

М 498401

Государственный комитет СССР по делам науки и высшей школы

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

На правах рукописи

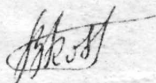
УДК 519.6 : 533.9

Костенко Виталий Владимирович

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МЕТОДОВ РАСЧЕТА
ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА
СИЛЬНО НЕРАВНОВЕСНОЙ ПЛАЗМЫ

05.13.16 Применение вычислительной техники, математического
моделирования и математических методов в научных исследованиях
01.04.08 Физика и химия плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Москва - 1991

Работа выполняея 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
Хвеськи В. И.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Александров А. Ф.

кандидат технических наук
Лукаш В. Э.

Ведущая организация: Институт прикладной математики АН СССР
им. М. В. Келдыша, г. Москва

Защита состоится "10" декабря 1991 года в 11³⁰ часов на
заседании специализированного Совета ПОВЗ ТБ ТЭ при Московском
государственно- по
адресу: 107000

С диссея
Авторефе

Ученый с
Совета к. т. н

М 498401

Подписан
Заказ

им. Н. Э. Ба



Костенко В. В. Разр



1498401

Костенко В.В. Разработка чи

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность тем. Разработка новых, экологически чистых и безопасных источников энергии является одной из важнейших задач, стоящих перед современной наукой и техникой. Наиболее перспективный путь ее решения - осуществление управляемого термоядерного синтеза в горячей плазме.

В данной работе проведен общий энергетический анализ эффективности D^3He топлива и показана перспективность применения открытых адиабатических ловушек в качестве будущих термоядерных реакторов. Присущая этим системам относительная простота и технологичность конструкции, возможность работать с высокими β (отношение давления плазмы к давлению магнитного поля) и использовать системы с прямым преобразованием энергии выделяют их из различных концепций термоядерных систем.

Большие временные и материальные затраты по созданию полномасштабных экспериментальных установок требуют широкого развития методов математического моделирования процессов, происходящих в них. В силу ряда причин (Сковорода А.А. - Физика плазмы. - 1985. - Т. II - С. 1319-1321) изучение взаимодействия плазмы открытых ловушек с электромагнитными волнами электронно-циклотронного диапазона является принципиально важным для формирования концепции будущего термоядерного реактора.

Сложность и специфика явлений, происходящих при распространении электромагнитных волн в плазме, требует разработки детальных физических и математических моделей и совершенных численных кодов, описывающих эволюцию электронной компоненты плазмы с учетом различных сопутствующих процессов.

В данной работе разработан комплекс математического, алгоритмического и программного обеспечения (МАПО) численных экспериментов электронно-циклотронного нагрева плазмы в открытых ловушках. На его основе :

I. Проанализировано влияние неравновесности функции распределения электронов (ФРЭ) на показатель преломления и

коэффициент затухания электромагнитной волны в плазме;

2. Проведено комплексное численное моделирование эксперимента на установке ОГРА-4К и дана интерпретация его результатов.

Цели работы:

1. Общий энергетический анализ эффективности использования D^3He топлива в термоядерной энергетике.

2. Анализ физических и математических моделей электронно-циклотронного нагрева плазмы с учетом специфических процессов, происходящих в открытых ловушках.

3. Создание единой системы математического, алгоритмического и программного обеспечения численных экспериментов электронно-циклотронного нагрева плазмы в открытых ловушках с учетом неравновесности функции распределения электронов.

5. Численное моделирование электронно-циклотронного нагрева плазмы в экспериментальной установке с целью изучения закономерностей нагрева и интерпретации результатов экспериментов.

Научная новизна работы.

1. Впервые получен критерий Лоусона для D^3He плазмы с учетом циклотронного излучения и показана его зависимость от β . Получено выражение для минимальной β , необходимой для самоподдерживающейся реакции синтеза.

2. Впервые исследовано влияние неравновесности функции распределения электронов на показатель преломления и коэффициент затухания. Создано соответствующее математическое и программное обеспечение.

3. Впервые разработано математическое и программное обеспечение расчета распространения и поглощения электромагнитных волн в неравновесной слабонеоднородной магнитоактивной плазме.

4. Впервые разработано математическое и программное обеспечение расчета нагрева электронной компоненты плазмы открытых ловушек на основе решения нестационарного нелинейного кинетического уравнения, корректно описывающего поведение низкоэнер-

гетичных электронов.

Б. Проведено комплексное математическое моделирование процессов в экспериментальной установке ОГРА-4К.

Достоверность результатов, полученных в работе, обеспечивалась за счет тщательного анализа физических механизмов взаимодействия волна - частица, использования строгих теоретических результатов и тестирования созданного математического обеспечения.

Практическая ценность работы заключается в следующем:

1. Создана система МАПО численных экспериментов по электронно-циклотронному нагреву плазмы в открытых ловушках.

2. Метод расчета и созданные численные коды были использованы в ИАЭ им. И. В. Курчатова при обработке экспериментальных данных на установке ОГРА-4К.

3. Разработанное математическое и программное обеспечение может использоваться при планировании и интерпретации будущих экспериментов и концептуальном проектировании установок следующего поколения.

На защиту выносятся :

- результаты энергетического анализа использования D^3He топлива в системах с магнитным удержанием плазмы;

- система математического, алгоритмического и программного обеспечения численных экспериментов электронно-циклотронного нагрева плазмы;

- результаты расчетов высокочастотных свойств плазмы;

- результаты расчетов распространения и поглощения электромагнитных волн в плазме;

- результаты моделирования нагрева плазмы в экспериментальной установке.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы были представлены и докладывались на международной школе по физике плазмы (Варенна, Италия, 1989 г.), совещании рабочей группы по открытым ловушкам (Новосибирск 1988 г., Москва 1989 г.), научно-технических конференциях МВТУ им.

Н. Э. Баумана, кафедра Э8 (Москва, 1987-1988 г.), научных семинарах НИИ ЭМ МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 1990 г.), научных семинарах в ИАЭ им. И. В. Курчатова (Москва, 1989, 1991 гг.), ИЯФ СО АН СССР (Новосибирск, 1990, 1991 гг.), ИФФ АН СССР (Горький, 1990 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения, библиографического списка из 71 наименования и приложения. Она содержит 91 страницу текста и 46 рисунков.

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, выносящиеся на защиту.

В первой главе проведен общий энергетический анализ применения D^3He топливного цикла в системах с магнитным удержанием плазмы. Для равнокомпонентной ($n_D = n_{He}$) и изотермичной D^3He плазмы ($T_i = T_e$) получено выражение критерия Лоусона с учетом циклотронного излучения (считается, что потери из плазмы с тепловыми частицами и тормозным излучением преобразуются с КПД η_{TC} , с циклотронным излучением - η_{SN} , с продуктами синтеза - η_{DC}) (рис. 1):

$$\begin{aligned} n\tau = (1 - \eta_{TC}) 3kT \left[\frac{\eta_{DC}}{4} \langle \sigma v \rangle_{D-He} E_{D-He} - \left[(1 - \eta_{TC}) X_T / T + \right. \right. \\ \left. \left. + (1 - \eta_{SN}) X_S \frac{T^4 (2k\mu_0)^{3/2}}{[B(1-B)^{1/2}]^{1/2} B^{3/2}} \right] \right]^{-1} \end{aligned} \quad (1)$$

Из соотношения (1) получено критическое значение B^* , при котором $n\tau = \infty$ (рис. 2). Анализ полученных соотношений приводит

к выводу о том, что эффективное сжигание D^3He смеси возможно только в системах, допускающих работу с высокими β , среди которых открытые ловушки занимают лидирующее положение.

Далее, на основе проведенного анализа, поставлена задача электронно-циклотронного нагрева плазмы в отдельных ячейках амбиполярного реактора с учетом неравновесности ФРЭ и специфики взаимодействия волна-частица в открытых ловушках, рассмотрены ее основные особенности и проведен анализ различных приближений при моделировании нагрева. Показано (из анализа характерных времен исходной системы электродинамики плазмы), что задачу электронно-циклотронного нагрева можно представить в виде двух взаимосвязанных задач:

1. Расчет распространения электромагнитных волн в неравновесной неоднородной магнитоактивной плазме.

2. Расчет эволюции ФРЭ под действием электромагнитных волн и столкновений, определение показателя преломления и коэффициента поглощения неравновесного электронного газа.

Дан обзор работ по численному моделированию электронно-циклотронного нагрева плазмы различных установок и отмечены наиболее существенные черты применяемых математических моделей. Отмечено, что подавляющее большинство моделей разработаны для систем с замкнутой магнитной конфигурацией, где отклонения ФРЭ от равновесной незначительны. При моделировании открытых систем неравновесность ФРЭ не учитывалась.

Вторая глава посвящена описанию математической модели распространения и поглощения электромагнитных волн в магнитоактивной плазме в приближении геометрической оптики с учетом неравновесности функции распределения электронов. Уравнения траекторий волн записывались в следующем виде:

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = - \left(\frac{\partial \operatorname{Re} D(\omega, \vec{k})}{\partial \vec{k}} \right) \left(\frac{\partial \operatorname{Re} D(\omega, \vec{k})}{\partial \omega} \right)^{-1} \quad (2)$$

$$\frac{d\vec{k}}{dt} = \left(\frac{\partial \operatorname{Re} D(\omega, \vec{k})}{\partial \vec{r}} \right) \left(\frac{\partial \operatorname{Re} D(\omega, \vec{k})}{\partial \omega} \right)^{-1} \quad (3)$$

$$\gamma = - \operatorname{Im} D(\omega, \vec{k}) \left(\frac{\partial \operatorname{Re} D(\omega, \vec{k})}{\partial \omega} \right)^{-1} \quad (4)$$

где: $\omega, \vec{k}$ - частота и волновой вектор падающей электромагнитной волны;

$D(\omega, \vec{k})$ - дисперсионное уравнение для горячей неравновесной плазмы (Основы электродинамики плазмы // А. И. Ахиезер, И. А. Ахиезер, Р. В. Половин и др. - М.: Наука, 1974. - 719с.).

Уравнения траекторий решаются методом Рунге-Кутты-Фальберга четвертого-пятого порядка с автоматическим выбором шага по времени в трехмерной геометрии.

Программное обеспечение решения уравнений (2-3) разработано по модульному принципу, что позволяет легко переходить к моделированию установок различных типов. Проведено тестирование математической модели и программ путем сравнения с аналитическим решением и с результатами расчета тестовых примеров другими авторами.

В третьей главе, на основе решения дисперсионного уравнения для горячей неравновесной плазмы, проведен анализ влияния неравновесности функции распределения электронов на показатель преломления и коэффициент затухания электромагнитной волны в высокотемпературной плазме. Расчет проводился при фиксированной частоте падающей волны, а варьировались следующие величины:

1. $\left(\frac{w_{pe}}{w} \right)^2$ и $\left(\frac{w_{be}}{w} \right)^2$;

2. угол между волновым вектором и вектором магнитной

индукции $\varphi = (\vec{k}, \vec{B})$;

3. вид функции распределения электронов;

4. параметры магнитного поля ловушки;

5. средняя энергия электронов.

Анализ полученных дисперсионных зависимостей (рис. 3, 4) позволяет сделать следующие выводы:

1. $N^2(\phi)$ и $\gamma(\phi)$ сильно зависят от вида функции распределения электронов, причем отклонение $N^2(\phi)$ и $\gamma(\phi)$, рассчитанное для неравновесных ФРЭ, от соответствующих равновесных значений увеличивается при повышении средней энергии электронов.

2. Закономерности отклонений $N^2(\phi)$ и $\gamma(\phi)$ отличаются для разных квадрантов диаграммы КМА.

Отмечается, что разработанные программы могут применяться для анализа кинетической устойчивости сильно неравновесных ФРЭ.

Далее, разработанное программное обеспечение применено для комплексного математического моделирования эксперимента в ловушке со встречными магнитными полями (М.И. Белавин, В.А. Жильцов, Ю.А. Кучеряев и др. // Физика плазмы. - 1990. - Т. 16. - С. 984-991.). Описана математическая модель замагниченной плазмы в установке ОГРА-4К. Магнитное поле моделировалось известными аналитическими соотношениями, а распределение параметров плазмы в объеме установки рассчитывалось следующим образом:

1. Задавался профиль концентрации и средней энергии, а также вид ФРЭ на поверхности минимумов магнитного поля.

2. ФРЭ в любой точке установки, а по ней и параметры плазмы, рассчитывались на основе сохранения поперечного адiabатического инварианта электрона и постоянства функции распределения вдоль фазовой траектории.

Проведен детальный численный анализ распространения и поглощения электромагнитных волн в экспериментальной установке при широком варьировании параметров плазмы и ее пространственного распределения. Варьировались следующие параметры:

1. $n_{e, \max} = 1 \times 10^6 \dots 5 \times 10^8 \text{ м}^{-3}$;

2. $\langle E_z \rangle = 1 \dots 20 \text{ кВ}$;

3. угол расходимости пучка $\alpha = 0 \dots 3^\circ$;

Один из вариантов расчета представлен на рис. 5. По результатам расчетов можно сделать следующие выводы:

1. Картина распространения электромагнитных волн слабо зависит от исследуемых параметров и, в основном, сводится к тому, что центральная часть пучка проходит сквозь плазму, практически не поглощаясь, а периферийная часть, напротив, испытывает интенсивное поглощение вблизи поверхности циклотронного резонанса.

2. В области интенсивного поглощения декремент затухания увеличивается настолько, что перестает выполняться приближение геометрической оптики - малость затухания на длине волны, поэтому корректное определение коэффициента поглощения пучка невозможно.

3. Для увеличения эффективности нагрева предложено изменить диаграмму направленности излучателя.

В четвертой главе, на основе анализа результатов распространения и поглощения электромагнитных волн, построена модель электронно-циклотронного нагрева плазмы в экспериментальной установке на основе нестационарного нелинейного кинетического уравнения:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = L_{FF}(f_0; f_i) + L_{RF}(f_0; E_v) + S_0(f_0) \quad (5)$$

где: $L_{FF}(f_0; f_i)$ - оператор столкновительной диффузии (учитываются электрон-электронные и электрон-ионные столкновения);

$L_{RF}(f_0; E_v)$ - оператор взаимодействия электронов с электромагнитной волной;

$S_0(f_0)$ - распределение источника электронов.

Оператор столкновительной диффузии записывался в приближении изотропных потенциалов Розенблута.

Оператор взаимодействия электронов с электромагнитным полем впервые записывался с учетом относительно больших скачков по энергии низкоэнергетичных частиц:

$$L_{RF}(f_0; E_v) = \int (W(\vec{v} - \Delta\vec{v}, \Delta\vec{v}) f_0(t, \vec{v} - \Delta\vec{v}) - W(\vec{v}, \Delta\vec{v}) f_0(t, \vec{v})) d\Delta\vec{v} \quad (6)$$

где: $W(\vec{v} - \Delta\vec{v}, \Delta\vec{v})$, $W(\vec{v}, \Delta\vec{v})$ - вероятности переходов электронов в пространстве скоростей.

Источник электронов рассчитывался по концентрации водорода в вакуумной камере с учетом зависимости сечения ионизации от энергии :

$$S_e = n_T \int \sigma_{ion}(v) |\vec{v}| f_e(\vec{v}, \vec{r}) d\vec{v} \quad (7)$$

При переходе к разностному аналогу уравнения (5) строилась консервативная неявная схема. Полученная система линейных алгебраических уравнений решалась методом Гаусса с последующей итерацией по нелинейности на каждом шаге по времени методом итераций.

Получены пространственные и временные характеристики параметров плазмы в процессе нагрева и проведено сравнение с результатами экспериментов на установке ОГРА-4К.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Проведен общий энергетический анализ использования D^3He топлива в системах с магнитным удержанием плазмы. Показано, что эффективное сжигание D^3He топлива возможно только в системах, допускающих работу с большими β .

2. Проведен анализ различных приближений при моделировании электронно-циклотронного нагрева плазмы и на его основе рассмотрены основные математические модели, применявшиеся для численного исследования нагрева плазмы. Анализ существующих моделей показал, что они :

а) рассматривают либо только распространение и поглощение электромагнитной волны, либо только нагрев плазмы в нульмерном, в физическом пространстве, приближении;

б) не учитывают сильную неравновесность функции распределения электронов при расчете распространения волны и ее поглощения;

в) ограничиваются диффузионным приближением при описании кинетики нагрева.

Все это не позволяет адекватно описать нагрев плазмы в реальной экспериментальной установке.

3. С помощью разработанного программного обеспечения

впервые проанализировано влияние неравновесности функции распределения электронов на показатель преломления и коэффициент затухания. Показано, что учет неравновесности необходим при расчете электронно-циклотронного нагрева в открытых ловушках.

4. Впервые разработано программное обеспечение и на его основе проанализировано распространение электромагнитных волн в открытой ловушке со встречными магнитными полями с учетом неравновесности ФРЗ. Выявлены области наиболее интенсивного поглощения мощности излучателя. На основе проведенного анализа, с целью достижения более высоких экспериментальных результатов, предложено изменить диаграмму направленности излучателя.

5. Впервые поставлена и решена задача электронно-циклотронного нагрева плазмы в открытой ловушке, корректно описывающая недиффузионное поведение низкоэнергетичных электронов. На этой основе проанализирована кинетика ЭЦН плазмы в ловушке со встречными магнитными полями. Дано объяснение наблюдающимся в эксперименте особенностям пространственного распределения горячей плазмы. Результаты расчетов удовлетворительно согласуются с экспериментом (рис. 6, 7).

6. Разработанное математическое и программное обеспечение позволяет анализировать электронно-циклотронный нагрев в широком классе термоядерных устройств с магнитным удержанием плазмы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. К оценке параметров плазмы термоядерного реактора на D^3He топливе / И.Н. Головин, В.В. Костенко, В.И. Хвесик, Н.В. Шабров // Письма в ЖТФ. - 1988. - Т. 14, вып. 20. - С. 1860-1865.

2. Костенко В.В., Хвесик В.И., Шабров Н.В. Анализ D^3He топливного цикла термоядерных энергетических установок // Атомная энергия. - 1990. - Т. 68, вып. 3. - С. 188-193.

3. Kinetics and analyses of the D^3He tandem mirror reactor plasma parameters / I.N. Golovin, V.I. Khvesyuk. V.V.

Kostenko, D.L. Poletaev, N.V. Shabrov // Proc. Intern. School of Plasma Phys. Workshop. - Varenna, 1989. - P.293-303.

4. Анализ магнитного реактора на D^3He топливе / В.В. Костенко, Д.Л. Полетаев, Н.В. Шабров, В.И. Хвесик // Труды Всесоюзного совещания по D^3He термоядерному синтезу 10-11 апреля 1990 г. - М.: ЦНИИатоминформ. - 1990. - С.12-31.

Б. Kostenko V.V., Khvesjuk V.I. ECRH in an open trap // Workshop on D^3He Based Reactor Studies, Kurchatov ABL, Moscow, USSR, 25 September - 2 October, 1991. - P.14-21

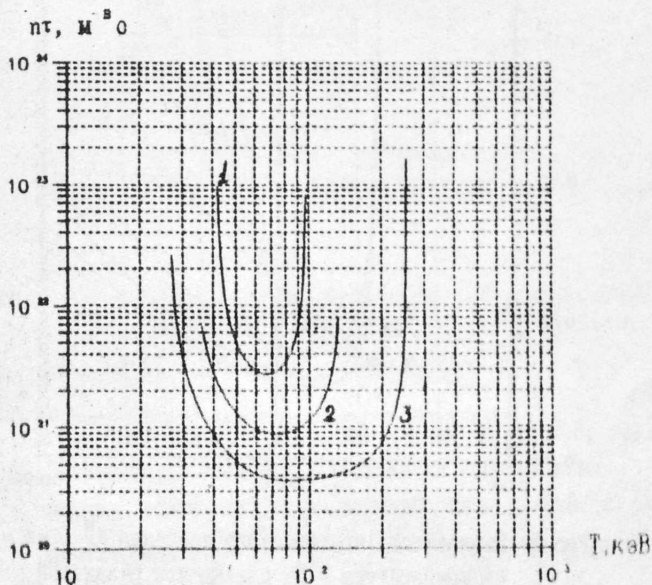


Рис. 1. Зависимость критерия Лоусона $n\tau$ от температуры D^3He плазмы при различных КПД внешних систем реактора и $\beta = 0.3$ ($B = 5$ Т, $r_{пл} = 1$ м, $\epsilon = 0.9$)

1 - $\eta_{rc} = 0.3$; $\eta_{dc} = 0.3$; $\eta_{sn} = 0.3$;

2 - $\eta_{rc} = 0.3$; $\eta_{dc} = 0.5$; $\eta_{sn} = 0.5$;

3 - $\eta_{rc} = 0.3$; $\eta_{dc} = 0.9$; $\eta_{sn} = 0.9$.

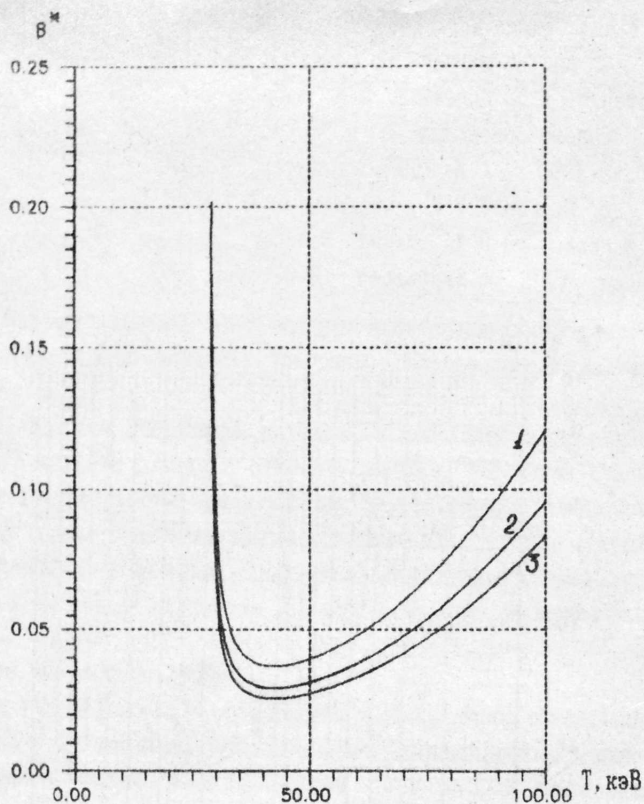


Рис. 2. Зависимость критического значения B^* ($n\tau = \infty$) от температуры D^3He плазмы при различной напряженности магнитного поля ($\eta_{rc}=0.3$, $\eta_{dc}=0.7$, $\eta_{sn}=0.5$, $r_{пл}=1$ м, $\epsilon = 0.9$)
1 - $B = 5$ Т; 2 - $B = 10$ Т; 3 - $B = 15$ Т.

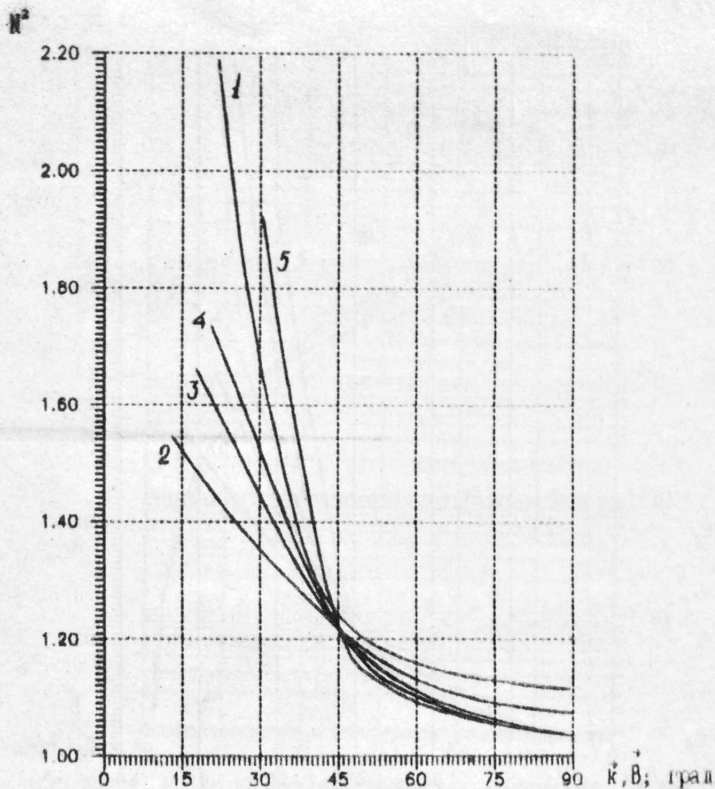


Рис. 3. Зависимость квадрата показателя преломления эл.-м. волны от угла падения для плазмы с параметрами $\left(\frac{w_{b*}}{w}\right)^2 = 0.9$; $\left(\frac{w_{p*}}{w}\right)^2 = 0.9$; $T_e = 5 \text{ кэВ}$ и ФРЭ вида :

$$f(x, \theta) = \begin{cases} x^2 \exp(-x^2/2) \left(I \left(\frac{\cos \theta}{\cos \theta_{lc}} \right)^2 \right) & \theta \geq \theta_{lc} \\ 0 & 0 < \theta < \theta_{lc} \end{cases}$$

$x = v/v_0$; v_0 - тепловая скорость;

θ -pitch-угол; θ_{lc} - угол "конуса потерь".

I - "холодная" плазма; 2 - маковедловское распределение; 3 - $R = 10$; 4 - $R = 5$; 5 - $R = 2$.

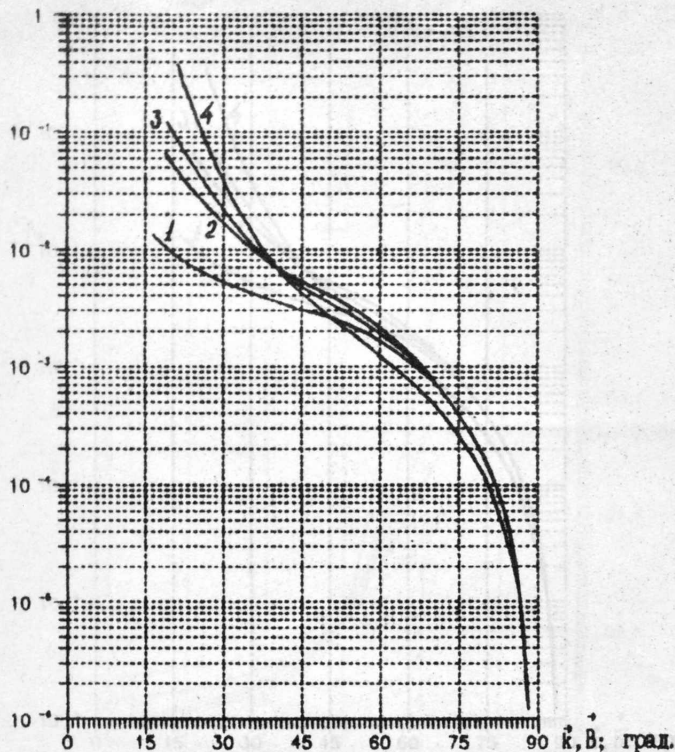


Рис. 4. Зависимость декремента затухания ал.-м. волны от угла падения для плазмы с параметрами

$\left(\frac{w_{be}}{w}\right)^2 = 0.9$; $\left(\frac{w_{pe}}{w}\right)^2 = 0.9$; $T_e = 5$ кэВ. ФРЭ соответствует рис. 3.

I - максвелловское распределение;

2 - $R = 10$; 3 - $R = 5$; 4 - $R = 2$.

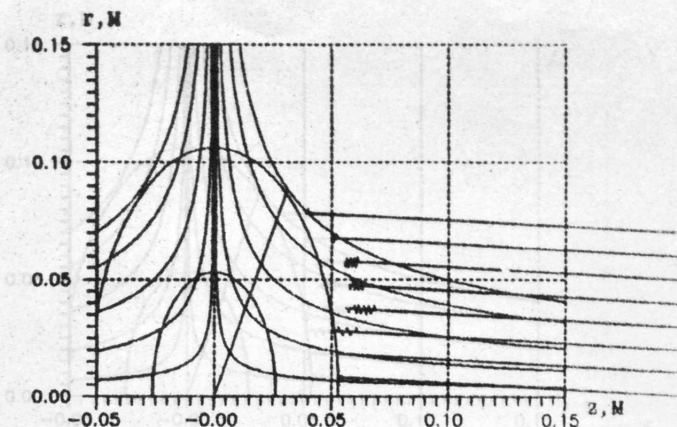


Рис. 5. Траектории распространения необыкновенной волны в экспериментальной установке. Параметры пучка: $n_{\text{max}} = 5 \cdot 10^4 \text{ м}^{-2}$, $n_{\text{ф}} = 1 \cdot 10^6 \text{ м}^{-2}$, $T_e = 10 \text{ эВ}$. Угол расходимости пучка $\alpha = 3^\circ$. Риски нанесены для коэффициента поглощения с шагом 0.05. z - потоковая координата.

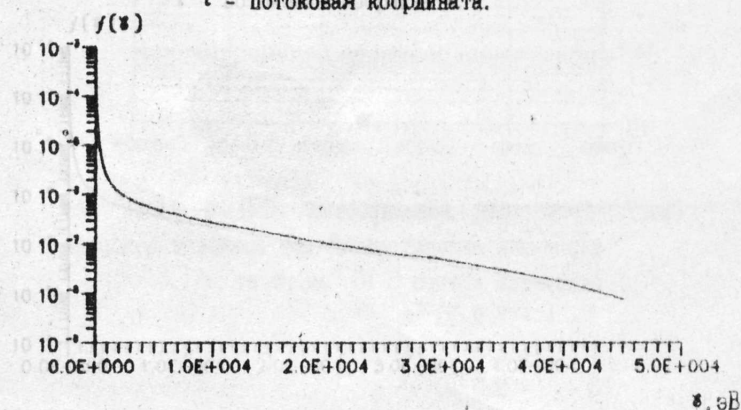


Рис. 6. Расчетное распределение электронов по энергиям для силовой линии $l = 7.8 \cdot 10^{-2} \text{ м}$ в момент времени $3.55 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ при давлении водорода $5 \cdot 10^{-5} \text{ мм. рт. ст.}$

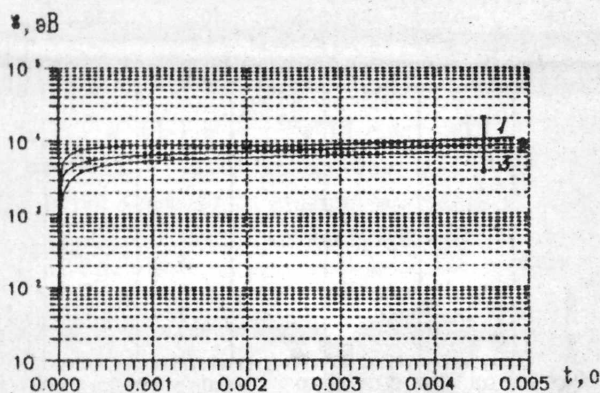
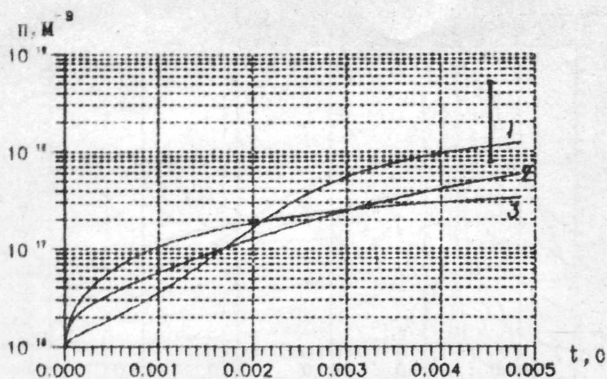


Рис. 7. Результаты моделирования ЭДН в каске для различных силовых линий при давлении водорода в вакуумной камере $5 \cdot 10^{-5}$ мм. рт. ст.

1 - $i = 7.8 \cdot 10^{-2}$ м;

2 - $i = 6.5 \cdot 10^{-2}$ м;

3 - $i = 5.5 \cdot 10^{-2}$ м;

┃ - экспериментальные значения.