

492196
МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

Московское

ордена Ленина, ордена Октябрьской Революции и ордена Трудового
Красного Знамени высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

На правах рукописи

УДК 621.039.533.07

Шабров Никита Вадимович

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ ПЛАЗМОФИЗИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
СЛОЖНЫХ АДИАБАТИЧЕСКИХ ЛОВУШЕК И АНАЛИЗ
ПЕРСПЕКТИВНЫХ ТЕРМОЯДЕРНЫХ СИСТЕМ

01.04.14 - теплофизика и молекулярная физика

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва - 1988

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

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

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук
АРСЕНИН В.В.

кандидат технических наук ОБУХОВ В.А.

Ведущая организация: Ин-т ядерной физики СО АН СССР

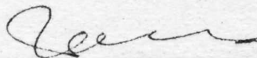
Защита состоится "26" декабря 1988 года в 14⁰⁰
часов на заседании специализированного Совета К.053.15.08
в Московском высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ

Автореферат разослан "___" _____ 1988 г.

Ученый секретарь специализированного
Совета д.т.н., профессор

ГАНЧЕВ В.Г.



Актуальность тем. Разработка новых источников энергии в связи с истощением запасов минерального топлива является одной из наиболее актуальных задач, стоящих перед современной наукой и техникой. В СССР и за рубежом большое внимание уделяется проблеме создания термоядерного реактора.

С точки зрения реакторного использования, одно из ведущих положений в программе УТС занимают открытые адиабатические ловушки. К числу достоинств таких ловушек, в первую очередь, следует отнести высокую допустимую величину β (отношение давления плазмы к давлению магнитного поля), большую простоту и технологичность конструкции по сравнению с замкнутыми системами. Большие временные и материальные затраты по созданию полномасштабных установок требуют широкого развития и использования методов численного моделирования таких систем. Применение численных исследований позволяет обеспечивать достаточно полное физическое и технологическое обоснование проектов энергетических установок, выявить сильные и слабые стороны различных альтернативных вариантов.

Специфика процессов, сложная структура современных адиабатических ловушек делают необходимым разработку математических моделей и численных кодов, которые должны учитывать как многокомпонентность плазмы, так и совокупное влияние на плазму разнообразных кинетических процессов, воздействие внешних факторов.

В данной работе разработан комплекс замкнутых плазмозфизических моделей, учитывающих совокупное влияние основных кинетических процессов и сложную конфигурацию ловушек. Выполнены плазмозфизические исследования перспективных термоядерных систем на основе адиабатических ловушек: генератора нейтронов для технологических испытаний материалов и систем будущих Д-Т реакторов и амбиполярного реактора с $D-^3He$ топливом.

Цель работы.

I. Разработка методов плазмозфизических расчетов открытых амбиполярных ловушек с учетом их сложной конфигурации, многокомпонентности плазмы и совокупности разнообразных

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1492196

Шабров Н.В. Разработка числ

МГТУ
им. Н.Э. Баумана
БИБЛИОТЕКА

кинетических процессов.

2. Создание единой базы таких расчетов в виде системы математического, алгоритмического и программного обеспечения численных экспериментов, ориентированной на серийные советские ЭМ.

3. Широкое многофакторное численное исследование плазмы в сложных адиабатических ловушках с целью установления основных особенностей и закономерностей её поведения.

4. Плазмофизический анализ как существующих, так и проектируемых экспериментальных и перспективных технологических установок, будущих термоядерных реакторов, параметрические исследования и определение областей рабочих режимов.

Научная новизна работы.

1. Впервые создана база для проведения плазмофизических расчетов сложных амбиоплярных ловушек в виде системы математического, алгоритмического и программного обеспечения численных экспериментов, включающей в себя комплекс многофакторных, многокомпонентных численных моделей плазмы и соответствующих численных кодов.

2. Сформулирован общий метод построения моделей плазмы адиабатических ловушек различной степени сложности. Предложено универсальное определение сорта частиц, что позволило более строго подойти к моделированию плазмы, как в нольмерном, так и в одномерном пространственных приближениях.

3. Впервые создана одномерная балансная модель плазмы в амбиоплярной ловушке и на её основе рассчитаны продольные распределения параметров в системе.

4. Впервые проведены численные многопараметрические исследования генератора термоядерных нейтронов на основе адиабатической ловушки с учетом её продольной неоднородности. Рассчитаны основные плазменные характеристики соответствующей установки АДГЕН.

5. Впервые выполнен анализ влияния неизотермичности компонентов топливной смеси на энерговыделение и нейтронное выделение в $D-^3He$ топливном цикле. Рассмотрена и исследована детальная многокомпонентная модель плазмы в открытом термоядерном реакторе с $D-^3He$ топливной смесью.

Научная и практическая ценность работы. Предложен общий метод формулирования численных моделей плазмы в амбиполярных ловушках, ориентированный на решение широкого класса задач по удержанию плазмы в таких устройствах. На его основе создана система математических моделей и соответствующих численных кодов для изучения плазмы. Применение данной системы в исследованиях по УТС необходимо при обработке результатов экспериментов, планировании исследований, разработке проектов новых установок и при проведении работ по концептуальному проектированию термоядерных реакторов. Использование такой системы позволяет повысить информативность экспериментальных исследований и точность концептуального проектирования, сократить сроки проектирования и освоения термоядерных установок. Исследования, выполненные с помощью разработанных численных кодов позволили установить основные закономерности в таких системах, выделить наиболее эффективные режимы работы. Методики расчетов и созданные численные коды были использованы в ИАЭ им. И.В.Курчатова при разработке магнитной системы и обоснования проекта установки АСОНЬ и при разработке проекта адиабатического генератора нейтронов АДГЕН.

На защиту выносятся:

- система математического, алгоритмического и программного обеспечения численных экспериментов по удержанию плазмы в сложных адиабатических ловушках;
- математические модели плазмы амбиполярной ловушки в нольмерном и в одномерном пространственных приближениях и результаты численных исследований таких систем;
- одномерная математическая модель плазмы в генераторе нейтронов на основе сложной адиабатической ловушки и результаты параметрического анализа и оптимизации его характеристик;
- пятикомпонентная нольмерная модель плазмы центральной секции амбиполярного термоядерного реактора с $D-^3He$ и результаты параметрических исследований по этой модели.

Апробация работы. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на Всесоюзной конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород 1987 г.), научно-технических конференциях МВТУ им. Н.Э.Баумана, кафедра Э-8 (Москва, 1985-1987 г.г.), научных семинарах в ИАЭ им. И.В.Курчатова

(Москва, 1982–1988 г.г.) и ИЯФ СО АН СССР (Новосибирск, 1988 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 78 наименований и приложения. Она содержит 110 страниц текста, 53 рисунка и 7 таблиц.

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 проводится анализ математических моделей, используемых для численных исследований плазмы в сложных адиабатических ловушках.

Кратко рассмотрены основные физические процессы в плазме открытых ловушек и известные математические модели для их описания. Рассмотрены методы моделирования плазмы в одимочном пробкотроне. Для описания плазмы в сложных адиабатических системах, в том числе и в амбиполярных ловушках развит общий метод моделирования на основе решения уравнений баланса частиц и энергии для различных сортов частиц выделяемых в плазме ловушки.

$$\frac{dn^{(a)}}{dt} = q_s^{(a)} - q_\ell^{(a)} + \sum_b q_{сн}^{a-b}, \quad (1)$$

$$\frac{d(n^{(a)}E^{(a)})}{dt} = \omega_s^{(a)} - \omega_\ell^{(a)} + \sum_b \omega_t^{a-b} + \sum_b \omega_{сн}^{a-b} \quad (2)$$

Здесь $n^{(a)}$, $E^{(a)}$ – плотность и средняя энергия частиц сорта (a) , q , ω – плотности потоков частиц и энергии, подстрочные индексы обозначают: s – источник частиц и энергии, ℓ – потери, $сн$ – обмен частицами между сортами, t – энергообмен. При необходимости балансные уравнения могут быть дополнены слагаемыми, описывающими другие

специфические потоки частиц и энергии.

Предложено универсальное понятие элементарного сорта частиц, что позволило существенно уточнить расчетные схемы балансных моделей и предоставило возможность развивать модели плазмы амбиполярных систем в одномерном пространственном приближении. Исходными для расчетов при таком моделировании являются параметры магнитной системы ловушки, систем инжекции и нагрева, вакуумной системы и т.п., а определяют плазменные характеристики всех выделенных сортов частиц.

На базе предложенного метода рассмотрена процедура формирования математических моделей плазмы различной степени сложности, проведена систематизация возможных моделей. Сформировано пять моделей (M1 – M5) с постепенно упрощающейся структурой. Выбор конкретной модели определяется требуемой степенью детализации изучаемых процессов, располагаемой реальной информацией о них, а также возможностью реализации на соответствующих ЭВМ.

Дан обзор работ по численному моделированию плазмы в амбиполярных ловушках. Показано, что большинство известных моделей основывается на сравнительно грубых расчетных схемах и согласно приведенной систематизации соответствует моделям низкого уровня (M5). Поэтому дальнейшее развитие численных исследований в открытых адиабатических ловушках требует создания моделей с более детальными балансными схемами.

Глава 2 посвящена разработке математических моделей и численных кодов для описания плазмы амбиполярной ловушки.

Разработаны детальные модели плазмы, отличающиеся развитой структурой внутренних связей между сортами частиц, в нульмерном (M4-0) и в одномерном (M4-I) по продольной координате системы пространственных приближениях. Модели уровня M4 в амбиполярной ловушке описывают четыре сорта частиц: ионы и электроны центральной секции и ионы и электроны затычки. При этом учитывается, что и ионы и электроны из центральной секции могут частично проникать в затычки.

Модели учитывают следующие взаимосвязанные физические процессы: наполнение и нагрев плазмы пучками быстрых атомов, кулоновское рассеяние частиц и их потери из системы, энергообмен и обмен частицами между сортами, процессы ионизации и перезарядки пучка нейтралов и фоновый газ на плазме,

наполнение центральной секции вдувом нейтрального газа, формирование в плазме амбиопольного потенциала и т.п.

Для численного исследования развитых моделей разработана система алгоритмического и программного обеспечения в виде набора нескольких базовых модулей и ряда вспомогательных программ для описания частных процессов.

Выполнены широкие параметрические расчеты плазмы амбиопольной ловушки в режиме работы экспериментальной установки. Основное внимание уделялось исследованию влияния различных внешних факторов на характеристики плазмы. Рассмотрено влияние тока и энергии инжекции в запирающие пробокотроны, давления наполняющего газа в центральной секции, пробочного отношения R , соотношения объемов центрального и запирающего пробокотронов. Определены основные закономерности и особенности воздействия этих факторов. Показано, что для рассматриваемого режима в довольно широком диапазоне изменения внешних характеристик справедливы следующие соотношения между параметрами ловушки.

$$E_{ip} / E_s = 0.94 \div 1, \quad (3)$$

$$T_{ep} / E_{ip} = 0.012 \div 0.025, \quad (4)$$

$$T_{ec} / T_{ep} = 0.4 \div 0.5, \quad (5)$$

$$T_{ic} / T_{ec} = 0.6 \div 0.75, \quad (6)$$

$$\varphi_c / \varphi_p = 0.65 \div 0.8 \quad (7)$$

Здесь E — средняя энергия, T — температура, φ — амбиопольный потенциал, индексация s, p характеризует параметры в центральной и запирающей секциях, e, i — электронную и ионную компоненты. Детально изучен энергетический баланс в системе. Показано, что дополнительные каналы перераспределения энергии в ловушке между сортами частиц, выделенные с помощью развитого в главе I метода и не учтенные в балансах простых моделей, могут оказаться весьма существенными. Для ионов,

удерживаемых в центральной секции, они, например, составляют около 50 % энерговклада.

Проделаны многофакторные расчеты плазмы установки ТХМ (*Phys. Rev. Lett.* - 1980 - V. 44. - № 7. - pp II32 - II35). Произведено сравнение расчетных данных с результатами экспериментов. Показано, что созданные численные коды обладают достаточной точностью. Среднеквадратичное отклонение по восьми основным расчетным параметрам в модели М4-І составляет 0,11. Кроме того, они отличаются большей информативностью, в частности, позволяют проводить оценки МПД-устойчивости, установить существенную разницу в температурах электронов центральной и запирающих ячеек (5), рассчитать продольные распределения параметров и выделить особенности этих распределений. На рис. 1 приведены продольные распределения плотностей частиц различных сортов по модели М4-І для одного из вариантов счета.

В главе 3 проводятся численные исследования предложенного в ИАЭ им. И.В.Курчатова (И.Н.Головин и сотрудники) адиабатического генератора нейтронов (АДГЕН). Их цель - физобоснование и параметрический анализ генератора І4 МэВ-ных нейтронов потребного для ускоренных технологических испытаний материалов первой стенки, blanketа и других систем будущих Д-Т реакторов синтеза. Проблема обеспечения высокого ресурса работы первой стенки, подвергающейся воздействию мощных нейтронных потоков, в настоящее время является одной из актуальных задач УТС.

Ранее было показано, что из существующих типов термоядерных устройств наиболее приемлемыми в качестве основы для такого источника нейтронов являются открытые магнитные ловушки (Д.Д.Рютов и сотрудники).

АДГЕН представляет собой аксиально-симметричную открытую ловушку с двумя каспами на торцах. В центральную секцию которой с целью реализации идеи "концентратора" нейтронного выделения (Д.Д.Рютов) осуществляется "косая" инжекция пучков быстрых атомов. В результате этого в ловушке формируется немонотонные, "двухгорбые" профили амбиполярного потенциала, плотности и эмиссии нейтронов.

Для проведения плазмофизических расчетов было

выполнено детальное численное моделирование магнитной системы установки и разработана одномерная балансная модель плазмы в центральной секции АДГЕНА. Эта модель включает в себя описание трех сортов частиц: горячих и холодных ионов и электронов. При этом кинетика горячих ионов описывается уравнением Фоккера-Планка.

Модель была реализована в виде численного кода АИС, основой для которого послужило развитое в главе 2 алгоритмическое и программное обеспечение.

Расчеты по коду были направлены на поиск режимов работы АДГЕНА с наименьшими величинами нейтронных потоков на первую стенку - S_n при максимальной эффективности устройства - η_r . В предположении "длинной" и "тонкой" плазмы

$$S_n(z) = \frac{n_{in}^2(z) \langle \sigma_{DT} \rangle E_n r_n^2(z)}{8 r_1(z)}, \quad (8)$$

где n_{in} - плотность горячих ионов, $r_n(z)$, $r_1(z)$ - локальные радиусы плазмы и первой стенки, $\langle \sigma_{DT} \rangle$ - скорости реакции Д-Т, $E_n = 14.1$ МэВ, а

$$\eta_r = W_n / W_s, \quad (9)$$

где W_n - мощность, уносимая нейтронами, W_s - мощность инжекции.

На величины S_n и η_r определяющее влияние имеют следующие факторы: угол и энергия инжекции быстрых атомов, плотность фоновго газа в ловушке, температура электронной компоненты. Исследования влияния угла инжекции - θ_s позволили определить, что в АДГЕНЕ создание "концентратора" нейтронной мощности наиболее эффективно при $\theta_s = 45^\circ - 55^\circ$. При обеспечении в ловушке плотности плазмы на уровне 10^{20} м^{-3} и таких углах инжекции $S_n = 3 + 4 \text{ МВт/м}^2$ (рис.2). Также было показано, что при $\theta_s < 70^\circ$ в ловушке накапливается достаточное количество холодных ионов для подавления кинетических дрейфово-конусных неустойчивостей, а при углах инжекции близких к 60° в АДГЕНЕ формируются неблагоприятные условия с точки зрения развития желобковых неустойчивостей.

Для АДГЕНА критичными по ресурсу работы и теплонапряженности первой стенки являются процессы перезарядки плазмы

на пучке инжекции и на фоновом газе. Они ограничивают снизу энергии инжекции быстрых атомов в ловушку E_s интервалом $100 + 200$ кэВ и предъявляют жесткие требования к вакуумной системе. Плотность фонового газа n_f не должна существенно превышать 10^{15} м^{-3} .

Исследования влияния "холодных" электронов показали, что уменьшение T_e приводит к дальнейшему усилению мощности нейтронных потоков в "концентраторе" относительно центрального сечения ловушки, но требует существенного увеличения мощности инжекции, а это ведет к снижению эффективности генерации (9).

По результатам расчетов рекомендованы следующие основные параметры для установки АДГЕН: $W_s = 39$ МВт, $E_s = 100$ кэВ, $\theta_s = 45^\circ$, $n_f = 10^{15} \text{ м}^{-3}$, $B = 3$ Тл, $R = 4$. Ожидаемый нейтронный поток на первую стенку оценивается при этом в 3.3 МВт/м^2 .

В главе 4 проводится общий анализ $D-^3\text{He}$ плазмы в системах с магнитным удержанием и расчеты амбиполярного термоядерного реактора на $D-^3\text{He}$ топливе. В числе преимуществ такого топлива при сравнении со смесью $D-T$ в первую очередь выделяется существенно меньшая мощность нейтронных потоков, что влечет за собой возможное решение таких важнейших проблем, как выбор материалов первой стенки, снижение суммарной радиоактивности и др. При этом обеспечение $D-^3\text{He}$ термоядерных реакторов топливом может быть осуществлено в будущем за счет выявленных недавно значительных запасов ^3He на поверхности Луны (*Fus. Technol.-1986.-V.10.- № 1.-pp. 167-170*).

В работе проанализированы особенности $D-^3\text{He}$ топливного цикла. Показано, что условия осуществления реакции $D-^3\text{He}$ таковы, что значительная доля энергии синтеза уносится с излучением, причем эта доля увеличивается с уменьшением β , и при $\beta < 0.11$ во всем диапазоне температур потери с излучением превышают энергосодержание (рис. 3) ($T_e = T_d = T_{ne}$, $n_d = n_{ne}$). Поскольку для токамаков столь большие β пока не достигнуты, наиболее приемлемыми для систем с магнитным удержанием в качестве реактора с $D-^3\text{He}$ топливом представляются открытые ловушки, как устройства, в принципе допускающие большие значения β . Кроме того продукты синтеза

в реакции $D-^3He$ — заряженные частицы, и их энергия может быть эффективно преобразована в электрическую на торцах открытой системы благодаря прямому преобразованию.

Анализ $D-^3He$ топливного цикла также показал, что выби-
рая соотношения плотностей и температур D и 3He в топливной смеси, можно добиться уменьшения нейтронных потоков за счет подавления $D-D$ реакции. Так, при $n_{He}/n_D = 5$, $T_{He}/T_D = 5$ мощность нейтронного потока на два порядка меньше чем при $n_{He} = n_D$, $T_{He} = T_D$. При этом общее удельное энерговы-
деление снижается лишь в 4 раза.

Разработана пятикомпонентная многофакторная балансная модель $D-^3He$ плазмы в центральной секции амбиполярного реак-
тора с термобарьером. Пять рассматриваемых в модели сортов частиц это — электроны, ионы топлива — дейтерий и гелий — 3 и продукты реакций синтеза — протоны и α — частицы. Модель учитывает следующий комплекс физических процессов: инжекция и нагрев плазмы пучками быстрых атомов, возможность ионно-
циклотронного и электронноциклотронного нагревов, продольные потери частиц из ловушки, энергообмен между сортами, потери энергии с излучением, энерговыделение в результате реакций синтеза, уход ионов топлива в реакцию и в термобарьеры.

Исследования по этой модели позволили установить зависи-
мость между соотношением токов инжекции компонентов топлив-
ной смеси и их плотностями в плазме. Анализ полученного по модели энергобаланса в реакторе показал определяющее влия-
ние на параметры плазмы коэффициента f_{out} , характеризую-
щего долю энергии продуктов синтеза не удерживаемых в ло-
вушке. Выявлены зависимости параметров плазмы, энерговыде-
ления, нейтронных потоков от коэффициента f_{out} . Показано,
что в исследуемом режиме работы реактора ($n_{He} = n_D$,
 $T_{He} = T_D$) наиболее благоприятные условия для синтеза
 $D-^3He$ реализуются при $f_{out} = 0.6$. Плазмозфизические расчеты
с различными параметрами инжекции, коэффициентами f_{out} ,
параметрами запирающей и термобарьерной ячеек и т.п. привели
к выбору базового варианта с энергией синтеза 1018 МВт при
объеме плазмы в центральной секции в 310 м^3 . Отмечена высо-
кая эффективность амбиполярного реактора с $D-^3He$ топливом
и его малая радиоактивность (нейтронный поток на первую
стенку около 0.03 МВт/м^2 , что почти в 100 раз меньше

чем для Д-Т реактора).

В расчетах реализован выход реактора на режим работы с "зажиганием" в центральной секции, показан сценарий формирования такого режима.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Решена новая актуальная научная задача, имеющая важное значение для программы управляемого термоядерного синтеза, разработаны численные методы исследования и проделан анализ перспективных термоядерных систем: адиабатического генератора нейтронов и амбиполярного реактора с $D-^3He$ топливом.

2. Предложен общий метод формирования численных моделей различной степени приближения и сложности, предназначенных для описания плазмы в амбиполярных системах и ориентированных на решение широкого класса плазмофизических задач. На основе данного метода разработана база для проведения нольмерных и одномерных балансных и кинетических расчетов сложных адиабатических ловушек в виде системы математического, алгоритмического и программного обеспечения численных экспериментов.

3. Разработана нольмерная балансная модель плазмы амбиполярной ловушки, отличающаяся от существующих развитой структурой внутренних связей между сортами частиц и детальным учетом перераспределения частиц и энергии между ними. По этой модели проведены широкие параметрические расчеты, на основании которых сформулирован ряд упрощенных скейлингов для оценок энергетических характеристик плазмы, установлены основные закономерности.

4. Впервые разработана численная модель плазмы амбиполярной ловушки, описывающая пространственную неоднородность параметров вдоль системы. Результаты расчетов позволяют выявить особенности продольных распределений, провести оценку МГД-устойчивости и отличаются большей точностью и информативностью среди подобного класса задач.

Показано, что созданные численные коды позволяют достаточно корректно описать удержание плазмы в амбиполярных ловушках и могут быть использованы для прогноза и анализа результатов экспериментов, проектирования новых устройств

и разработки концептуальных проектов.

5. С помощью разработанных численных кодов исследована возможность создания мощного генератора нейтронов на основе адиабатической ловушки. Проведен многопараметрический численный анализ модели соответствующей установки АДГЕН. На основе расчетов сформулировано физическое обоснование установки АДГЕН. Исследовано влияние процессов перезарядки, воздействие дополнительного охлаждения электронов и угла "косой" инжекции на эффективность генерации и возможность получения наибольших потоков нейтронов. Оценены потребные вакуумные условия в системе и параметры инжекции, определен необходимый отягочивающий эффект системы запас к подавлению МД-неустойчивостей. Показано, что при углах инжекции меньших 70° в ловушке формируются условия, способствующие подавлению кинетических дрейфово-конусных неустойчивостей.

6. Впервые проделан анализ по выбору оптимальных режимов работы термоядерного реактора с $D-^3He$ топливным циклом с различными соотношениями температур и плотностей компонентов в топливной смеси. Показана наибольшая перспективность амбиполярного реактора для осуществления $D-^3He$ управляемого синтеза. Проведены широкие многофакторные плазмофизические расчеты амбиполярного реактора с $D-^3He$. Исследовано влияние параметров инжекции и коэффициента f_{out} на характеристики реактора. В расчетах реализован вариант режима работы с "зажиганием". Указана малая радиоактивность и высокая эффективность такого реактора.

7. Созданные численные коды, методы и результаты расчетов были использованы в ИАЭ им. И.В.Курчатова при разработке магнитной системы и физическом обосновании экспериментальной аксиально-симметричной ловушки и разработке проекта адиабатического генератора нейтронов.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Магнитная система аксиально-симметричной открытой ловушки / И.Н. Головин, Д.Л. Полетаев, В.И. Хвеськ, Н.В. Шабров -М., 1986. - 12 с. (Препр.) Ин-т атомн. энергии № 4335/6).

2. Хвеськ В.И., Шабров Н.В. Моделирование многокомпонентной плазмы в адиабатических ловушках // Атомная энергия. - 1988. - Т.65, вып. 5.-С. 330-334.

3. Хвеськи В.И., Шабров Н.В. Математическое моделирование процессов в амбиоплярных ловушках // Атомная энергия.- 1988. -Т.65, вып.5.- С.334-339.

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

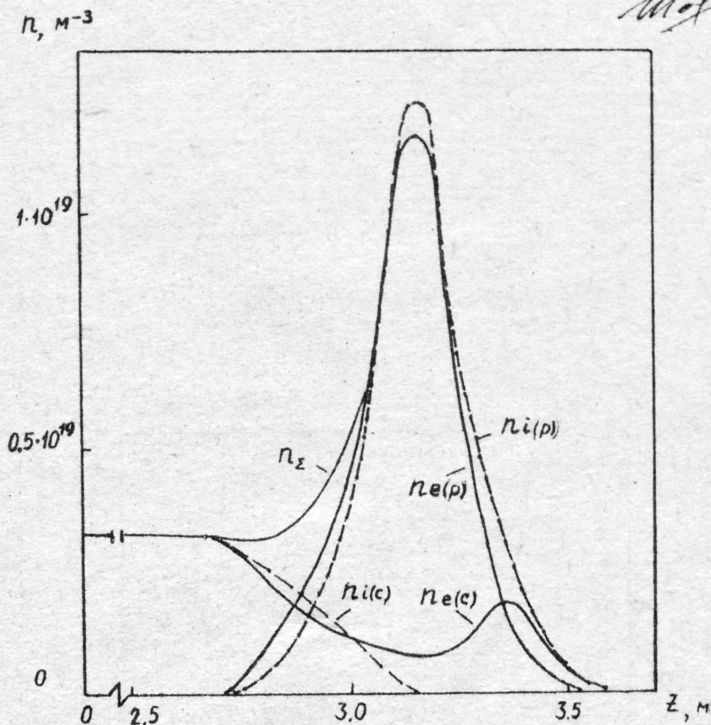


Рис.1. Распределение концентраций частиц различных сортов вдоль амбиоплярной ловушки по модели М4-1

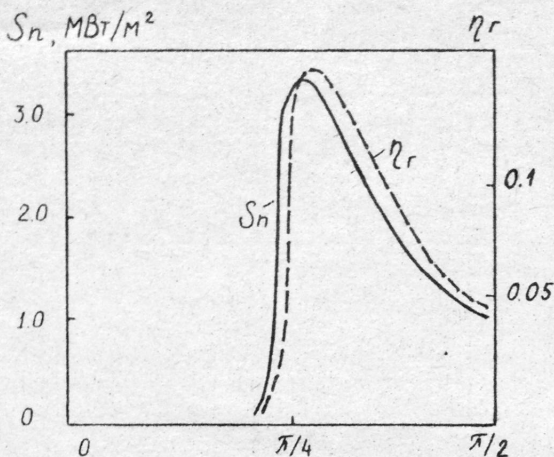


Рис. 2. Возможные нейтронные потоки на первую стенку и эффективность генерации при различных углах инжекции ($n = 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $\tilde{r}_n = 0.3 \text{ м}$, $\tilde{r}_i = 0.39 \text{ м}$, $E_s = 100 \text{ кэВ}$, $n_\phi = 10^{16} \text{ м}^{-3}$)

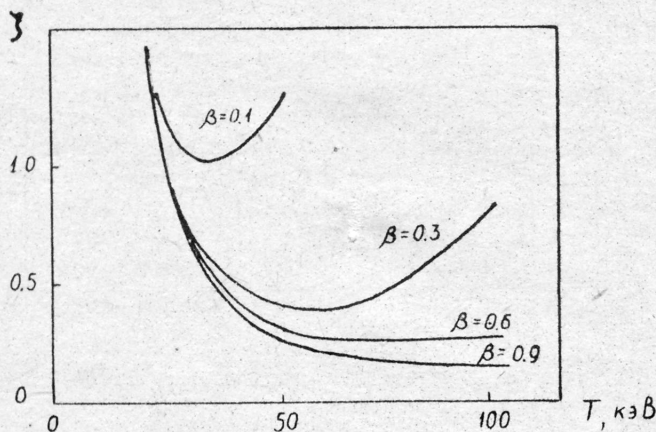


Рис. 3. Доля потерь энергии излучением в общем энерговыделении D-T синтеза в зависимости от температуры при $B=5 \text{ Тл}$