT_{oe}^2 .

Рассмотрим случай 3-4 и 3-5. В этих случаях задан пучок с $V_o/V_T = 31.8$ и с плотностью $n_b^o/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$ (случай 3-4) или $n_b^o/n_o = 1,0 \cdot 10^{-2}$ (случай 3-5).

Кривые, описывающие случай 3-4, приведены на Рис.1-11, случай 3-5 – на Рис.12-22. Для каждого случая показана зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ (W_e^o – тепловая энергия электронов плазмы) и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$ (Рис.1,12); зависимость от времени амплитуды E^N основной волны $N_e = 1$ и гармоник (Рис.2,3,13,14); зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов \tilde{n}^N (Рис.4,15); зависимость от времени энергии ионов $\Delta W_i = W_i - W_i^o$ (Рис.5,16); фазовые плоскости электронов (Рис.6,17); функции распределения электронов плазмы $f_e(V)$ и пучка (b-электронов) $f_b(V)$ по скорости, нормированные на свой максимум f_{\max} в линейном (Рис.7,18) и логарифмическом (Рис.8,19) масштабе, и на свой f_{\max} или на максимум начальной функции распределения $f_{o\max}$ (Рис.9,20); распределение поля $E(x)$, возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и возмущения плотности электронов пучка (b-электронов) $\tilde{n}_b(x)$ (Рис.10,21); фазовые плоскости ионов (Рис.11,22).

По кривым $W(t)$ (Рис.1,12) и $E^N(t)$ (Рис.2,13) видно, что начальная стадия пучковой неустойчивости в случаях 3-4, 3-5 имеет тот же характер, что и в случаях, рассмотренных в работе [4]. Действительно, по кривым $E^N(t)$ (Рис.2,13) видно, что с самого начала выделяется гармоника $N_e = 1$, имеющая максимальный инкремент. Амплитуда волны $N_e = 1$ проходит через максимум $E = E_{\max}^I$ в $t = t_{\max}^I$, а далее осциллирует с периодом $T/T_{oe} \sim 5-6$, соответствующим периоду оборота захваченных частиц T_B . Анализ этих кривых и фазовых плоскостей электронов показывает, что нелинейная стадия пучковой неустойчивости определяется захватом электронов пучка.

В таблице 1 приведены значения t_{\max}^I , E_{\max}^I , $V_{3\max}^I$ ($V_3 = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}} = 2\sqrt{\frac{eE\lambda}{m2\pi}}$), $T_B = 2\pi/k\sqrt{\frac{e\phi}{m}} = 2\lambda/V_3$, $(E_{\max}^I)^2/8\pi n_o T$, а так же максимальные значения ΔW_b , W_E , ΔW_e в свои $t_{\max} \sim t_{\max}^I$ для случаев 3-1÷3-5. В таблице 1а сравниваются эти величины для случаев с разными $V_o/V_T = 15.9$ и 31.8, рассмотренных в работах [1-3] и настоящей работе.

Таблица 1.

Амплитуда волны и энергии $\Delta W_b, W_E, \Delta W_e$ в первом
максимуме кривой $E^I(t)$ или $W(t)$

Случай	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
V_o/V_T	31.8	31.8	31.8	31.8	31.8
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.25	0.30	0.40	0.50	1.0
W_b^o/W_e^o	2.59	3.11	4.15	5.19	10.37
t_{\max}^I/T_{oe}	9.6	9.3	8.8	8.4	7.4
E_{\max}^I	29.4	33.1	39.7	45.7	70.0
$V_{z\max}^I/V_T$	9.74	10.33	11.32	12.15	15.03
T_B/T_{oe}	6.5	6.2	5.6	5.3	4.2
$(E_{\max}^I)^2/8\pi n_o T$	0.28	0.35	0.50	0.67	1.56
$\Delta W_b/W_e^o$	0.61	0.77	1.12	1.50	3.65
W_E/W_e^o	0.29	0.36	0.52	0.70	1.66
$\Delta W_e/W_e^o$	0.32	0.40	0.59	0.79	1.96
$\Delta W_b/W_b^o$	0.23	0.25	0.27	0.29	0.35
W_E/W_b^o	0.11	0.12	0.13	0.13	0.16
$\Delta W_e/W_b^o$	0.12	0.13	0.14	0.15	0.19
$E_{\text{расч}}^I/E_{\max}^I$	1.000	1.004	1.012	1.021	1.059

W_b^o, W_e^o - начальная энергия электронов пучка и плазмы; E_{\max}^I - максимальная амплитуда волны $N_e = 1$ в $t = t_{\max}^I$; E нормировано на $\frac{m r_d}{e T_{oe}^2}$, $V_z = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}}$; $T_B = 2\pi/k\sqrt{e\phi/m} = 2\lambda/V_z$; $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$ - потери энергии электронов пучка; W_E - энергия электрического поля; $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ - энергия электронов плазмы; $E_{\text{расч}}^I$ - расчет по формуле $E \sim (n_b/n_o)^{2/3}$, принимая за основу случай 3-1.

Из таблиц 1,1а видно, что максимальная амплитуда E_{\max}^I заметно растет при увеличении n_b^o/n_o и при увеличении V_o .

Нелинейная стадия развития пучковой неустойчивости для пучка малой плотности $(n_b^o/n_o)^{1/3} \ll 1$ описывается теорией [8,9], согласно которой фазовая скорость возбуждающейся волны описывается формулой $V_\phi = V_o[1 - (1/2)^{4/3}(n_b^o/n_o)^{1/3}]$, а максимальная амплитуда зависит от скорости и плотности пучка:

$$e\phi_{\max}/m \sim V_o^2(n_b^o/n_o)^{2/3}; eE_{\max}/m \sim V_o(n_b^o/n_o)^{2/3}$$

Таблица 1а.
Амплитуда волны и энергии $\Delta W_b, W_E$ в первом максимуме
кривой $E^I(t)$ или $W(t)$

Случай	2-4 [3]	3-2 [4]	1-1 [1]	3-4	1-2 [2]	3-5
V_o/V_T	15.9	31.8	15.9	31.8	15.9	31.8
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.30	0.30	0.50	0.50	1.0	1.0
W_b^o/W_e^o	0.78	3.11	1.30	5.19	2.59	10.37
λ/r_d	100	200	100	200	100	200
N_e	3*	1	1	1	1	1
t_{\max}^I/T_{oe}	8.0	9.3	7.5	8.4	6.6	7.4
E_{\max}^I	16.2	33.1	22.2	45.7	34.5	70.0
$V_{z\max}^I/V_T$	5.11	10.33	5.98	12.15	7.46	15.03
$(E_{\max}^I)^2/8\pi n_o T$	0.084	0.35	0.16	0.67	0.38	1.56
$\Delta W_b/W_e^o$	0.19	0.77	0.36	1.50	0.89	3.65
W_E/W_e^o	0.10	0.36	0.17	0.70	0.49	1.66
$\Delta W_b/W_b^o$	0.25	0.25	0.28	0.29	0.34	0.35
W_E/W_b^o	0.13	0.13	0.13	0.13	0.19	0.16
$E_{\max}^{(1)}/E_{\max}^{(2)}$	2.04		2.06		2.03	

* В случае 2-4 $L/r_d = 300$, t_{\max}^I , E_{\max}^I , $V_{z\max}^I$ для волны $N_e = 3$.

Пояснения – см таблицу 1.

$E_{\max}^{(1)}/E_{\max}^{(2)}$ - отношение $E_{\max}^{(1)}$ в случае с $V_o/V_T = 31.8$ к случаю с $V_o/V_T = 15.9$.

При увеличении плотности пучка и амплитуды волны становятся существенными эффекты, связанные с нелинейностью движения электронов плазмы. Это приводит, в частности, к различию W_E и ΔW_e (в линейной ленгмюровской волне $W_E = \Delta W_e$). Из таблицы 1 видно, что в случаях 3-1÷3-5 ΔW_e незначительно отличается от W_E , хотя различие и растет с ростом n_b^o/n_o . Это позволяет сравнить зависимость от n_b^o/n_o с найденной в теории [8,9]. В таблице 1 приведено отношение $E_{\text{расч}}^I/E_{\max}^I$, где $E_{\text{расч}}^I = (E_{\max}^I)_o \cdot [(n_b^o/n_o)/2.5 \cdot 10^{-3}]^{2/3}$, а $(E_{\max}^I)_o$ и $n_b^o/n_o = 2,5 \cdot 10^{-3}$ взяты из случая 3-1. Из таблицы 1 видно, что в случаях 3-2÷3-5 отношение $E_{\text{расч}}^I/E_{\max}^I$ близко к единице, так что $(E_{\max}^I) \sim (n_b^o/n_o)^{2/3}$.

Небольшое отличие отношения $E_{\text{расч}}^I/E_{\text{max}}^I$ от единицы растет с ростом n_b^o/n_o и E_{max}^I , что указывает на возрастающую роль нелинейности движения электронов плазмы.

В случаях 3-2 и 2-4[3], 3-4 и 1-1[1] и в случаях 3-5 и 1-2 [2] отношение скоростей пучка равно двум, а n_b^o/n_o одинаково. Сравнение E_{max}^I в случаях с $V_o/V_T = 15.9$ и 31.8 показывает, что их отношение близко к 2 (таблица 1а), так что $E_{\text{max}}^I \sim V_o$.

Таким образом, зависимость E_{max}^I от n_b^o/n_o и V_o близка к теоретической ($E_{\text{max}}^I \sim V_o(n_b^o/n_o)^{2/3}$), хотя и несколько отличается от нее. Количественное согласие численного эксперимента с теорией наблюдалось в случаях, когда $n_b^o/n_o \sim 3 \cdot 10^{-4} \div 2 \cdot 10^{-3}$ при $V_o/V_T = 15.9$ [10,1].

В случаях 3-4 с $n_b^o/n_o \sim 5 \cdot 10^{-3}$ и 3-5 $n_b^o/n_o \sim 1 \cdot 10^{-2}$ дальнейшее развитие пучковой неустойчивости, так же, как в случаях 3-1÷3-3 [4], приводит к формированию волны БГК. Действительно, кривые $W(t)$ (Рис.1,12) и $E^I(t)$ (Рис.2,13) до $t/T_{oe} \sim 140$ в случае 3-4 и до $t/T_{oe} \sim 60$ в случае 3-5 имеют такой же характер, как в случаях 3-1÷3-3 [4]. По кривым $E^I(t)$ видно, что средняя амплитуда волны $N_e = 1$ в этом интервале времени остается практически постоянной. Сходный характер имеют также функции распределения электронов пучка по скорости, на которых выделяется пик, соответствующий сгустку захваченных электронов (Рис.7,18), и распределение плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$, имеющее вид пика (Рис.10,21).

Ранее было показано, что параллельно с пучковой неустойчивостью может развиваться сателлитная неустойчивость, которая приводит к возбуждению гармоник $N = 2, 3 \dots$ с меньшими, чем у основной волны фазовыми скоростями [2,3]. В работе [6] показано, что сателлитная неустойчивость развивается, если амплитуда основной волны достаточно велика, так что параметр $\alpha = V_3^I/(V_\phi^I - V_\phi^N) > 0.8$. В случае 3-4 $\alpha < 0.8$ ($\alpha \sim 0.8$ только в $t = t_{\text{max}}^I$) и сателлитная неустойчивость не развивается. Действи-

тельно, по Рис.2,3 видно, что до $t/T_{oe} \sim 100$ гармоники $N = 2, 3$ не растут и формируется волна БГК $N_e = 1$.

В случае 3-5 амплитуда основной волны $N_e = 1$ заметно больше, чем в случае 3-4 (таблица 1), так что $\alpha > 0.8$ уже в $t < t_{\max}^I$ (в $t = t_{\max}^I$ $\alpha \sim 1.1$). В результате в этом случае развивается спутанная неустойчивость. Действительно, по Рис.13,14 видно, что вслед за волной $N_e = 1$ с небольшим отставанием развивается гармоника $N_e = 2$. По фазовым плоскостям электронов (Рис.17) видно, что гармоника $N_e = 2$ захватывает часть электронов пучка. В результате на фазовой плоскости образуется структура, включающая области захвата основной волны $N_e = 1$ и гармоники $N_e = 2$ с фазовой скоростью $V_{\phi}/V_T \sim 16$. Структуры такого типа изучались в работах [2,3]. Было показано, что в районе областей захвата основной волны и гармоник-спутанов развивается сильная стохастическая неустойчивость движения электронов. При малых амплитудах гармоники-спутанов ее область захвата входит в стохастический слой основной волны. В случае 3-5 амплитуда гармоники $N_e = 2$ заметно меньше амплитуды $N_e = 1$ (Рис.13). Небольшо и число электронов в районе области захвата $N_e = 2$, что видно по функциям распределения $f_b(V)$ (Рис.18,20). Таким образом, в случае 3-5 основную роль в образующейся структуре играет основная волна $N_e = 1$, имеющая характер волны БГК.

В случаях 3-4, 3-5, так же, как в случаях 3-2, 3-3, дальнейшее развитие определяется модуляционной неустойчивостью. В таблице 2 приведены параметры волны БГК $N_e = 1$ в некотором интервале времени перед началом модуляционной неустойчивости в случаях 3-2÷3-5, а также в случае 3-1 [4], в котором формируется устойчивая волна БГК. В таблице 2 приведена фазовая скорость волны БГК V_{ϕ}^I – оценка по положению пика функции распределения $f_b(V)$ ($V_{\phi}^I \sim V_p^{\min} + (V_p^{\max} - V_p^{\min})/2$ [4]); V_{ϕ}^I расч – расчет по формуле $V_{\phi}^I = V_o[1 - (1/2)^{4/3}(n_b^o/n_o)^{1/3}]$ [8,9]; E_{mx}^I – амплитуда волны $N_e = 1$ в максимуме огибающей кривой $E^I(t)$; E_{cp}^I – средняя амплитуда по $E^I(t)$; соответствующие им $V_{3\max}^I$ и $V_{3\text{cp}}^I$ ($V_3 = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}}$) и плотности энергии $(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T$ и $(E_{cp}^I)^2/8\pi n_o T$.

Таблица 2.

Параметры волны БГК $N_e = 1$ перед началом модуляционной неустойчивости

Случай	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.25	0.30	0.40	0.50	1.0
t/T_{oe}	200 – 350	200 – 350	100 – 200	100 – 140	40 – 70
V_p/V_T	29,6-28,6	29,8 – 28,6	31,5 – 28,6	28,6 – 30,6	30,1
V_ϕ^I/V_T	29,1	29,2	30,1	29,6	30,1
$V_{\phi \text{ расч}}^I/V_T$	30,1	30,0	29,8	29,7	29,1
E_{mx}^I	22,0 – 21,0	25,0 – 24,6	31,0 – 30,6	36,0	62,0 – 56,0
$V_{\text{зmx}}^I/V_T$	8,4 – 8,2	9,0 – 8,9	10,0 – 9,9	10,8	14,4 – 13,4
$(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T$	0,15 – 0,14	0,20 – 0,19	0,31 – 0,30	0,41	1,2 – 1,0
$E_{mx}^I/E_{mx \text{ расч}}^I$	1,00	1,01	1,03	1,03	1,12
$E_{\text{ср}}^I$	18,3 – 17,5	20,8 – 19,8	25,6 – 25,0	30,0	47,0
$V_{\text{з ср}}^I/V_T$	7,7-7,5	8,2 – 8,0	9,1 – 9,0	9,8	12,3
$(E_{\text{ср}}^I)^2/8\pi n_o T$	0,11 – 0,10	0,14 – 0,13	0,21 – 0,20	0,29	0,71
$E_{\text{ср}}^I/E_{\text{ср расч}}^I$	1,00	1,00	1,02	1,03	1,02

V_p - максимум функции распределения b-электронов (максимальное и минимальное значение V_p в интервале времени t); $V_\phi^I \sim V_p^{\min} + (V_p^{\max} - V_p^{\min})/2$ - фазовая скорость волны $N_e=1$; $V_{\phi \text{ расч}}^I = V_o [1 - (1/2)^{4/3} (n_b^o/n_o)^{1/3}]$ - расчет по теории [8,9]; $E_{mx}^I, E_{\text{ср}}^I$ - максимальные и средние амплитуды волны $N_e = 1$ в интервале времени t по кривой $E^I(t)$; E нормировано на $\frac{mr_d}{eT_{oe}^2}$; $V_z = 2\sqrt{\frac{e\phi}{m}} = 2\sqrt{\frac{eE\lambda}{m2\pi}}$; $E_{mx \text{ расч}}^I, E_{\text{ср расч}}^I$ - расчет по формуле $E \sim (n_b^o/n_o)^{2/3}$, принимая за основу случай 3-1 (по максимальным значениям).

Из таблицы 2 видно, что оценка фазовой скорости по положению пика $f_b(V)$ близка к расчетной и отличается от нее не более чем на $1V_T$ ($\sim 3\%$), причем фазовые скорости в различных случаях различаются незначительно. Средняя и максимальная по огибающей амплитуда волны растет при увеличении начальной плотности пучка. В таблице 2 приведены отношения $E_{mx}^I/E_{mx \text{ расч}}^I$ и $E_{\text{ср}}^I/E_{\text{ср расч}}^I$, где $E_{mx \text{ расч}}^I = (E_{mx}^I)_o [(n_b^o/n_o)/2,5 \cdot 10^{-3}]^{2/3}$, а $(E_{mx}^I)_o$ и $n_b^o/n_o = 2,5 \cdot 10^{-3}$ взяты из случая 3-1; $E_{\text{ср расч}}^I$ определяется

по такой же формуле с $(E_{\text{cp}}^I)_o$ из случая 3-1 (для расчета взяты максимальные значения $E_{\text{max}}^I, E_{\text{cp}}^I$ в рассматриваемых интервалах времени). Из таблицы 2 видно, что во всех случаях эти отношения близки к единице. Это позволяет утверждать, что средняя и максимальная по огибающей $E^I(t)$ амплитуда формирующейся при пучковой неустойчивости волны БГК зависит от начальной плотности пучка как $(n_b^o/n_o)^{2/3}$, так же, как и E_{max}^I (таблица 1).

Развитие модуляционной неустойчивости начинается в случае 3-4 в $t/T_{oe} > 100$, так же, как в случаях 3-2 и 3-3 [4]. В случае 3-5, где возбуждение гармоник-спутника $N_e = 2$ задает модуляцию поля $E(x)$, развитие начинается раньше – в $t/T_{oe} > 50$. Развитие модуляционной неустойчивости можно видеть по появлению впадин плотности $\tilde{n}(x)$ и модуляции поля $E(x)$ (Рис.10,21), а также по росту амплитуды гармоник плотности $\tilde{n}^N(t)$ (Рис.4,15) и гармоник поля $E^N(t)$ (Рис.3,14). Длины волн и фазовые скорости гармоник поля, развивающихся при модуляционной неустойчивости, приведены в таблице 3.

Таблица 3.
Длины волн и фазовые скорости гармоник

Случай	1	2	3	4	5	6	8	10	20	30
λ^N/r_d	200	100	66.7	50	40	33.3	25	20	10	6.7
V_{ϕ}^N/V_T	32.04	16.09	10.80	8.18	6.63	5.61	4.36	3.64	2.36	2.03

N - номер гармоники; λ^N - длина волны N -й гармоники; V_{ϕ}^N - фазовая скорость ленгмюровской волны с $\lambda = \lambda^N$.

Развитие модуляционной неустойчивости приводит к коллапсу – быстрому росту впадин плотности, концентрации в них электрического поля и, наконец, к затуханию (Рис.10,21).

По фазовым плоскостям электронов (Рис.6,17) видно, что в $t/T_{oe} > 140$ в случае 3-4 и в $t/T_{oe} > 65$ в случае 3-5 появляются ”хвосты” ускоренных электронов. Это показывает, что начинается захват электронов плазмы гармониками модуляционной неустойчивости. Появление ”хвостов” в области $V < 0$ показывает, что

модуляционная неустойчивость сопровождается конверсией основной волны и гармоник на возмущении плотности, которая приводит к генерации более коротковолновых гармоник и обратных волн с номерами $N = N_e \pm \beta N_i$, $\beta = 1, 2, 3, \dots$ [11,12]. Захват и ускорение электронов плазмы гармониками модуляционной неустойчивости и конверсии приводит к затуханию электрического поля.

В таблице 4 для случаев 3-2÷3-5, а также для случая 1-2 [2] приведены моменты времени t_{\max} , когда достигается максимальная концентрация поля; максимальная величина поля $E(x) - E_{\max}$; возмущение плотности \tilde{n}/n_o и плотность на дне впадины $n/n_o = 1 - \tilde{n}/n_o$ в t_{\max} , а также плотность энергии $E_{\max}^2/8\pi n_o T$ и $E_{\max}^2/8\pi n T$, учитывающая изменение плотности во впадине.

Таблица 4.
Максимум $E(x)$ и минимум $n(x)$

Случай	3-2	3-3	3-4	3-5	1-2 [2]
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.30	0.40	0.50	1.0	1.0
V_o/V_T	31.8	31.8	31.8	31.8	15.9
t_{\max}/T_{oe}	378.3	218.2	156.3	72.3	124.9
E_{\max}	63.40	74.77	77.40	105.45	54.31
\tilde{n}/n_o	0.33	0.30	0.36	0.19	0.08
n/n_o	0.67	0.70	0.64	0.81	0.92
$(E_{\max})^2/8\pi n_o T$	1.28	1.78	1.91	3.55	0.94
$(E_{\max})^2/8\pi n T$	1.92	2.55	2.98	4.36	1.02
t_{\min}/T_{oe}	392	230	168	84	160
\tilde{n}_{\min}/n_o	0.53	0.58	0.53	0.48	0.17
n_{\min}/n_o	0.47	0.42	0.47	0.52	0.83

t_{\max} , E_{\max} - момент времени, когда $E(x)$ имеет максимальное значение E_{\max} ; E - нормировано на $\frac{m r_d}{e T_{oe}^2}$; $n/n_o = 1 - \tilde{n}/n_o$; t_{\min} , n_{\min} , \tilde{n}_{\min} - момент времени, когда $n(x)$ имеет минимальное значение n_{\min} , а глубина впадины плотности \tilde{n}_{\min} максимальна.

Из таблицы 4 видно, что t_{\max} быстро уменьшается с ростом n_b^o/n_o и ростом амплитуды волны БГК. Это показывает, что скорость развития модуляционной неустойчивости быстро растет при

увеличении амплитуды волны БГК. Естественно, что возрастает и скорость роста амплитуды гармоник. Это видно из таблицы 5, в которой приведены максимальные амплитуды E_{\max}^N и моменты времени t_{\max}^N , когда амплитуда N-й гармоники E_{\max}^N максимальна.

Из таблицы 5 видно, что t_{\max}^N близки к t_{\max} и так же быстро уменьшаются, как и t_{\max} , при увеличении n_b^o/n_o и амплитуды волны БГК.

Таблица 5.

Амплитуда гармоник в максимуме кривой $E^N(t)$

Случай	3-2	3-3	3-4	3-5	1-2 [2]
t_{\max}/T_{oe}	378.3	218.2	156.3	72.3	124.9
t_{\max}^{II}/T_{oe}	382.8	218.3	157.5	65.9	115.6
E_{\max}^{II}	10.2	11.9	11.9	28.1	19.0
t_{\max}^{III}/T_{oe}	380.5	219.9	158.0	79.4	186.2
E_{\max}^{III}	8.5	10.1	9.4	12.1	8.9
t_{\max}^{IV}/T_{oe}	379.9	215.3	156.9	76.3	
E_{\max}^{IV}	8.9	8.6	11.0	14.1	
t_{\max}^V/T_{oe}	381.1	218.0	160.9	81.9	
E_{\max}^V	5.8	8.6	6.1	18.0	
t_{\max}^{VI}/T_{oe}	380.7	214.8	157.0	83.4	
E_{\max}^{VI}	4.6	7.2	8.9	15.6	
t_{\max}^{VII}/T_{oe}	382.3	216.0	154.1	81.7	
E_{\max}^{VII}	3.6	5.2	6.4	14.7	
t_{\max}^{VIII}/T_{oe}	385.8	220.6	163.0	84.0	
E_{\max}^{VIII}	3.2	4.5	5.3	11.0	

t_{\max}^N - момент максимума кривой $E^N(t)$; E_{\max}^N - максимальная амплитуда N-й гармоники; E нормировано на $\frac{mrd}{eT_{oe}^2}$.

Как было показано ранее [7]; в районе областей захвата гармоник модуляционной неустойчивости и конверсии с фазовыми скоростями $V_{\phi}^N > 0$ и $V_{\phi}^N < 0$ развивается сильная стохастическая неустойчивость движения электронов плазмы. По функциям распределения электронов плазмы в $t/T_{oe} > 140$ в случае 3-4 и в $t/T_{oe} > 65$ в случае 3-5 (Рис.8,19) видно, что так же, как в случаях 3-2 и 3-3 [4], эта неустойчивость приводит к ускорению заметного числа

электронов. В результате ускорения энергия электрического поля поглощается электронами плазмы и поле затухает (Рис.1,12), причем затухает и основная волна и гармоники (Рис.2,3,13,14).

По кривым $\tilde{n}(x)$ (Рис.10,21) видно, что на стадии затухания поля впадины плотности еще некоторое время продолжают расти и достигают максимальной глубины n_{\min} в $t = t_{\min}$ (при этом возмущение плотности $\tilde{n}_{\min}/n_o = (n_{\min} - n_o)/n_o$ максимально). В таблице 4 приведены значения для t_{\min} , \tilde{n}_{\min}/n_o , n_{\min}/n_o для случаев 3-2÷3-5 и 1-2 [2].

По фазовым плоскостям ионов (Рис.11,22) видно, что в $t/T_{oe} > 140$ в случае 3-4 и в $t/T_{oe} > 60$ в случае 3-5 появляется характерное для модуляционной неустойчивости возмущение скорости ионов. В это же время начинает быстро расти энергия ионов (Рис.5,16). После затухания поля в $t > t_{\min}$ впадины плотности схлопываются и развивается ионная турбулентность с широким спектром ионно-звуковых волн. По фазовым плоскостям ионов видно, что при этом происходит захват и ускорение ионов этими волнами и развивается стохастическая неустойчивость движения ионов. В таблице 6 для случаев 3-2÷3-5 приведены максимальные значения энергии ионов $\Delta W_{i \max}$, которые достигаются в $t = t_{i \max}$.

Таблица 6. Энергия ионов

Случай	3-2	3-3	3-4	3-5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.30	0.40	0.50	1.0
$W_i^o/W_e^o \cdot 10^{-2}$	3.342	3.346	3.349	3.366
$t_{i \max}/T_{oe}$	410	250	180	94
$\Delta W_{i \max}/W_e^o \cdot 10^{-2}$	1.12	1.80	1.99	10.79
$\Delta W_{i \max}/W_b^o \cdot 10^{-3}$	3.59	4.35	3.84	10.40
$\Delta W_{i \max}/W_i^o$	0.33	0.54	0.59	3.20
t/T_{oe}	500	500	200	200
$\Delta W_i/W_e^o \cdot 10^{-2}$	0.70	1.80	1.48	6.06
$\Delta W_i/W_b^o \cdot 10^{-3}$	2.26	4.34	2.85	5.84
$\Delta W_i/W_i^o$	0.21	0.54	0.44	1.80

W_i^o , W_e^o , W_b^o - начальная энергия ионов и электронов плазмы и пучка;
 $\Delta W_i = -(W_i - W_i^o)$; $\Delta W_{i \max}$ - максимальное значение $\Delta W_i(t)$ в $t = t_{i \max}$.

Из таблицы 6 видно, что в рассматриваемых случаях энергия, поглощенная ионами, невелика: в случаях 3-2÷3-4 $\Delta W_{i \max}$ меньше начальной энергии ионов $\Delta W_{i \max} \sim (0.33 - 0.59)W_i^o \sim (3.6 - 4.4) \cdot 10^{-3}W_b^o$ и только в случае 3-5 $\Delta W_{i \max} \sim 0.32W_i^o \sim 1 \cdot 10^{-2}W_b^o$.

Развитие сильной стохастической неустойчивости движения электронов плазмы приводит к быстрому затуханию поля. Однако, полного затухания поля не происходит. По кривым $E^I(t)$ (Рис.2,13) видно, что после основного затухания средняя амплитуда волны $N_e = 1$ устанавливается на некотором постоянном уровне или очень медленно затухает. Это показывает, что устанавливается квазистационарная волна.

Волна имеет характер волны БГК. Действительно по функциям распределения b-электронов $f_b(V)$ (Рис.7,18) видно, что и после затухания в $t > t_{\min}$ на функциях $f_b(V)$ сохраняется пик, свидетельствующий о сохранении сгустка захваченных частиц. Это подтверждают и кривые $\tilde{n}_b(x)$ (Рис.10,21), показывающие, что распределение плотности b-электронов сохраняет вид пика, хотя максимальная плотность в пике \tilde{n}_{bm} уменьшается. Значения \tilde{n}_{bm}/n_b^o в $t = t_{\max}, t_{\min}$ и после затухания приведены в таблице 7. Отметим, что форма пика $\tilde{n}_b(x)$ и максимальная плотность \tilde{n}_{bm} меняются в течение T_B [1]. В настоящей работе $\tilde{n}_b(x)$ брались в случайные относительно T_B моменты времени.

Из таблицы 7 видно, что изменение пика происходит в $t > t_{\max}$.

Положение пика функции распределения $f_b(V)$ в разные моменты времени показывает, что в случаях 3-4 и 3-5, так же, как в случаях 3-2 и 3-3 [4], фазовая скорость волны БГК уменьшается по сравнению с начальной из-за перестройки волны в сильно неоднородной по плотности плазме. Этот эффект наблюдался ранее [13].

Таблица 7.
Максимум $n_b(x)$ в разные моменты времени

Случай	3-2	3-3	3-4	3-5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.30	0.40	0.50	1.0
t_{\max}/T_{oe}	378.3	218.2	156.3	72.3
\tilde{n}_{bm}/n_b^o	3.87	4.06	5.14	4.11
t_{\min}/T_{oe}	392	230	168	84
\tilde{n}_{bm}/n_b^o	2.39	2.20	2.92	2.33
t/T_{oe}	500	500	200	200
\tilde{n}_{bm}/n_b^o	1.57	1.17	1.67	0.81

n_b^o - начальная плотность электронов пучка; $\tilde{n}_{bm} = n_{bm} - n_b^o$ - максимальное возмущение плотности электронов пучка в t_{\max} , когда $E(x)$ имеет максимальное значение, в t_{\min} , когда $n(x)$ имеет минимальное значение, и после основного затухания.

Параметры волны БГК $N_e = 1$ - фазовая скорость (оценка по положению пика $f_b(V)$), средняя амплитуда E_{cp}^I и максимальная по огибающей $E^I(t)$ амплитуда E_{mx}^I в $t \gg t_{\min}$ приведены в таблице 8 для случаев 3-2÷3-5, а также для случая 3-1 [4] без модуляционной неустойчивости.

Таблица 8.
Параметры волны БГК $N_e = 1$ после основного затухания

Случай	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.25	0.30	0.40	0.50	1.0
t/T_{oe}	400 - 500	450 - 500	400 - 500	180 - 200	150 - 200
V_p/V_T	28.2-30.6	24.8	23.9	24,4	21.0
V_ϕ^I/V_T	29.4	24.8	23.9	24.4	21.0
E_{mx}^I	20.5 - 20,0	6 - 5	5	9	7 - 6
V_{zmx}^I/V_T	8.2-8.0	4.4 - 4.0	4.0	5.4	4.8 - 4.4
$(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T \cdot 10^{-2}$	13.4 - 12.8	1.2 - 0.8	0.8	2.6	1.6 - 1.2
E_{cp}^I	17.4	4	4	6	4
V_{zcp}^I/V_T	7.5	3.6	3.6	4.4	3.6
$(E_{cp}^I)^2/8\pi n_o T \cdot 10^{-2}$	9.7	0.5	0.5	1.2	0.5

Пояснения - см таблицу 2.

В работе [4] было найдено условие устойчивости волны БГК ($\lambda/r_d = 200$) относительно модуляционной неустойчивости по $E_{\text{ср}}^I$ ($(E_{\text{ср}}^I)^2/8\pi n_o T \leq 0.11$ и по E_{mx}^I ($(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T \leq 0.15$). Из таблицы 8 видно, что в случаях 3-2÷3-5 ($(E_{\text{ср}}^I)^2/8\pi n_o T \sim (0.5 - 1.2) \cdot 10^{-2} \ll 0.11$; (E_{mx}^I)²/8πn_oT ~ (0.8 – 2.6) · 10⁻² << 0.15

Таким образом, после модуляционной неустойчивости, коллапса, затухания и поглощения значительной части энергии электронами плазмы устанавливается волна БГК с параметрами, удовлетворяющими условию устойчивости. Такая волна устанавливается как в случаях 3-2, 3-3 [4], в которых амплитуды начальной волны БГК незначительно отличаются от пороговой, так и в случаях 3-4, 3-5, в которых это отличие велико (таблица 2).

Отметим, что волна БГК устанавливается и в случае 3-5, в котором заметную роль играет сателлитная неустойчивость. Действительно, по функциям распределения (Рис.20) видно, что после всех событий основная часть в-электронов по-прежнему находится в области захвата основной волны $N_e = 1$ – в области скоростей $(V_{\Phi}^I \pm V_{3mx}^I) \sim (16 - 26)V_T$. Электроны со скоростями $V < (V_{\Phi}^I - V_{3mx}^I)$ попадают в стохастическую область, включающую область захвата гармоник-сателлитов $N_e = 2$ и 3. Из Рис.20 видно, что число электронов в этой области невелико.

Квазистационарный характер имеет не только волна $N_e = 1$. По кривым $E^N(t)$ (Рис.3,14) видно, что в случаях 3-4 и 3-5, так же, как в случаях 3-2 и 3-3 [4], после затухания амплитуды гармоник выходят на некоторый постоянный в среднем уровень. Ранее было показано, что это свидетельствует о формировании в плазме квазистационарных областей стохастического движения на фазовой плоскости [14]. В таблице 9 для случаев 3-2÷3-5 приведены средние амплитуды $E_{\text{ср}}^N$ и максимальные по огибающей $E^N(t)$ амплитуды E_{mx}^N гармоник $N = 2 \div 5$ в $t \gg t_{\text{min}}$.

Таблица 9.

Средние и максимальные амплитуды гармоник после
основного затухания поля

Случай	3 – 2	3 – 3	3 – 4	3 – 5	1 – 2[2]
t/T_{oe}	450 – 500	400 – 500	180 – 200	150 – 200	450 – 600
E_{cp}^{II}	1	1.2	2	2.8	2.5
E_{mx}^{II}	2.5	2.7	4.4	6.8	7.0
E_{cp}^{III}	1	0.5	1.5	1.7	1.0
E_{mx}^{III}	2	1.4	4	4.5	3.0
E_{cp}^{IV}	0.7	0.4	1	1	
E_{mx}^{IV}	2	1.2	2.5	2.7	
E_{cp}^V	0.5	0.4	1	1	
E_{mx}^V	1.2	1.2	2.2	3.2	

E_{cp}^N, E_{mx}^N - средняя и максимальная амплитуда N-й гармоники в интервале времени t ; E нормировано на $\frac{mra}{eT_{oe}^2}$.

По распределению пробных частиц с $V_N^o/V_T = \pm 2.84$ на фазовой плоскости в разные моменты времени (Рис.6,17) видно, что в случаях 3-4 и 3-5, так же, как в случаях 3-2 и 3-3[4], формируются области стохастического движения электронов плазмы в области скоростей $V > 0$ и $V < 0$. Границы стохастических областей можно оценить по максимальным и минимальным скоростям электронов плазмы и пробных частиц с $V_N^o/V_T = 2.84; -2.84$, а также $V_N^o = 0$.

В таблице 10 приведены максимальные и минимальные скорости электронов плазмы, а также максимальные и минимальные скорости электронов пучка и ионов.

Из таблицы 10 видно, что во всех случаях, кроме случая 3-5, $V_{max}^e < V_{min}^b$, т.е. электроны пучка не попадают в стохастическую область $V > 0$. В случае 3-5 некоторое число электронов пучка попадает в эту область (это видно по функциям распределения $f_b(V)$ Рис.19,20) и участвуют в стохастическом движении.

Сравнивая V_{max}^e, V_{min}^e (таблица 10) с фазовыми скоростями гармоник V_{ϕ}^N (таблица 3) можно оценить предельные номера гармоник, участвующих в формировании стохастических областей.

Действительно, для захваченных N -й гармоникой с $V_{\Phi}^N > 0$ частиц $V_{\max}^e > V_{\Phi}^N$, для захваченных обратной волной-гармоникой с $V_{\Phi}^N < 0$ частиц $|V_{\min}^e| > |V_{\Phi}^N|$. Сравнение V_{\max}^e , V_{\min}^e с V_{Φ}^N показывает, что стохастические области формируются в районе областей захвата гармоник $N \geq |\pm 4|$ в случаях 3-2 и 3-3, $N \geq 3$, $N \geq |-4|$ в случае 3-4 и $N \geq |\pm 3|$ в случае 3-5 (знаком "-" обозначены обратные волны).

Таблица 10.

Максимальные и минимальные скорости электронов пучка и плазмы и ионов.

Случай	3 - 1	3 - 2	3 - 3	3 - 4	3 - 5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.25	0.30	0.40	0.50	1.0
t/T_{oe}	500	500	500	200	200
V_{\max}^b/V_T	40.98	41.12	41.38	41.92	45.61
V_{\min}^b/V_T	20.27	19.99	17.71	16.18	-1.59(1.75)
V_{\max}^e/V_T	4.06	10.22	11.02	13.05	14.27
V_{\min}^e/V_T	-3.68	-11.16	-10.92	-10.61	-13.74
V_{\max}^i/V_T	0.10	0.20	0.22	0.18	0.30
V_{\min}^i/V_T	-0.11	-0.18	-0.22	-0.17	-0.30
V_{\max}^i/V_T^i	5.42	11.00	12.01	10.10	16.17
V_{\min}^i/V_T^i	-5.79	-10.07	-11.86	-9.17	-16.14

V_{\max}^b , V_{\min}^b - максимальная и минимальная скорость электронов пучка;
 V_{\max}^e , V_{\min}^e - максимальная и минимальная скорость электронов плазмы;
 V_{\max}^i , V_{\min}^i - максимальная и минимальная скорость ионов; V_T , V_T^i - тепловая скорость электронов плазмы и ионов; $V_T/V_T^i = 54.783$.

Границы стохастических областей $V > 0$, $V < 0$, а также i -области (область стохастического движения пробных частиц с $V_N^o = 0$) приведены в таблице 11 для случаев 3 - 2 ÷ 3 - 5. В таблицах 10,11 включен также случай 3-1[4] с квазистационарной волной БГК. В этом случае максимальные и минимальные скорости электронов плазмы и пробных частиц определяются регулярным возмущением скорости полем волны.

Таблица 11.

Границы и ширина стохастических областей в плазме

Случай	3 – 1	3 – 2	3 – 3	3 – 4	3 – 5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.25	0.30	0.40	0.50	1.0
t/T_{oe}	500	500	500	200	200
Границы Область $V > 0$. $V_N^o/V_T = 2.84$					
Верхняя					
V_N^{\max}/V_T	3.84	9.22	8.79	9.30	9.50
V_{\max}^e/V_T	4.06	10.22	11.02	13.05	14.27
Нижняя					
V_N^{\min}/V_T	1.39	1.45	0.71	1.15	-3.05
Ширина области					
$\delta V_N/V_T$	2.45	7.77	8.08	8.15	12.55
$\delta V_e/V_T$	2.67	8.77	10.31	11.90	17.32
i-область $V_N^o = 0$					
Верхняя					
V_N^{\max}/V_T	1.80	2.41	2.52	1.66	2.94
Нижняя					
V_N^{\min}/V_T	-1.82	-2.22	-1.63	-1.46	-2.97
Ширина области					
$\delta V_N/V_T$	3.62	4.63	4.15	3.12	5.91
Область $V < 0$. $V_N^o/V_T = -2.84$					
Верхняя					
V_N^{\max}/V_T	-1.06	-1.09	-1.59	-1.61	1.30
Нижняя					
V_N^{\min}/V_T	-4.27	-8.01	-8.04	-10.07	-12.49
V_{\min}^e/V_T	-3.68	-11.16	-10.92	-10.61	-13.74
Ширина области					
$\delta V_N/V_T$	3.21	6.92	6.45	8.46	13.79
$\delta V_e/V_T$	2.62	10.07	9.33	9.00	15.04

V_N^o - начальная скорость пробных частиц; V_N^{\max} , V_N^{\min} - максимальная и минимальная скорость пробных частиц; V_{\max}^e , V_{\min}^e - максимальная и минимальная скорость электронов плазмы; $\delta V_N = (V_N^{\max} - V_N^{\min})$ - ширина области по пробным частицам; $\delta V_e = (V_{\max}^e - V_{\min}^e)$ или $(V_N^{\max} - V_{\min}^e)$ - ширина области по пробным частицам и электронам.

Из таблицы 11 видно, что области стохастического движения $V > 0$ и $V < 0$ в случаях 3-2 ÷ 3-4 не пересекаются между собой, но немного пересекаются с i -областью. В случае 3-5 области $V > 0$ и $V < 0$ пересекаются и с i -областью и между собой.

По кривым Рис.1,12 видно, что после основного затухания потери энергии пучка и энергия электронов плазмы в случаях 3-4 и 3-5, так же, как в случаях 3-2 и 3-3 [4], продолжают медленно расти, хотя устанавливается квазистационарная волна БГК $N_e = 1$ и квазистационарные области стохастического движения. При этом $\Delta W_e \sim \Delta W_b$. В работе [14] сделан вывод, что амплитуда волны БГК поддерживается постоянной за счет притока энергии от продолжающегося "размешивания" и замедления b -электронов и потерь энергии на конверсию, а амплитуда гармоник в стохастических областях поддерживается за счет притока энергии от конверсии и потерь энергии на затухание при "размешивании" и ускорении электронов плазмы, что приводит к росту ΔW_e . В результате энергия, потерянная пучком, практически полностью поглощается электронами плазмы. Такой же механизм возможен и в рассматриваемых случаях, поскольку возмущения плотности и в $t \gg t_{\min}$ остаются достаточно большими (Рис.10,21), так что конверсия заведомо должна играть роль.

Энергии ΔW_b , W_E , ΔW_e в случаях 3-1 ÷ 3-3 в $t/T_{oe} = 500$ и в случаях 3-4 и 3-5 в $t/T_{oe} = 200$ приведены в таблице 12.

По функциям распределения электронов плазмы в случаях 3-2 ÷ 3-5 видно, что энергия поглощается "короткими" хвостами, а температура основной массы электронов практически не меняется. Действительно, максимальная скорость электронов плазмы в случаях 3-2 ÷ 3-5 $V_{\max}^e/V_T \sim 10 - 14$ (таблица 10) заметно меньше фазовой скорости основной волны $N_e = 1$ $V_{\Phi}^I/V_T \sim 25 - 21$ (таблица 8) и гармоники $N_e = 2$ $V_{\Phi}^{II}/V_T \sim 16$. Функции распределения $f_e(V)$ в случаях 3-2 ÷ 3-4 мало отличаются от начальной функции распределения до $V/V_T \sim \pm 2.5$ [4] и (Рис.9). В случае 3-5 различие $f_e(V)$ и $f_o(V)$ становится существенным, однако, заметного нагре-

ва (уширения $f_e(V)/f_{\max}$ по сравнению с $f_o(V)/f_{o\max}$) нет и в этом случае (Рис.20).

Таблица 12. Энергии $\Delta W_b, W_E, \Delta W_e$

Случай	3-1	3-2	3-3	3-4	3-5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.25	0.30	0.40	0.50	1.0
W_b^o/W_e^o	2.59	3.11	4.15	5.18	10.37
t/T_{oe}	500	500	500	200	200
$\Delta W_b/W_e^o$	0.26	0.75	1.14	1.37	3.80
W_E/W_e^o	0.096	0.007	0.009	0.011	0.029
$\Delta W_e/W_e^o$	0.16	0.74	1.13	1.36	3.74
$\Delta W_b/W_b^o$	0.10	0.24	0.27	0.26	0.37
W_E/W_b^o	0.04	0.002	0.002	0.002	0.003
$\Delta W_e/W_b^o$	0.06	0.24	0.27	0.26	0.36

Пояснения - см таблицу 1.

Сравним случаи 1-1 [1] и 3-4 с одинаковой плотностью пучка $n_b^o/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$ и разной скоростью $V_o/V_T = 15.9$ (случай 1-1) и 31,8 (случай 3-4).

В обоих случаях начальная стадия пучковой неустойчивости имеет одинаковый характер. Развитие неустойчивости приводит к формированию волны БГК. Параметры формирующейся к $t/T_{oe} \sim 100 - 140$ волны БГК в случаях 1-1 и 3-4 приведены в таблице 13.

Из таблицы 13 видно, что амплитуды E_{mx}^I, E_{cp}^I , а также V_{zmx}^I, V_{zcp}^I в случае 3-4 примерно в 2 раза больше, чем в случае 1-1, т.е. эти величины пропорциональны V_o , а плотность энергии $E^2/8\pi n_o T$ пропорциональна V_o^2 . Сравнение плотности энергии в случаях 1-1 и 3-4 с пороговой для модуляционной неустойчивости $E_{cp}^2/8\pi n_o T \geq 0.14, E_{mx}^2/8\pi n_o T \geq 0.20$ [4] показывает, что в случае 1-1 условие неустойчивости не выполнено, в случае 3-4 - выполнено. В результате дальнейшее развитие в этих случаях совершенно различно. В случае 1-1 волна БГК имеет квазистационарный характер и сохраняет свои параметры, немного затухая из-за конверсии на паразитных

шумах [1] (таблица 13). В случае 3-4 развивается модуляционная неустойчивость и коллапс. После сброса части энергии в результате затухания устанавливается волна БГК с новыми параметрами, удовлетворяющими условию устойчивости [4] (таблица 13).

Таблица 13.
Параметры волны БГК $N_e = 1$

Случай	1-1 [1]	3-4	1-2 [2]	3-5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.5	0.5	1.0	1.0
V_o/V_T	15.9	31.8	15.9	31.8
λ/r_d	100	200	100	200

t/T_{oe}	100 – 170	100 – 140	40 – 100	40 – 70
V_ϕ^I/V_T	14.6	29.6	15.0	30.1
E_{mx}^I	18.0 – 17.4	36.0	29.0 – 27.5	62.0 – 56.0
$V_{эмх}^I/V_T$	5.4-5.3	10.8	6.8 – 6.7	14.1 – 13.4
$(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T$	0.10	0.41	0.27 – 0.24	1.2 – 1.0
$E_{ср}^I$	14.5 – 14.4	30.0	23.0 – 22.5	47.0
$V_{э ср}^I/V_T$	4.8	9.8	6.1 – 6.0	12.3
$(E_{ср}^I)^2/8\pi n_o T$	0.07	0.29	0.17 – 0.16	0.71

t/T_{oe}	200 – 600	180 – 200	500 – 600	150 – 200
V_ϕ^I/V_T	14.6	24.4	14.4	21.0
E_{mx}^I	16.5 – 15	9	23.5 – 20.0	7 – 6
$V_{эмх}^I/V_T$	5.2-4.9	5.4	6.2 – 5.7	4.8 – 4.4
$(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T \cdot 10^{-2}$	8.7 – 7.2	2.6	18 – 13	1.6 – 1.2
$E_{ср}^I$	14.2 – 13.5	6	15.3 – 12.8	4
$V_{э ср}^I/V_T$	4.8-4.7	4.4	5.0 – 4.5	3.6
$(E_{ср}^I)^2/8\pi n_o T \cdot 10^{-2}$	6.4 – 5.8	1.2	7.5 – 5.2	0.5

Пояснения - см таблицу 2.

Сравним случаи 1-2 [2] и 3-5 с одинаковой плотностью пучка $n_b^o/n_o = 1 \cdot 10^{-2}$ и разной скоростью $V_o/V_T = 15.9$ (случай 1-2) и 31,8 (случай 3-5).

В обоих случаях начальная стадия пучковой неустойчивости имеет одинаковый характер. Развитие неустойчивости приводит к

формированию волны БГК. Параметры формирующейся к $t/T_{oe} \sim 40 - 170$ волны БГК в случаях 1-2 и 3-5 приведены в таблице 13. Из таблицы 13 видно, что амплитуда E_{mx}^I, E_{cp}^I , а также V_{3mx}^I, V_{3cp}^I в случае 3-5 примерно в 2 раза больше, чем в случае 1-2, т.е. эти величины пропорциональны V_o , а плотность энергии пропорциональна V_o^2 . Сравнение плотности энергии с пороговой для модуляционной неустойчивости показывает, что условие неустойчивости выполняется в обоих случаях, хотя в случае 1-2 отличие от пороговой невелико. Действительно, в обоих случаях развивается модуляционная неустойчивость.

В случаях 1-2 и 3-5 развитие пучковой неустойчивости сопровождается сателлитной неустойчивостью, которая приводит к возбуждению гармоники $N_e = 2$. Гармоника-сателлит $N_e = 2$ развивается одновременно с формированием волны БГК $N_e = 1$ и достигает максимального значения в $t/T_{oe} \sim 66$ в случае 3-5 и в $t/T_{oe} \sim 116$ в случае 1-2 (таблица 5).

Возбуждение гармоники $N_e = 2$ приводит к модуляции поля $E(x)$ основной волны, что служит затравкой модуляционной неустойчивости. В результате модуляционная неустойчивость начинает развиваться раньше, чем в случае без сателлитной неустойчивости. Из-за большей амплитуды формирующейся волны БГК $N_e = 1$ и большей скорости роста гармоники $N_e = 2$ в случае 3-5 скорость развития модуляционной неустойчивости и коллапса заметно больше, чем в случае 1-2. Действительно максимальная плотность энергии в случае 3-5 достигается в $t_{max}/T_{oe} \sim 72$, а в случае 1-2 - в $t_{max}/T_{oe} \sim 125$ (таблица 4).

После коллапса и сброса части энергии в результате затухания в обоих случаях устанавливается волна БГК с параметрами, удовлетворяющими условию устойчивости. При этом отличие параметров волны БГК от начальных в случае 1-2 не очень велико, а в случае 3-5 значительно (таблица 13). Таким образом, чем больше отличие начальной амплитуды волны от пороговой, тем больше отличие параметров конечной волны БГК от начальных. Этот вывод подтверждается и сравнением амплитуд начальной и конечной волны БГК в случаях 3 - 2 ÷ 3 - 5 (таблицы 2 и 8).

Следует отметить, что в случаях 1-2 и 3-5 при развитии сателлитной неустойчивости на фазовой плоскости формируется структура, включающая области захвата основной волны $N_e = 1$ и гармоник сателлитов $N_e = 2, 3$. Характер этой структуры и ее эволюция в случае 1-2 исследовались в работе [2]. Было показано, что основная волна $N_e = 1$ содержит ядро захваченных частиц, окруженное на фазовой плоскости стохастическим слоем. В районе областей захвата гармоник-сателлитов и стохастического слоя основной волны развивается сильная стохастическая неустойчивость движения электронов, что приводит к образованию общей области стохастического движения. Можно полагать, что такой же характер имеет и структура, формирующаяся в случае 3-5.

Сателлитная неустойчивость может значительно изменить характер развития пучковой неустойчивости. Действительно, возбуждение гармоник-сателлитов приводит к модуляции поля $E(x)$ основной волны, а модуляция поля служит затравкой модуляционной неустойчивости, облегчает ее развитие и приводит к изменению ее порога.

Роль сателлитной неустойчивости исследовалась в работах [1-3]. Было показано, что сателлитная неустойчивость развивается на нелинейной стадии пучковой неустойчивости и приводит к возбуждению гармоник с меньшими, чем у основной волны фазовыми скоростями. Основным механизмом возбуждения гармоник-сателлитов связан с захватом и замедлением части электронов пучка, в результате чего растут потери энергии пучка и энергия передается в поле гармоник.

В работе [3] исследовалась неустойчивость пучка с $V_o/V_T = 15.9$; $n_b^o/n_o \sim (0.5 - 5) \cdot 10^{-3}$ в системе длиной $L/r_d = 300$. Было найдено, что во всех случаях развивается основная волна $N_e = 3$ с $\lambda/r_d = 100$ и гармоника-сателлит $N_e = 4$, а в некоторых случаях и $N_e = 5, 6, \dots$. В таблице 14 для случаев 2 - 2 ÷ 2 - 5 [3] приведены $t_{\max}^{(3)}$, $E_{\max}^{(3)}$ для основной волны $N_e = 3$, аналогичные $t_{\max}^{(I)}$, $E_{\max}^{(I)}$ в таблице 1. В таблице 14 приведены также значения

параметра $\alpha = (V_{\text{з max}}^{(3)} + V_{\text{з}}^{(4)}) / (V_{\text{ф}}^{(3)} - V_{\text{ф}}^{(4)})$, где $V_{\text{з}}^{(4)} = 2\sqrt{\frac{\epsilon E_{\text{o}}^{(4)} \lambda^{(4)}}{m 2\pi}}$, $E_{\text{o}}^{(4)} = 0.7$ – амплитуда затравочной волны $N_e = 4$; $\lambda^{(4)}/r_d = 75$; $V_{\text{ф}}^{(4)}/V_T = 12.1$. Ранее было показано, что сателлитная неустойчивость развивается если $\alpha > 0.8$ [6]. Из таблицы 14 видно, что в случаях $2 - 2 \div 2 - 5$ это условие выполнено в $t \leq t_{\text{max}}$.

В работе [3] показано, что во всех случаях, кроме случая 2-2, развитие пучковой и сателлитной неустойчивости приводит к модуляционной неустойчивости. В таблице 14 приведены t_{max} , E_{max} , t_{min} , $\tilde{n}_{\text{min}}/n_o$, характеризующие развитие модуляционной неустойчивости в случаях $2 - 3 \div 2 - 5$.

Таблица 14.

Случаи $2 - 2 \div 2 - 5$ из работы [3]. $L/r_d = 300$; $V_o/V_T = 15.9$;
 $\lambda/r_d = 100$; $N_e = 3$

Случай	2 – 2	2 – 3	2 – 4	2 – 5
$n_b^o/n_o \cdot 10^{-2}$	0.05	0.10	0.30	0.50
W_b^o/W_e^o	0.13	0.26	0.78	1.30
$t_{\text{max}}^{(3)}/T_{oe}$	11.0	9.0	8.0	7.4
$E_{\text{max}}^{(3)}$	5.3	8.3	16.2	22.3
$V_{\text{з max}}^{(3)}/V_T$	2.92	3.66	5.11	5.99
$(E_{\text{max}}^{(3)})^2/8\pi n_o T \cdot 10^{-2}$	0.90	2.20	8.38	15.9
α	0.97	1.15	1.52	1.74

t_{max}/T_{oe}		361.9	~ 120.0	75.1
E_{max}		36.28		75.88
$(E_{\text{max}})^2/8\pi n_o T$		0.42		1.84
t_{min}/T_{oe}		394	~ 140	88
$\tilde{n}_{\text{min}}/n_o$		0.22		0.58
n_{min}/n_o		0.78		0.42

Пояснения - см. таблицы 1 и 4. λ - длина волны основной волны $N_e = 3$; $t_{\text{max}}^{(3)}$, $E_{\text{max}}^{(3)}$, $V_{\text{з max}}^{(3)}$ - аналог $t_{\text{max}}^{(1)}$, $E_{\text{max}}^{(1)}$, $V_{\text{з max}}^{(1)}$ в таблице 1. $\alpha = (V_{\text{з max}}^{(3)} + V_{\text{з}}^{(4)}) / (V_{\text{ф}}^{(3)} - V_{\text{ф}}^{(4)})$, где $V_{\text{з}} = 2\sqrt{\frac{\epsilon E_{\text{o}}^{(4)} \lambda^{(4)}}{m 2\pi}}$, $E_{\text{o}}^{(4)} = 0.7$ - амплитуда затравочной волны $N_e = 4$, $\lambda^{(4)}/r_d = 75$; $V_{\text{ф}}^{(4)}/V_T = 12.1$.

В случае 2-2 модуляционная неустойчивость не развивается и развитие пучковой и сателлитной неустойчивости приводит к образованию квазистационарной структуры БГК типа. Основой этой структуры является волна $N_e = 3$, содержащая ядро захваченных частиц, а области захвата гармоник сателлитов входят в стохастический слой основной волны [3]. Отметим, что случай 2-2 является пограничным для сателлитной неустойчивости. Действительно, в случае 2-1 с теми же параметрами, но без затравочной волны $N_e = 4$ ($\alpha = 0.73 < 0.8$), сателлитная неустойчивость не развивается и развитие пучковой неустойчивости приводит к формированию квазистационарной волны БГК [3].

Рассмотрим влияние сателлитной неустойчивости на изменение порога модуляционной неустойчивости. Изменение порога в случаях с сателлитной неустойчивостью и без нее наглядно показывает сравнение случаев 1-1[1] и 2-5[3]. В этих случаях параметры пучка одинаковы $-V_o/V_T = 15.9$; $n_b^o/n_o = 5 \cdot 10^{-3}$, но длина системы в случае 1-1 $L/r_d = 100$ выбрана так, чтобы сателлитная неустойчивость не развивалась, а в случае 2-5 $L/r_d = 300$ позволяет ее развитие (из-за увеличения α при уменьшении ΔV_ϕ). Начальная стадия пучковой неустойчивости в этих случаях практически одинакова. Действительно, $t_{\max}^I/T_{oe} = 7.5$; $E_{\max}^I = 22.2$ в случае 1-1 (таблица 1а) практически не отличается от $t_{\max}^{(3)}/T_{oe} = 7.4$; $E_{\max}^{(3)} = 22.3$ в случае 2-5 (таблица 14). Однако дальнейшее развитие кардинально различается. В случае 1-1 формируется квазистационарная волна БГК [1]. В случае 2-5 параллельно с развитием пучковой неустойчивости развивается сателлитная неустойчивость, что приводит к модуляции поля основной волны. В результате в случае 2-5 уже в $t/T_{oe} > 40 - 50$ развивается модуляционная неустойчивость и коллапс, а на фазовой плоскости формируется структура БГК-типа, представляющая собой область стохастического движения, включающую области захвата основной волны и гармоник сателлитов [3].

Изменение порога модуляционной неустойчивости показывает также сравнение случаев 3-1[4] и 2-3[3]. В этих случаях параме-

тры пучка и системы различны (в случае 3-1 $V_o/V_T = 31.8$; $n_b^o/n_o = 2.5 \cdot 10^{-3}$; $L/r_d = 200$; в случае 2-3 $V_o/V_T = 15.9$; $n_b^o/n_o = 1 \cdot 10^{-3}$; $L/r_d = 300$). Различны и амплитуды основной волны, развивающейся при пучковой неустойчивости: амплитуда $E_{\max}^I = 29.4$; $(E_{\max}^I)^2/8\pi n_o T = 0.28$ в случае 3-1 (таблица 1) значительно больше, чем $E_{\max}^{(3)} = 8.3$; $(E_{\max}^{(3)})^2/8\pi n_o T = 2.2 \cdot 10^{-2}$ в случае 2-3 (таблица 14). Однако, в случае 3-1 сателлитной неустойчивости нет и развитие пучковой неустойчивости приводит к формированию квазистационарной волны БГК [4]. В случае 2-3 развивается сателлитная неустойчивость. Модуляция поля основной волны, несмотря на меньшую, чем в случае 3-1, амплитуду, приводит к развитию модуляционной неустойчивости. В результате развития формируется структура на фазовой плоскости, в которой основную роль играет основная волна $N_e = 3$, а области захвата гармоник-сателлитов входят в ее стохастический слой.

Изменение скорости развития модуляционной неустойчивости в случаях с сателлитной неустойчивостью и без нее можно видеть из сравнения случаев 2-4 [3] и 3-2 [4] с одинаковой плотностью пучка $n_b^o/n_o = 3 \cdot 10^{-3}$ и разными $V_o/V_T = 15.9$ и 31.8 и $L/r_d = 300$ и 200 . Максимальная амплитуда основной волны при пучковой неустойчивости $E_{\max}^I = 33.1$; $(E_{\max}^I)^2/8\pi n_o T = 0.35$ в случае 3-2 (таблица 1) больше, чем $E_{\max}^{(3)} = 16.2$; $(E_{\max}^{(3)})^2/8\pi n_o T = 8.4 \cdot 10^{-2}$ в случае 2-4 (таблица 14). Однако, в случае 3-2 сателлитной неустойчивости нет, а в случае 2-4 – есть. Из-за модуляции поля $E(x)$ гармониками-сателлитами модуляционная неустойчивость в случае 2-4, несмотря на меньшую амплитуду, начинает развиваться раньше (в $t/T_{oe} > 40$), чем в случае 3-2 ($t/T_{oe} > 100$), и развивается быстрее. Действительно, максимальная концентрация поля при модуляционной неустойчивости в случае 2-4 достигается через $\Delta t/T_{oe} \sim 80$ в $t_{\max}/T_{oe} \sim 120$ (таблица 14), а в случае 3-2 через $\Delta t/T_{oe} \sim 270$ в $t_{\max}/T_{oe} \sim 378$ (таблица 4).

Сравнение случаев 2-2[3] и 2-3[3] позволяет оценить порог модуляционной неустойчивости при возбуждении сателлитной неустойчивости в системе, рассмотренной в работе [3]. Порог модуляци-

онной неустойчивости в случаях, когда кроме основной волны возбуждаются гармоники-спутники, можно оценить по E_m – максимальному значению поля $E(x)$ перед началом модуляционной неустойчивости.

В случае 2-2, когда нет модуляционной неустойчивости $E_m = 7.6$; $(E_m)^2/8\pi n_o T = 1.84 \cdot 10^{-2}$ ($t/T_{oe} \sim 200 - 600$)

В случае 2-3, когда возбуждается модуляционная неустойчивость $E_m = 15.1$; $(E_m)^2/8\pi n_o T = 7.31 \cdot 10^{-2}$ ($t/T_{oe} \sim 150 - 200$)

Таким образом, условие возбуждения модуляционной неустойчивости в случаях с спутниковой неустойчивостью [3] $(E_m)^2/8\pi n_o T \geq 7.3 \cdot 10^{-2}$

В работе [4] условие возбуждения модуляционной неустойчивости определялось по граничным случаям 3-1 (нет модуляционной неустойчивости) и 3-2 (есть модуляционная неустойчивость). Для сравнения со случаями 2-2, 2-3[3] отметим, что в случаях 3-1, 3-2 E_m перед началом модуляционной неустойчивости практически не отличается от E_{mx}^I - максимальной амплитуды по огибающей $E^I(t)$.

В случае 3-1 $E_{mx}^I = 22$; $(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T = 0.15$.

В случае 3-2 $E_{mx}^I = 25$; $(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T = 0.20$.

Таким образом, условие возбуждения модуляционной неустойчивости в случаях без спутниковой неустойчивости [4]

$(E_{mx}^I)^2/8\pi n_o T \geq 0.20$.

Таким образом, спутниковая неустойчивость заметно снижает порог возбуждения модуляционной неустойчивости.

Литература

- [1] *Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова*. Препринт ИЯФ 98-36, Новосибирск, 1998.
- [2] *Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова*. Препринты ИЯФ 98-37, 98-38, Новосибирск, 1998.
- [3] *Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова*. Препринты ИЯФ 98-79, 98-80, Новосибирск, 1998.
- [4] *Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин*. Препринт ИЯФ 2002-5, Новосибирск, 2002.
- [5] *Н.Г. Мациборко, И.Н. Онищенко, Я.Б. Файнберг, В.Д. Шапуро, В.И. Шевченко*. Письма в ЖЭТФ, 63, 874, 1972.
- [6] *Г.А. Артин, Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев*. Препринты ИЯФ N 95-23, N 95-24, Новосибирск, 1995.
- [7] *N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin*. Phys. Lett 112A, 330, 1985.
- [8] *T.M. O'Neil, J.H. Winfrey, J.H. Malmberg*. Phys. Fluids, 14, 1204, 1971.
T.M. O'Neil, J.H. Winfrey. Phys. Fluids, 15, 1514, 1972.
- [9] *И.Н. Онищенко, А.Р. Линский, Н.Г. Мациборко, В.Д. Шапуро, В.И. Шевченко*. Письма в ЖЭТФ, 12, 407, 1970.
N.G. Matsiborko, I.N. Onishchenko, V.D. Shapiro, V.I. Shevchenko. Plasma Physics, 14, 591, 1972.
- [10] *В.Т. Астрелин, Н.С. Бучельникова, Ю.П. Захаров*. ЖТФ, 45, в.6, 1184, 1975; препринт ИЯФ 105-73, Новосибирск, 1973.
- [11] *P.K. Kaw, A.T. Lin, J.M. Dawson*. Phys. Fluids, 16, 1967, 1973.
- [12] *N.S. Buchelnikova, E.P. Matochkin*. Physica Scripta, 24, 566, 1981.
- [13] *Н.С. Бучельникова, Б.Н. Лазеев*. Препринты ИЯФ N 94-48, N 94-49, N 94-50, N 94-51, Новосибирск, 1994.
- [14] *Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин*. Препринт ИЯФ 2000-6, 2000-58, Новосибирск, 2000.

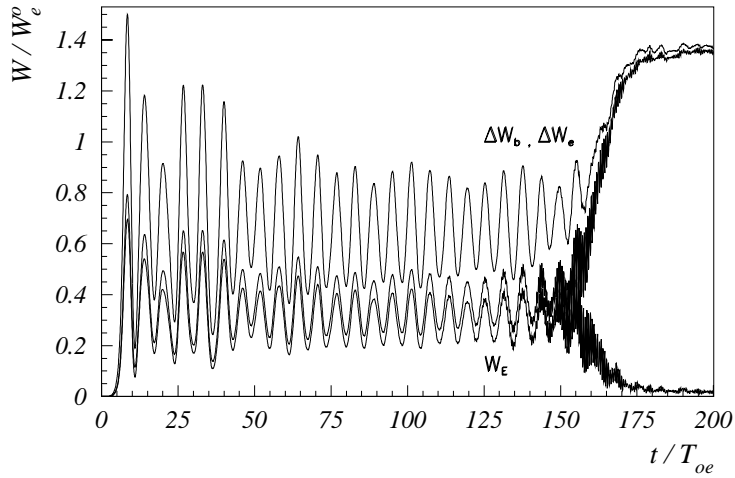


Рис. 1: Зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$. Случай 3-4.

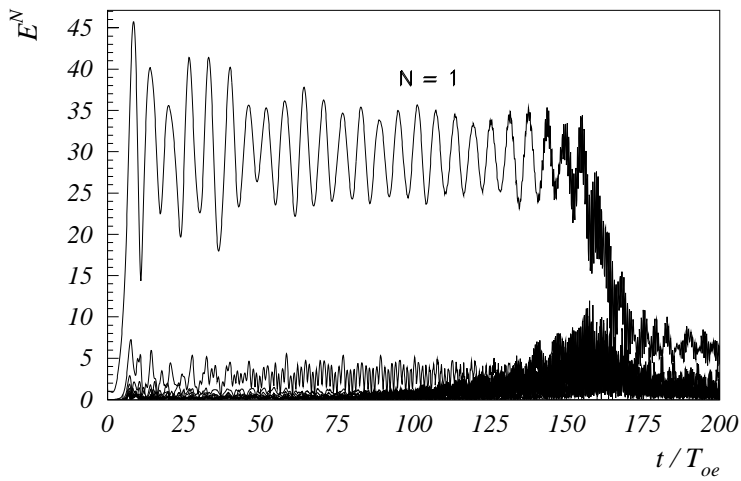


Рис. 2: Зависимость от времени амплитуды волны $N_e = 1$ и гармоник $N_e = 2 \div 10$. Случай 3-4.

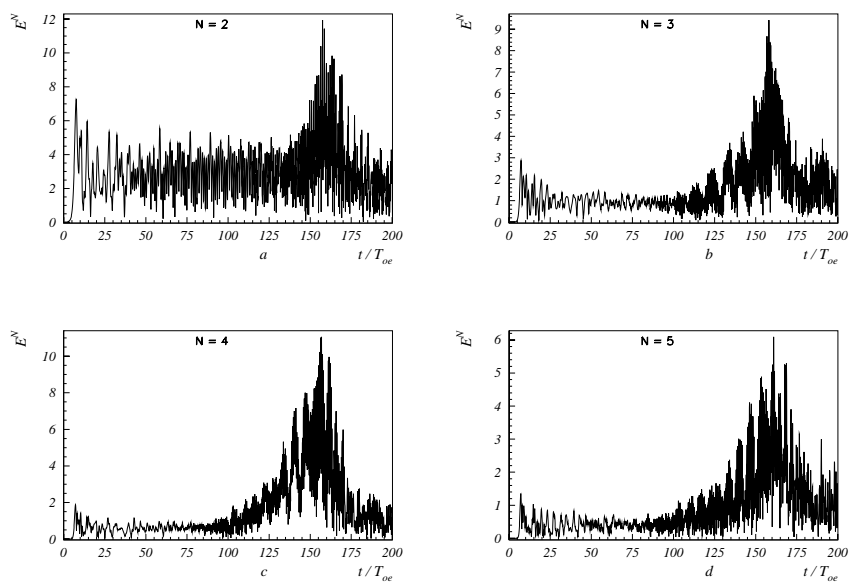


Рис. 3: Зависимость от времени амплитуды гармоник $N_e = 2 \div 5$.
Случай 3-4.

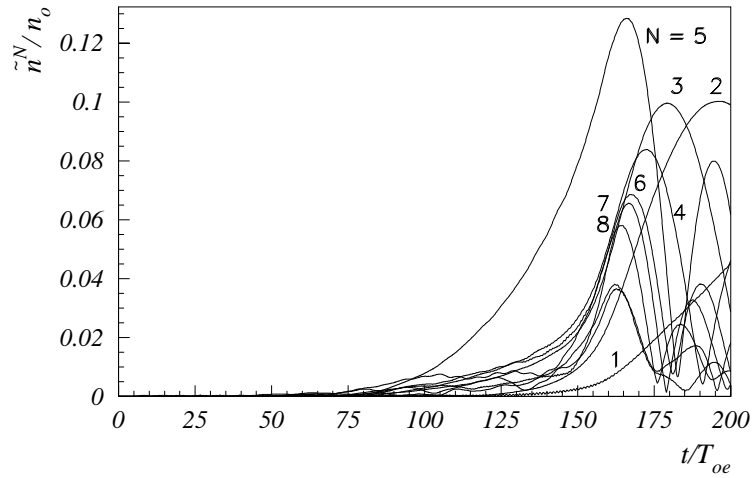


Рис. 4: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 10$. Случай 3-4.

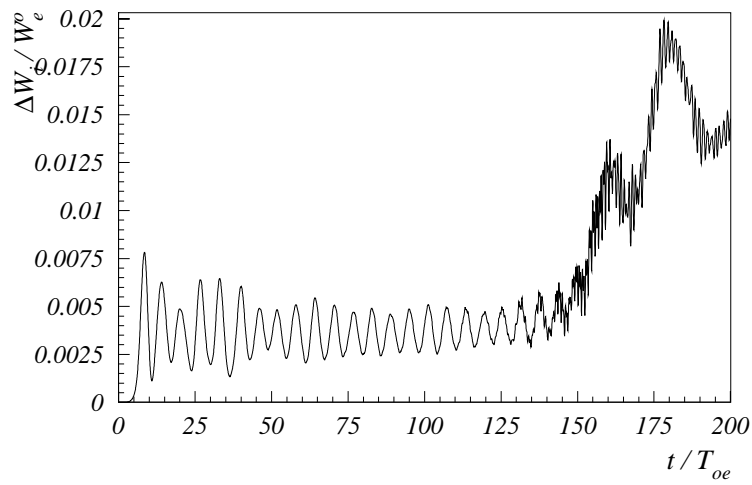


Рис. 5: Зависимость от времени энергии ионов $\Delta W_i = W_i - W_i^o$. Случай 3-4.

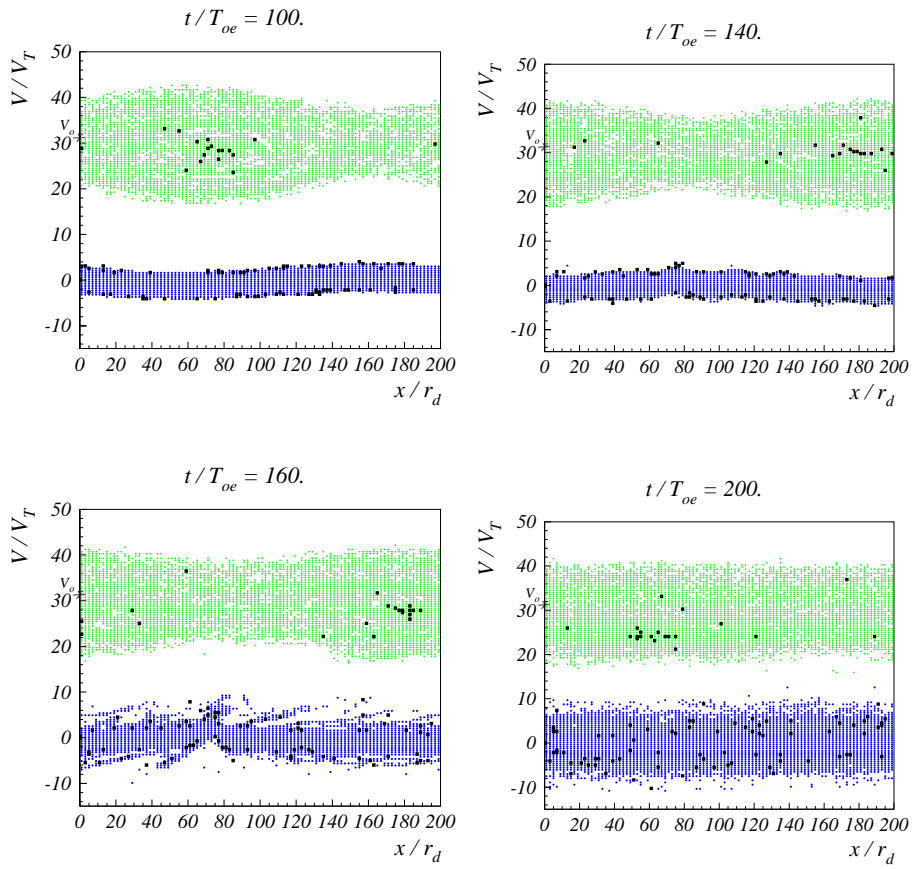


Рис. 6: Фазовые плоскости электронов. Случай 3-4.

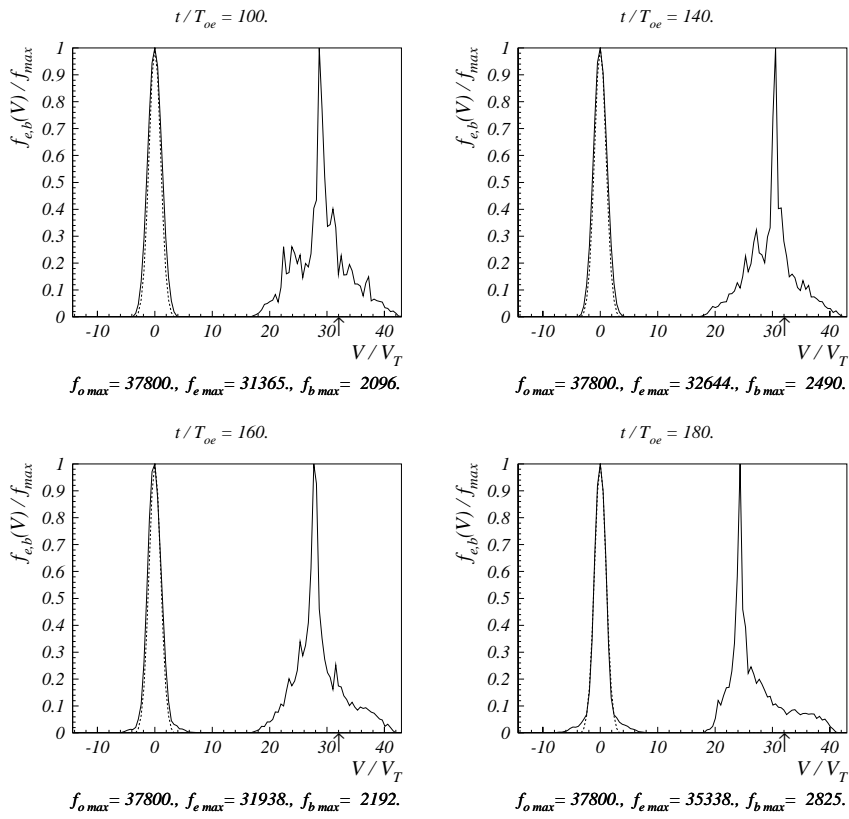


Рис. 7: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Стрелкой отмечена начальная скорость пучка $V_0/V_T = 31.8$. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 3-4.

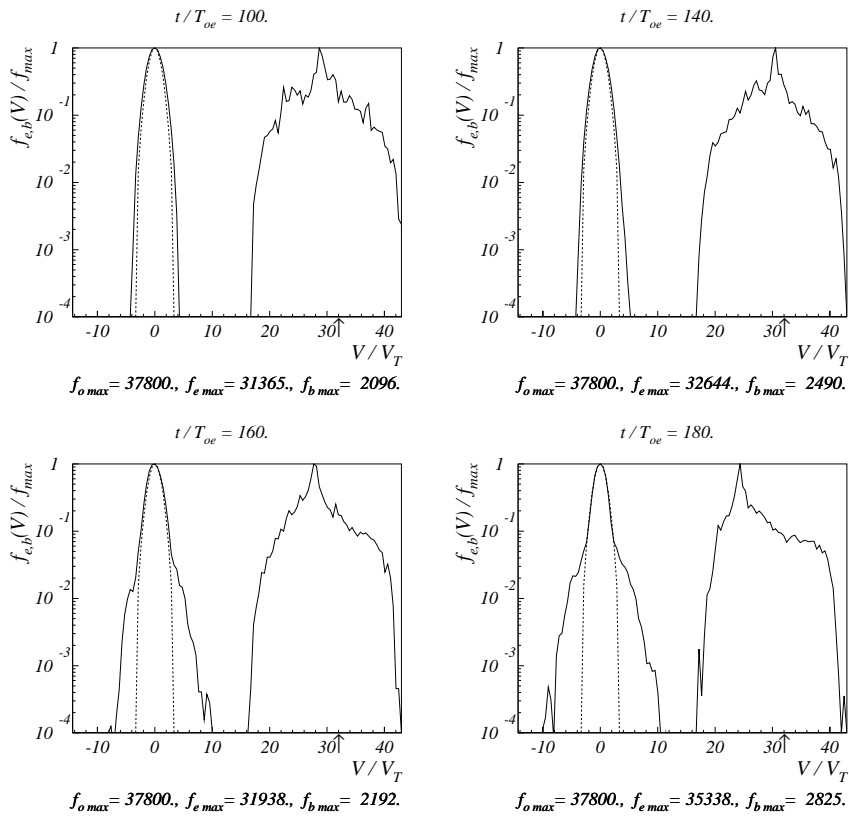


Рис. 8: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка (логарифмический масштаб). Стрелкой отмечена начальная скорость пучка $V_o/V_T = 31.8$. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 3-4.

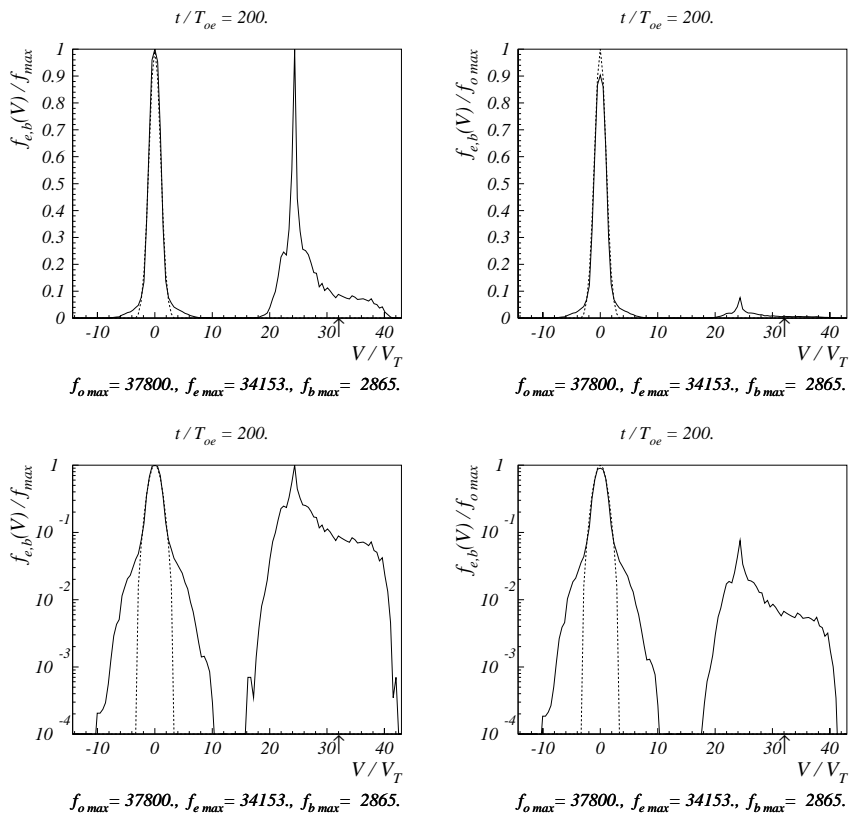


Рис. 9: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка (нормировка на f_{max} или f_{0max}). Пунктир — начальная функция распределения. Случай 3-4.

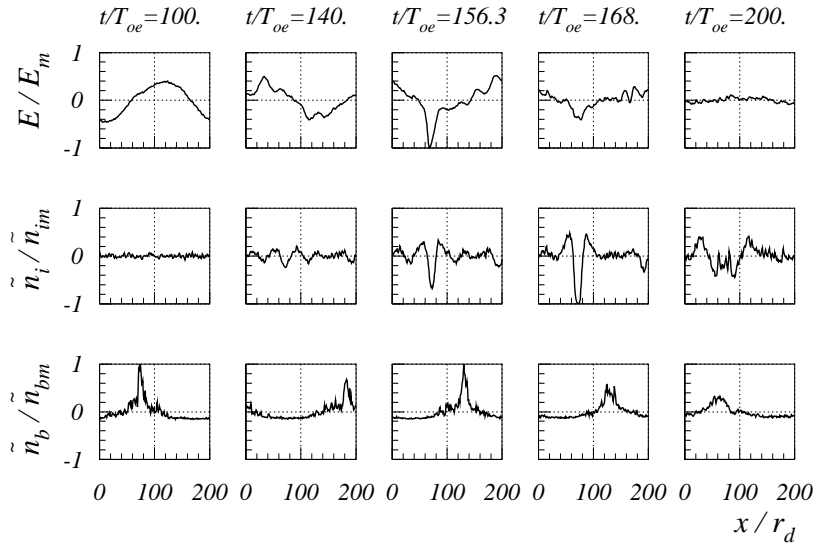


Рис. 10: Распределение поля $E(x)$, возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. Случай 3-4. $E_m = 77.40$, $\tilde{n}_{im}/n_o = 0.53$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 5.15$; $n_b^o/n_o = 5.0 \cdot 10^{-3}$.

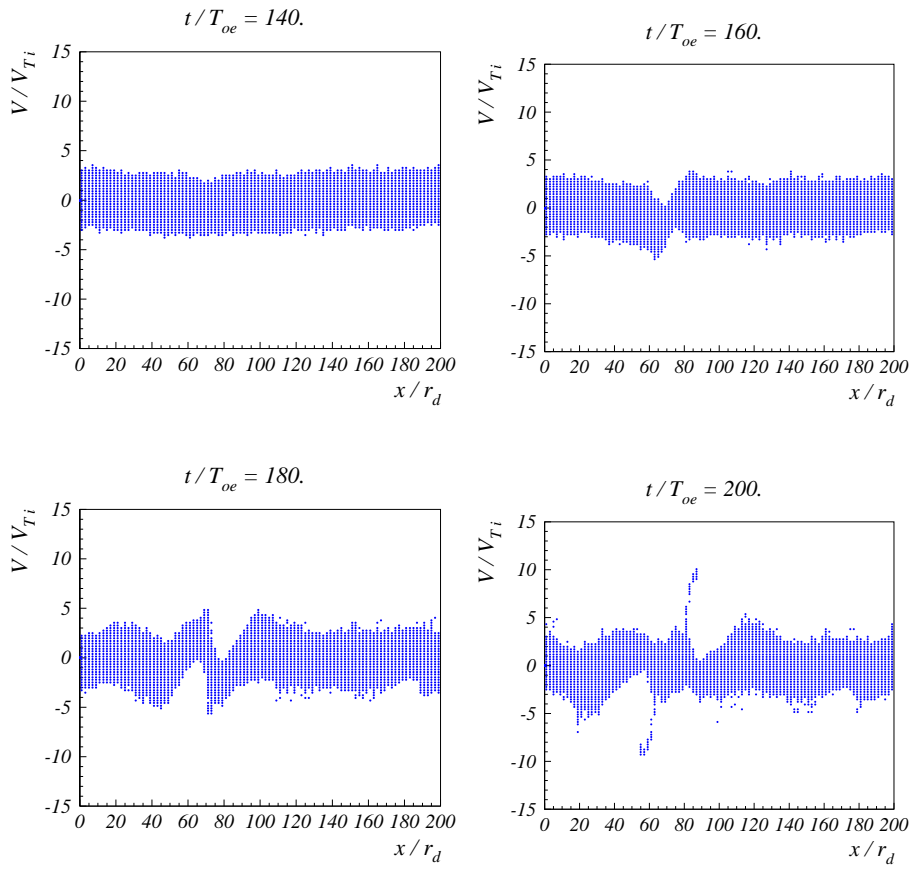


Рис. 11: Фазовые плоскости ионов. Случай 3-4.

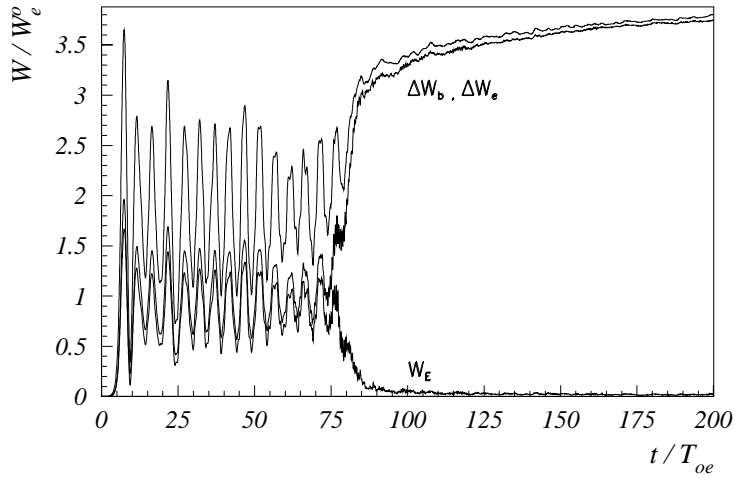


Рис. 12: Зависимость от времени энергии электрического поля W_E , энергии электронов плазмы $\Delta W_e = W_e - W_e^o$ и потерь энергии электронов пучка $\Delta W_b = -(W_b - W_b^o)$. Случай 3-5.

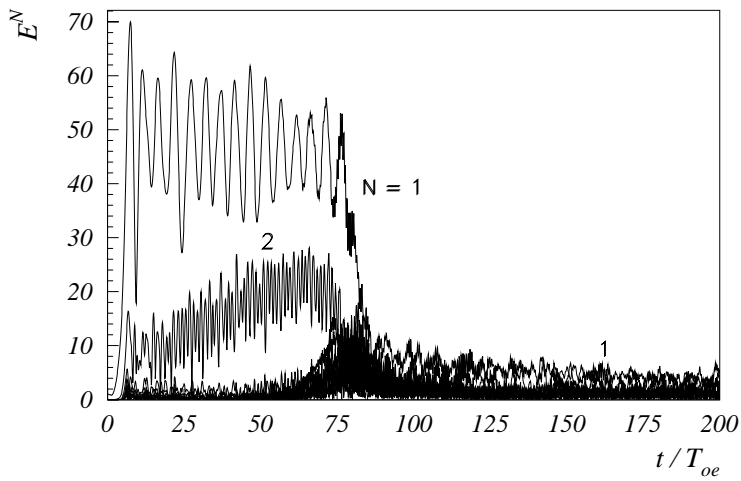


Рис. 13: Зависимость от времени амплитуды волны $N_e = 1$ и гармоник $N_e = 2 \div 10$. Случай 3-5.

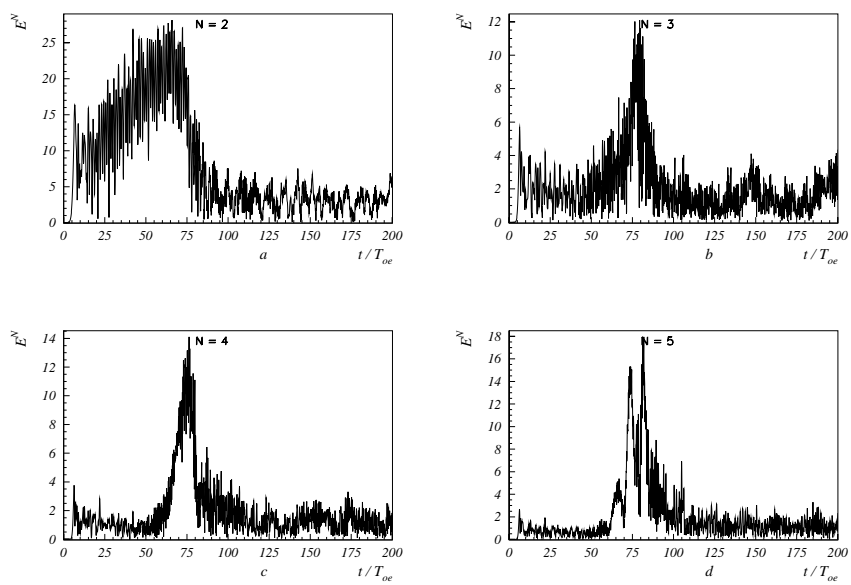


Рис. 14: Зависимость от времени амплитуды гармоник $N_e = 2 \div 5$.
Случай 3-5.

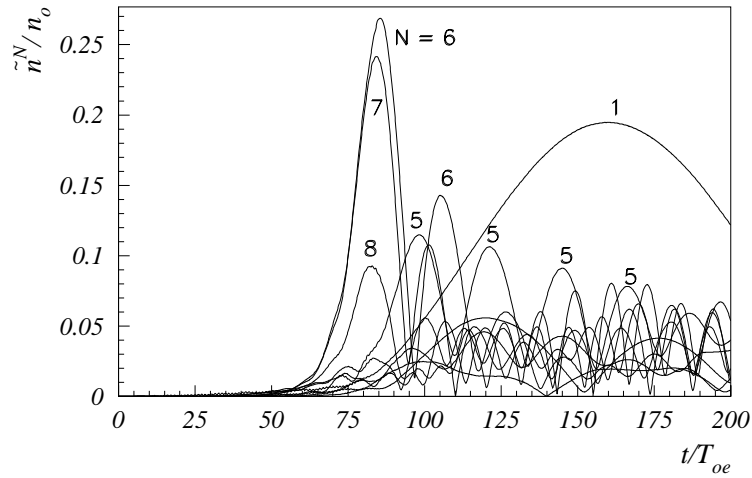


Рис. 15: Зависимость от времени амплитуды гармоник плотности ионов $N_i = 1 \div 10$. Случай 3-5.

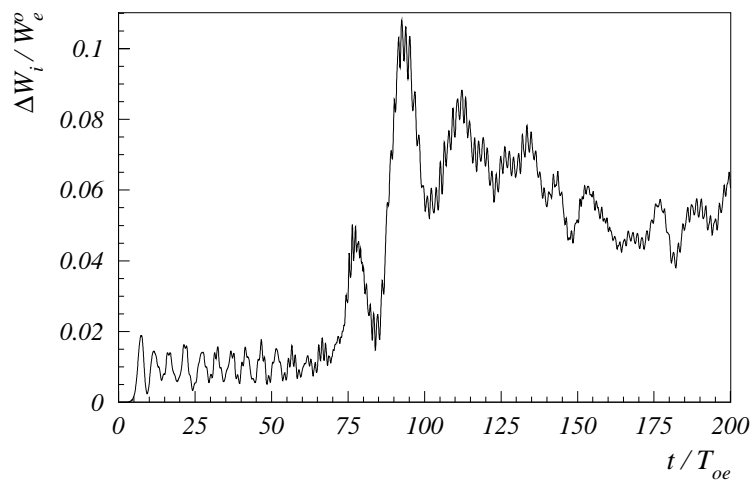


Рис. 16: Зависимость от времени энергии ионов $\Delta W_i = W_i - W_i^0$. Случай 3-5.

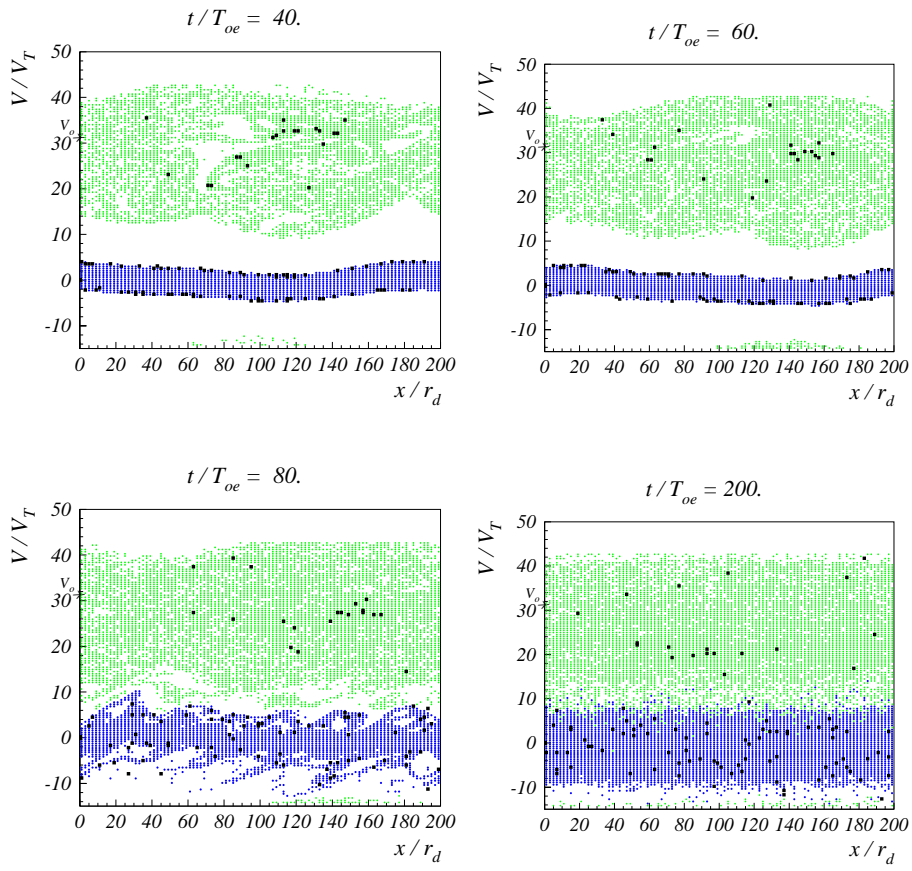


Рис. 17: Фазовые плоскости электронов. Случай 3-5.

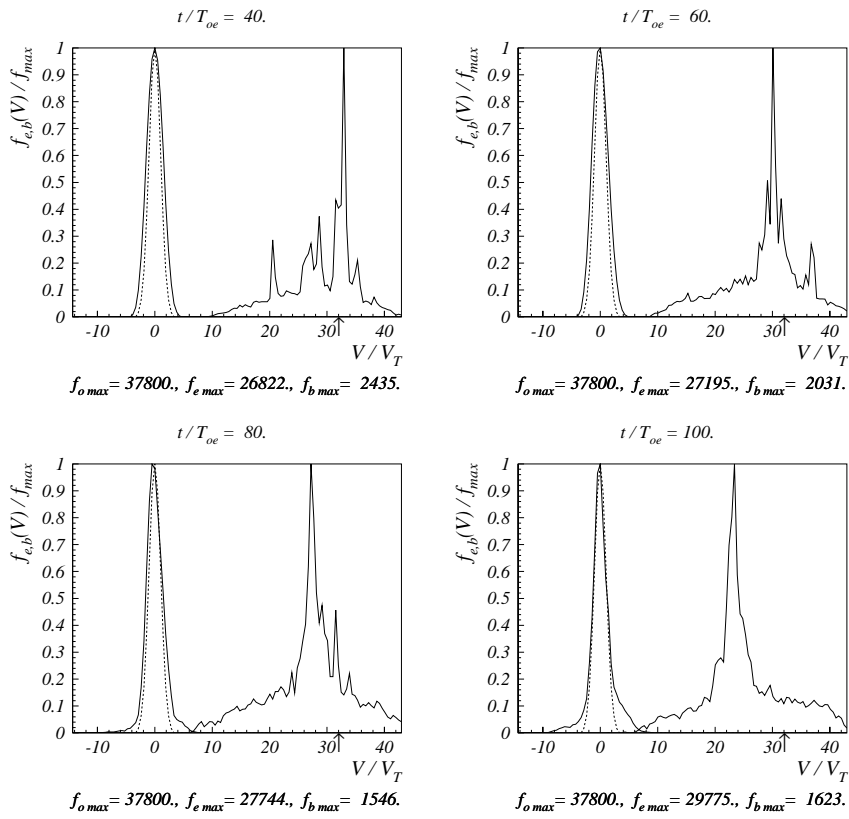


Рис. 18: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка. Стрелкой отмечена начальная скорость пучка $V_0/V_T = 31.8$. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 3-5.

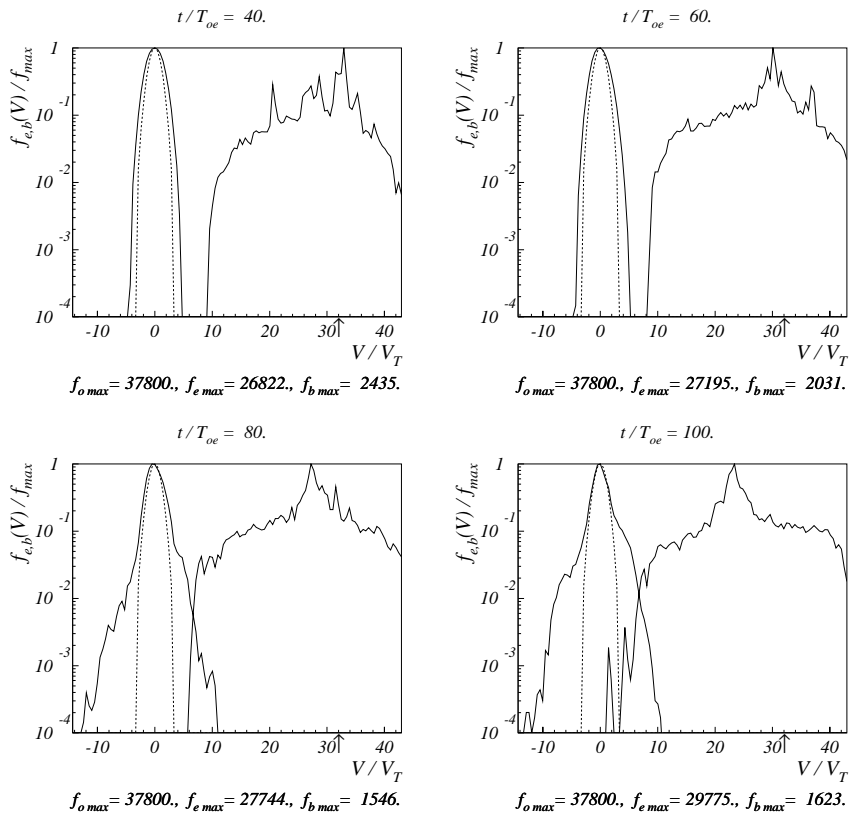


Рис. 19: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка (логарифмический масштаб). Стрелкой отмечена начальная скорость пучка $V_o/V_T = 31.8$. Пунктир – начальная функция распределения. Случай 3-5.

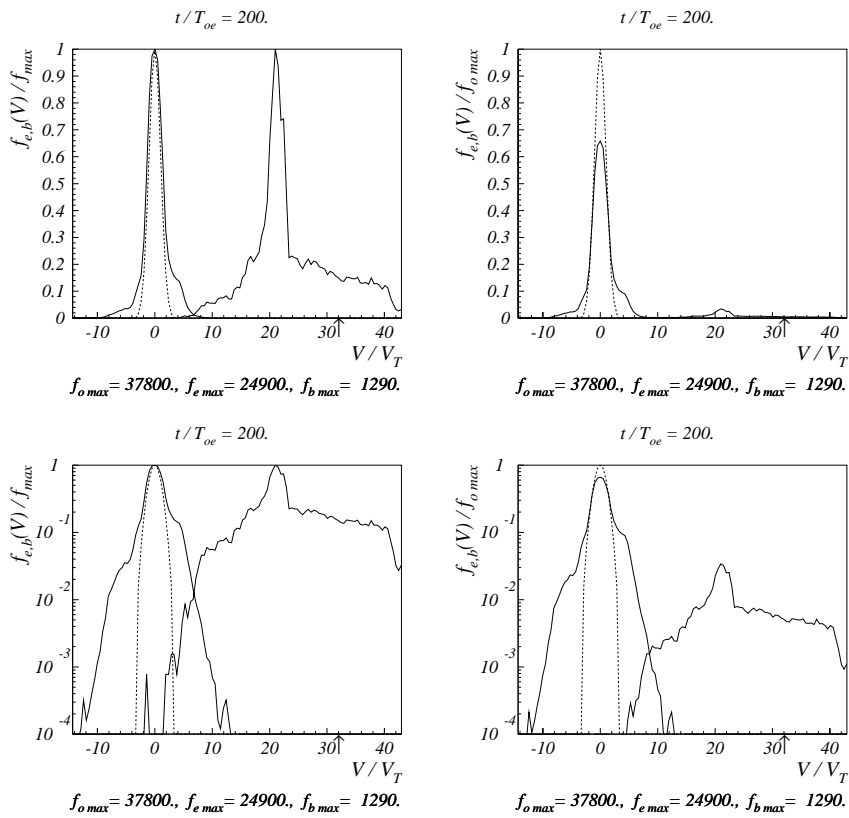


Рис. 20: Функции распределения по скоростям электронов плазмы и пучка (нормировка на f_{max} или $f_{o,max}$). Пунктир – начальная функция распределения. Случай 3-5.

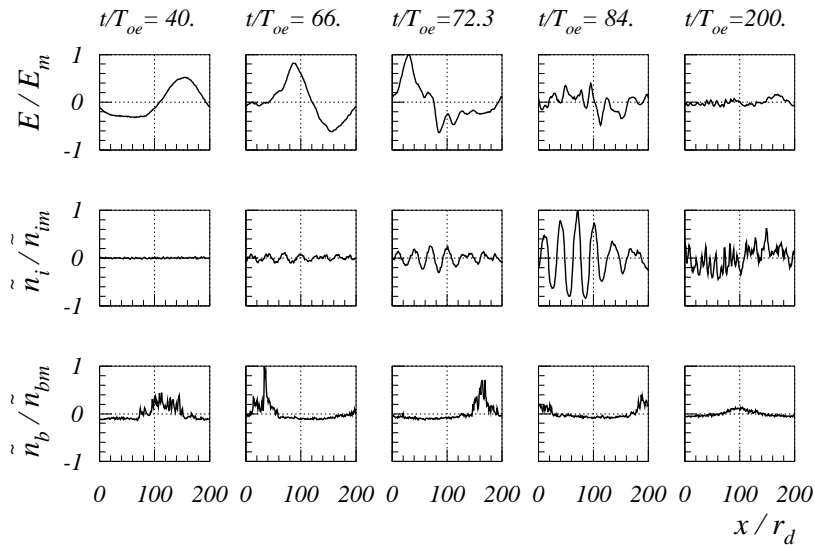


Рис. 21: Распределение поля $E(x)$, возмущения плотности плазмы $\tilde{n}(x)$ и возмущения плотности электронов пучка $\tilde{n}_b(x)$. Случай 3-5. $E_m = 105.45$, $\tilde{n}_{im}/n_o = 0.60$, $\tilde{n}_{bm}/n_b^o = 5.83$; $n_b^o/n_o = 1.0 \cdot 10^{-2}$.

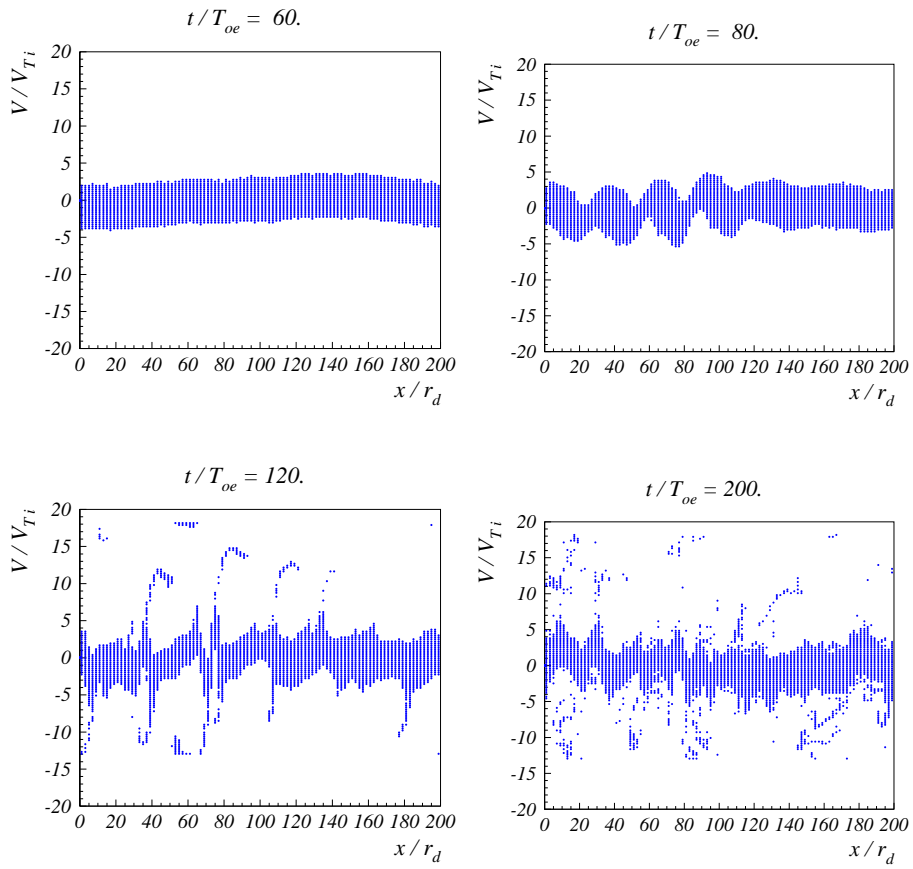


Рис. 22: Фазовые плоскости ионов. Случай 3-5.

Н.С. Бучельникова, В.Э. Карлин

**Волны БГК и модуляционная неустойчивость
при взаимодействии холодного
электронного пучка с плазмой. VII**

N.S. Buchelnikova, V.E. Carlin

**Interaction of cold electron beam with plasma.
BGK waves and modulational instability. VII**

ИЯФ 2002-6

Ответственный за выпуск А.М. Кудрявцев

Работа поступила 1.004.2002 г.

Сдано в набор 8.04.2002 г.

Подписано в печать 9.04.2002 г.

Формат бумаги 60×90 1/16 Объем 3.1 печ.л., 2.5 уч.-изд.л.

Тираж 105 экз. Бесплатно. Заказ № 6

Обработано на IBM PC и отпечатано на

ротапринте ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН

Новосибирск, 630090, пр. академика Лаврентьева, 11.