

М 87710

Московский ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции
и ордена Трудового Красного Знамени государственный
технический университет имени Н. Э. Баумана

На правах рукописи
УДК 621.039.533.07

Захаров Алексей Геннадьевич

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ
ИССЛЕДОВАНИЯ И АНАЛИЗ
НИЗКОЧАСТОТНЫХ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ
НЕОДНОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ

01.04.14 - теплофизика и молекулярная физика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Захаров

Москва - 1992

Работа выполнена в Московском ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового Красного Знамени государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
ХВЕСЮК В. И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
ИШМАНОВ Е. Е.
кандидат технических наук
ЛУКАШ В. Э.

Ведущая организация: Институт общей физики Российской
Академии Наук

Защита состоится " " _____ 1993 года в _____ часов на заседании специализированного Совета К 053.15.08 в Московском государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно
Автореферат разослать

Ученый секретарь
специализированного Со
к. т. н., доцент

Подписано к печ
Заказ 674 Типогр

M87710

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. Истощение запасов минерального топлива и загрязнение окружающей среды определяют необходимость разработки новых источников энергии. Одним из таких направлений является управляемый термоядерный синтез (УТС).

Одной из наиболее перспективных систем для промышленного использования в качестве термоядерного реактора является открытая ловушка (Головин И.Н. //Физика плазмы. - 1990. - Т. 16, вып. 12. - С. 1397-1409.). Дальнейшее развитие этого направления во многом связано с возможностью получения устойчивых режимов работы и подавлением быстронарастающих мод колебаний. Среди наиболее опасных неустойчивостей плазмы, существующих в этих системах, можно выделить колебания, развивающиеся на частицах запертых в областях с неблагоприятной кривизной магнитных силовых линий. Эти колебания получили название неустойчивости на запертых частицах (НЗЧ). Поскольку экспериментальное изучение НЗЧ в настоящее время является затруднительным, что, в частности, связано с отсутствием достаточно детальных знаний о ее частотном диапазоне и возможных областях локализации колебаний, а также большими временными и материальными затратами по созданию полномасштабных установок, возникает необходимость проведения численного исследования этой неустойчивости.

В данной работе разработан комплекс математического и программного обеспечения для численного исследования НЗЧ в открытых ловушках различной конфигурации.

Цели работы.

1. Разработка физико-математической модели низкочастотных электростатических колебаний неоднородной плазмы открытых систем. Создание соответствующего программного аппарата исследований.

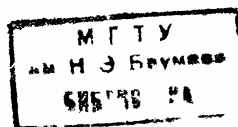
2. Проведение параметрического анализа поведения НЗЧ в широком диапазоне плазменно-физических параметров систем. Поиск возможных областей устойчивой работы. Выявление факторов, влияющих на диапазон устойчивых режимов.

НИО ГИИ им. Н.Э. Баумана



1087710

Захаров А.Г. Разработка ч



3. Обобщение результатов и выработка рекомендаций для идентификации и исследований НЗЧ на экспериментальных установках.

Научная новизна работы.

1. Впервые поставлена задача определения собственных частот (инкрементов) и аксиальных распределений потенциала неустойчивости на запертых частицах в открытых термоядерных системах.

2. Обнаружены ранее неизвестные моды колебаний НЗЧ.

3. Впервые выполнен многопараметрический анализ мод НЗЧ, а также выявлено влияние различных факторов на их поведение.

4. Численно подтверждена возможность стабилизации наиболее опасной моды НЗЧ.

5. Показана связь между различными видами электростатических колебаний плазмы открытых ловушек (связь желобковой моды колебаний с наиболее опасной модой НЗЧ).

Практическая ценность работы.

1. Создана система математического и программного обеспечения для численного исследования низкочастотных электростатических колебаний неоднородной плазмы открытых ловушек.

2. Выявленный частотный диапазон, а также указанные области локализации колебаний могут быть использованы для идентификации этого типа неустойчивостей в эксперименте.

3. Проведенный параметрический анализ показал возможность выбора устойчивых (относительно наиболее опасной моды НЗЧ) конфигураций системы.

На защиту выносятся:

- метод исследования низкочастотных электростатических колебаний неоднородной плазмы в открытых термоядерных системах,

- система алгоритмов и программ для численного моделирования указанных колебаний,

- результаты численного исследования электростатических колебаний плазмы для открытых систем различной конфигурации,

- результаты численного моделирования НЗЧ в экспериментальной установке TARA (США).

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены в докладах Всесоюзной конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 1992 г.), на научных семинарах в ИАЭ им. И. В. Курчатова и НИИЭМ МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 1990-1992 гг.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 2 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и библиографического описки из 41 наименования. Она содержит 77 страниц текста и 22 рисунка.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, поставлены цели и задачи исследований, кратко изложено содержание глав диссертации, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе кратко рассмотрено состояние исследований по созданию малорадиоактивного термоядерного реактора на D^3He топливе. На основании опубликованных к настоящему времени работ рассмотрены экологические и эксплуатационные преимущества использования D^3He смеси в качестве топлива промышленных термоядерных реакторов. Вместе с тем, эффективное использование этой смеси возможно только в системах с более высокими, по сравнению с DT, плазменно-физическими параметрами, в частности в системах, допускающих работу с высокими β . Указанные требования, а также ряд других преимуществ открытых ловушек позволяют рассматривать их как одни из наиболее предпочтительных систем в качестве реакторов на D^3He топливе.

Дан обзор работ, посвященных вопросам исследований и стабилизации наиболее опасных градиентных неустойчивостей плазмы открытых магнитных ловушек (желобковой и неустойчивости на запертых частицах (НЗЧ)). Отмечено, что имеющиеся в настоящее время методы исследования НЗЧ не дают полного представления о развитии этих колебаний.

В главе 2 ставится задача общего исследования в кинетическом приближении низкочастотных электростатических колебаний в неоднородной плазме открытых магнитных систем. Эта задача согласно (Михайловский А. В. Теория плазменных неустойчивостей. - М.: Атомиздат, 1971. - т. 2: Неустойчивости неоднородной плазмы. - 312 с.) сводится к решению интегрального уравнения относительно неизвестных $\varphi_0 = \varphi_0(z)$ и ω (φ_0 - амплитуда возмущенного электрического потенциала, ω - комплексная частота колебаний) вида:

$$\sum_{\alpha=1, \dots} \int_{h_1(z)}^{h_2(z)} \int_{z_1(\epsilon, \mu)}^{z_2(\epsilon, \mu)} d\mu dz \left\{ f_1 \varphi_0 - \bar{\varphi}_0 \left[f_2 + \frac{1}{\omega} f_3 + \frac{1}{\omega^2} f_4 \right] \right\} = 0, \quad (1)$$

$$\bar{\varphi}_0 = \frac{\int_{z_1(\epsilon, \mu)}^{z_2(\epsilon, \mu)} \varphi_0 f_5 dz}{\int_{z_1(\epsilon, \mu)}^{z_2(\epsilon, \mu)} f_5 dz}.$$

Символом f обозначены функции от полной энергии частицы ϵ^* , ее магнитного момента μ и продольной координаты z . h_1, h_2, h_3, z_1, z_2 - некоторые известные функции.

Предложен метод решения этого уравнения путем сведения его к системе линейных алгебраических уравнений на основе аппроксимации магнитного поля системы кусочно-постоянной функцией, рис. 1.

Разработано соответствующее программное обеспечение, позволяющее проводить моделирование магнитных ловушек различной конфигурации. Рассмотрены вопросы тестирования и сравнения результатов с аналитическим решением.

В третьей главе представлены результаты численного моделирования электростатических колебаний плазмы в магнитных системах различной конфигурации (одиночной осесимметричной ловушке и цепочке: центральная секция + якоря). В этих системах наряду с хорошо известной желобковой модой колебаний, характеризуемой постоянным вдоль оси системы распределением возмущения электрического потенциала φ , рис. 2а, впервые обнаружены мелкомасштабные моды неустойчивости на запертых частицах (НЗЧ), локализованные в областях неблагоприятной кривизны магнитного поля пробок, рис. 2в-е. Эти колебания имеют

значительно более низкие частоты и инкременты нарастания по сравнению с желобковой модой колебаний. В системе с магнитными якорями обнаружена ранее предполагавшаяся (Г. Л. Берк, М. Н. Розенблют, Г. В. Уонг и др. // Физика плазмы. - 1983. - Т. 9, вып. 1. - С. 176-183.) крупномасштабная мода НЗЧ, имеющая постоянную амплитуду потенциала в центральной секции, уменьшающуюся в области нарастания магнитного поля пробки и в якоре, рис. 2б.

Замечено, что крупномасштабная мода НЗЧ, в отличие от мелкомасштабных мод, чувствительна к стабилизирующему эффекту конечного ларморовского радиуса, хотя и в меньшей степени, чем желобковая мода колебаний.

Увеличение длины участка однородного поля центральной секции l_c при сохранении постоянным участка нарастания магнитного поля пробки l_m (что фактически является увеличением инерции колебательной системы) в обеих конфигурациях магнитной ловушки приводит к уменьшению инкрементов желобковой моды колебаний, рис. 3, и снижает как по частоте, так и по инкременту мелкомасштабные моды НЗЧ, рис. 4. (Результаты представлены в единицах $\Omega = \omega/\omega_c$, $\omega_c = \omega_{ci} \rho_L / l_m$ - частота (инкремент) желобковой моды колебаний при $l \approx 2l_m$, где ω_{ci} , ρ_L - циклотронная частота и ларморовский радиус ионов, $l = l_c + 2l_m$. Обозначения в параметрах расчетов: $k_{\perp}$ - волновое число; T_i, T_e - температуры ионов и электронов). Первоначальное уменьшение инкремента "главной" моды НЗЧ, рис. 5, при больших отношениях длин $l/2l_m$ сменяется постепенным увеличением частоты колебаний и возможным ростом инкремента, что объясняется изменением аксональной структуры этой моды, которая при больших отношениях $l/2l_m$ приближается к желобковой. Таким образом, в протяженных системах инкремент и частота "главной" моды НЗЧ могут сравниваться с желобковыми.

В системах с магнитными якорями при изменении "запаса устойчивости" S , являющегося отношением вкладов якорей и центральной секции в интеграл устойчивости (М. Н. Розенблют, С. Л. Лонгмир // Ann. of Phys. - 1967. - v. 1. - P. 120-140.)

$$\int \frac{1}{B^2} \frac{\partial(p_{\perp} + p_{\parallel})}{\partial \psi} \frac{\partial \psi}{\partial \psi} dl < 0,$$

(ψ - потоковая координата, p_1 , p_2 - газодинамическое давление плазмы вдоль и поперек магнитного поля $\vec{B}$), происходит смена типов крупномасштабных электростатических колебаний плазмы, рис. 6. При $s < 1$ в системе присутствует желобковая мода колебаний, рис. 2а. При $s = s_1 \approx 1$ происходит ее стабилизация. Затем следует "стабильный" участок (присутствуют только мелкомасштабные моды НЗЧ). Дальнейшее увеличение s приводит к появлению крупномасштабной моды НЗЧ ($s > s_2$), инкремент которой сначала растет, затем при больших s эта мода стабилизируется. С ростом s "главная" мода НЗЧ меняет свою аксиальную структуру, рис. 7, в том числе приобретает форму ступеньки с резкой границей (рис. 7г). Однако, в отличие от ранее предполагаемого, эта структура может не соответствовать максимальному значению инкремента (см. рис. 6).

В четвертой главе на основе разработанной методики проведено моделирование электростатических колебаний плазмы в экспериментальной установке TARA (США). Выбор этой ловушки объясняется полученными на ней данными, подтверждающими существование НЗЧ в подобных системах (M.J.Gerver, S.N.Golovato, J.H.Irby, J.Kesner //Phys. Fluids B 1989. - v.1, №3. - P.608-614.). Наблюдавшиеся в эксперименте колебания плазмы на частоте 25-100 кГц с $m \geq 3$ могут быть классифицированы как мелкомасштабные моды НЗЧ.

Промоделировано поведение этих колебаний в зависимости от проводившегося в эксперименте изменения количества пролетных частиц.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Разработан метод исследования в кинетическом приближении низкочастотных электростатических колебаний (конвективной природы) неоднородной плазмы открытых термоядерных систем, позволяющий определять структуру возмущений и соответствующие частоты (инкременты) различных мод колебаний.

2. Разработаны соответствующие вычислительные алгоритмы и создан пакет программ для численного моделирования

низкочастотных (с частотами ниже баунс-частоты) электростатических колебаний неоднородной плазмы.

3. Показано, что в МГД устойчивых в целом системах возможно существование нарастающих во времени решений, называемых неустойчивостями на запертых частицах (НЗЧ). Среди этих решений, кроме предполагавшейся "главной" моды НЗЧ, обнаружены ранее неизвестные мелкомасштабные моды колебаний.

4. Показано, что вид крупномасштабных электростатических колебаний зависит от величины "запаса" МГД устойчивости системы.

5. Изучены общие закономерности поведения и свойства мод НЗЧ.

Основные свойства "главной" моды НЗЧ:

- имеет крупномасштабную акональную структуру, локализованную в центральной области секции с неблагоприятной кривизной магнитных силовых линий;

- в протяженных системах инкремент этой моды может приближаться к магнитогиродинамическому;

- стабилизируется эффектом конечного ларморовского радиуса;

- поведение этой моды существенно зависит от характеристик МГД якоря и относительного количества пролетных частиц;

- обнаружены области стабилизации этой моды при отсутствии эффекта конечного ларморовского радиуса.

Основные свойства мелкомасштабных мод НЗЧ:

- являются узко локализованными в областях неблагоприятной кривизны магнитного поля пробок;

- как правило, имеют более низкие инкременты нарастания по сравнению с "главной" модой НЗЧ;

- не стабилизируются эффектом конечного ларморовского радиуса;

- слабо зависят от характеристик якоря и относительного количества пролетных частиц.

6. Разработанная методика расчетов была применена к моделированию низкочастотных электростатических колебаний на экспериментальной установке ТАРА. Результаты расчетов

удовлетворительно согласуются с экспериментальными данными.

7. Полученные результаты могут быть использованы при проектировании и проведении экспериментальных исследований на открытых магнитных системах.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Arsenin V.V., Khvesjuk V.I., Zakharov A.G. Axial structure of the trapped particle mode in open systems //19th international conference on plasma physics. - Innsbruck (Austria), 1992. report 3-8/x5.

2. Захаров А.Г., Хвескик В.И. К вопросу о неустойчивости на запертых частицах в открытых системах //Письма в ЖТФ. - 1992. - Вып. 23.

Автор выражает глубокую благодарность В.В.Арсенину за большую помощь в постановке задачи и обсуждение результатов.

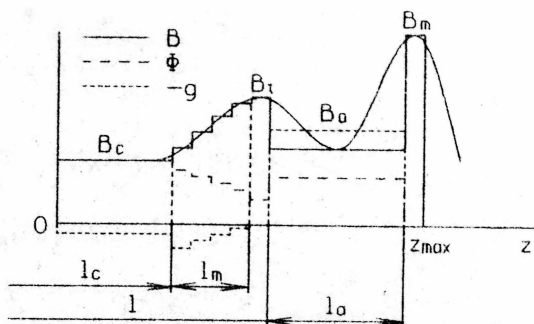


Рис. 1. Аппроксимация изменения вдоль оси ловушки плазменных физических параметров кусочно-постоянными функциями.

B - магнитное поле;

Φ - амбиполярный потенциал;

g - эффективное поле силы тяжести, введенное для моделирования дрейфа частиц в неоднородном магнитном поле ловушки.

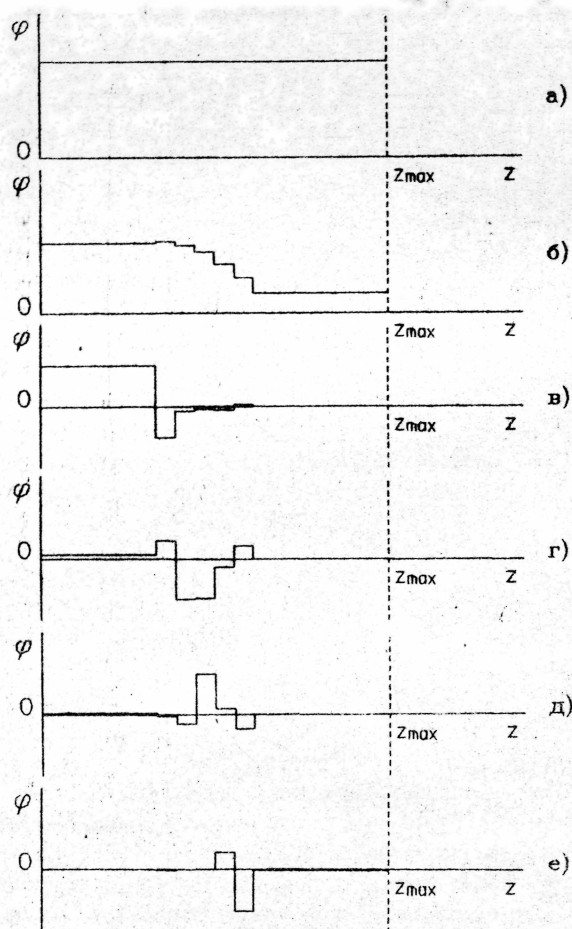


Рис. 2. Аксиальные структуры различных мод электростатических колебаний.

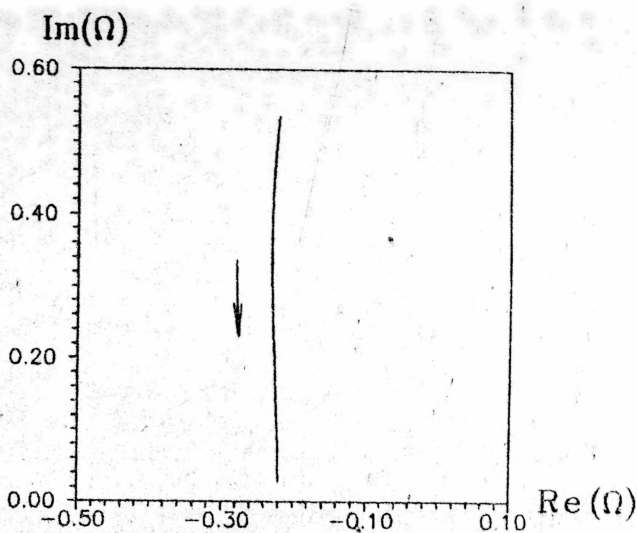


Рис. 3. Зависимость частоты и инкремента жолобковой моды колебаний от длины участка однородного поля l_0 . Стрелкой показано направление увеличения отношения $l_0/2l_m$ в диапазоне от 1,25 до 12,5. Параметры расчётов: $V_1/V_c = 2$; $V_a/V_c = 1,2$; $V_m/V_c = 2,02$; $l_0/l_m = 2$; $T_1/T_c = 10$; $k_{1PL} = 0,024$; $S = 0,1$.

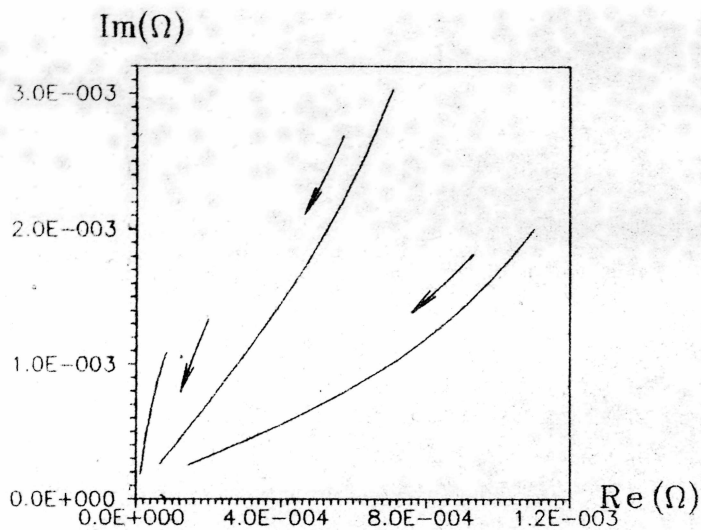


Рис. 4. Зависимости частот и инкрементов мелкомасштабных мод НЗЧ от длины участка однородного поля l_c .

Стрелками показано направление увеличения отношения $1/2l_m$ в диапазоне от 1,25 до 12,5.

Параметры расчетов: $V_l/V_c=2$; $V_a/V_c=1,2$; $V_m/V_c=2,02$;

$I_a/I_m=2$; $T_l/T_c=10$; $k_{\perp\rho_L}=0,024$; $s=10$.

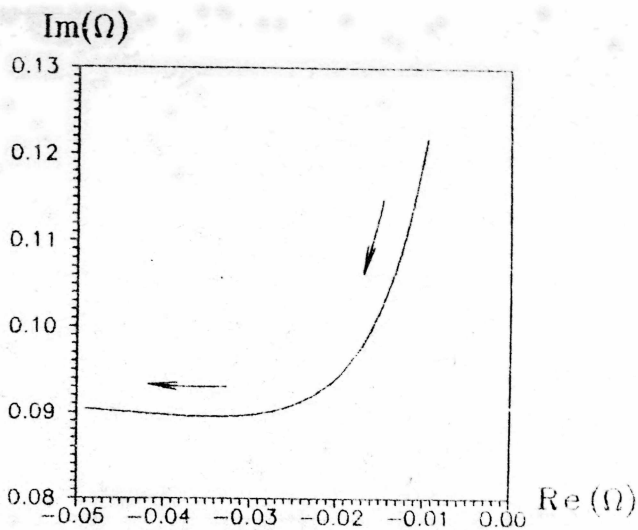


Рис. 5. Зависимость частоты и инкремента "главной" моды НЗЧ от длины участка однородного поля l_c .

Стрелками показано направление увеличения отношения $1/2l_m$ в диапазоне от 1,25 до 12,5.

Параметры расчетов: $v_1/v_c = 2$; $v_a/v_c = 1,2$; $v_m/v_c = 2,02$;

$l_a/l_m = 2$; $T_1/T_c = 10$; $k_1\rho_L = 0,024$; $S = 10$.

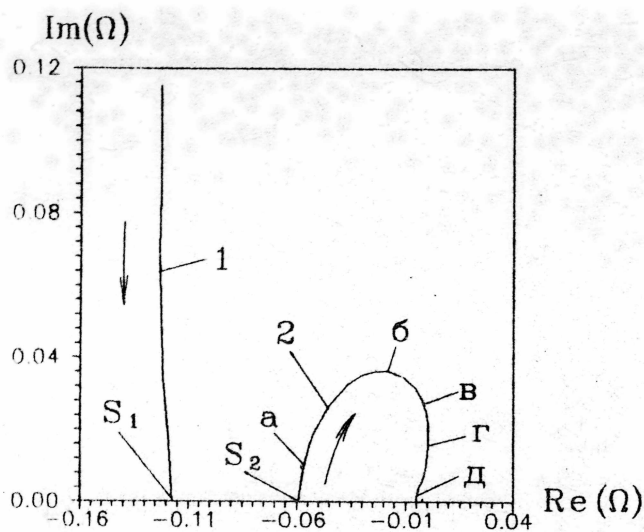


Рис. 6. Изменение вида крупномасштабных электростатических колебаний плазмы в системе: центральная секция + якоря при увеличении "запаса устойчивости" S .

1- желобковая мода;

2- "главная" мода НЗЧ.

Стрелками показано направление увеличения S .

Параметры расчетов: $V_1/V_c = 2$; $V_a/V_c = 1,6$; $V_m/V_c = 4$;

$1/2l_m = 1,25$; $l_a/l_m = 1,3$; $T_i/T_e = 15$; $k_{\perp}\rho_L = 0,008$.

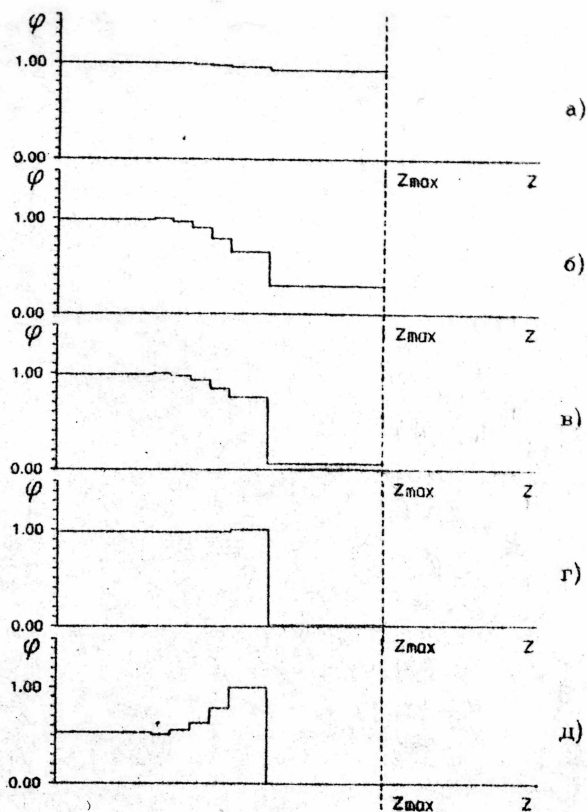


Рис. 7. Изменение аксиальной структуры "главной" моды НЗЧ при увеличении "запаса устойчивости" s (см. рис. 6).