

М 455062

О 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, 533.9.07

Ершов Андрей Александрович

РАЗРАБОТКА ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ И ИССЛЕДОВАНИЕ
КИНЕТИКИ ПЛАЗМЫ АДИАБАТИЧЕСКИХ МАГНИТНЫХ
ЛОВУШЕК

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 - 1986

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
КОЗЛОВ Н.П.

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

кандидат технических наук

ВАСИЛЬЕВ Н.Н.

Ведущая организация: Ин-т ядерной физики СО АН СССР

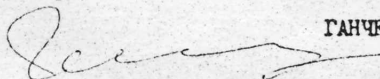
Защита состоится " _____ " _____ 1986 года в _____
часов на заседании специализированного Совета К.053.15.08
в Московском высшем техническом училище имени Н.Э.Баумана
по адресу: 107005, Москва, 2-я Бауманская ул., д.5.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МВТУ

Автореферат разослан " _____ " _____ 1986 г.

Ученый секретарь специализированного

Совета к.т.н., доцент



ГАНЧЕВ Б.Г.

МД-63154. Подписано к печати 9.09.86 г. Объем 1.0 п.л. Тир.100
экз. Типография МВТУ им. Н.Э.Баумана

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. В СССР большое внимание уделяется проблеме создания термоядерного реактора. Наибольшие успехи по длительному удержанию горячей плазмы к настоящему времени достигнуты на установках токамак, однако из-за ряда присущих им недостатков токамаки не являются единственной исследуемой системой, претендующей на роль термоядерного реактора. Весьма привлекательные качества открытых адиабатических ловушек, создание новой концепции – амби-полярных систем, а также значительный прогресс в экспериментальных исследованиях выдвинули их на ведущие позиции в программе УТС.

Большие временные и материальные затраты по созданию полномасштабных термоядерных установок, сложность и многообразие процессов в плазме делают необходимым широкое развитие и применение методов численного исследования таких систем. Эти методы могут плодотворно применяться как на стадиях разработки экспериментальных установок и концептуальных проектов, так и на стадии детального анализа проводимых экспериментов.

М455062
Специфика процессов и сильная неравновесность компонент плазмы в адиабатических магнитных ловушках требуют для корректного численного моделирования создания математических моделей и численных кодов, основанных на решении системы кинетических уравнений, которая должна учитывать как многокомпонентность плазмы, так и совместное воздействие на плазму целого комплекса взаимосвязанных кинетических процессов. Из-за больших трудностей полного решения такой системы до настоящего времени численное моделирование, в основном, велось по сравнительно простым одно- или двумерным фоккер-планковским моделям, не учитывавшим всей совокупности кинетических процессов. В данной работе разработана система математических моделей и выполнено численное исследование удержания плазмы в адиабатических ловушках с учетом совокупного влияния основных кинетических процессов.

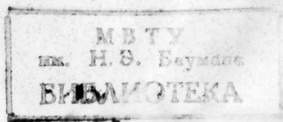
Работа выполнялась по хозяйственным 30884-81 и 30898-84 с ИАЭ им. И. В. Курчатова в соответствии с Координационным планом АН СССР по проблеме "Физика плазмы" и планом научно-исследовательских работ МВТУ им. Н. Э. Баумана и содержит результаты численных исследований отдельных адиабатических ловушек. Результаты работы могут служить основой для создания методов расчета сложных многопробочных амби-полярных ловушек.

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1455062

Ершов А. А. Разработка чисел



Цель работы.

1. Разработка основ плазмозитических расчетов открытых ловушек с магнитными пробками в приближении прямоугольной магнитной ямы на базе двумерного нестационарного нелинейного кинетического уравнения Фоккера-Планка с учетом многокомпонентности плазмы и совокупности разнообразных кинетических процессов.
2. Создание единой базы расчетов в виде системы математического, алгоритмического и программного обеспечения (МАПО) численных экспериментов, ориентированной на серийные советские ЭЕМ типа БЭСМ-6, ЕС-1060, ЕС-1040.
3. Широкое численное исследование удержания плазмы в ловушках с магнитными пробками с целью установления закономерностей и определения влияния как отдельных кинетических процессов, так и их совокупности на удержание плазмы в ловушке.
4. Комплексный многофакторный параметрический анализ удержания плазмы как в существующих экспериментальных установках, так и в проектируемых термоядерных реакторах.

Научная новизна работы.

1. Впервые разработаны основы и создана база плазмозитических расчетов адиабатических магнитных ловушек в виде системы МАПО численных экспериментов, включающей ряд одно- и многокомпонентных численных моделей и кодов, основанных на решении двумерного нестационарного нелинейного уравнения Фоккера-Планка и в комплексе учитывающих основные кинетические процессы в плазме открытых ловушек.
2. Впервые создана математическая модель кинетики ионов в ловушке с магнитными пробками с учетом неадиабатичности их движения и на ее основе проведен детальный численный анализ удержания плазмы в открытой ловушке.
3. Впервые на основе модели с неадиабатичностью создан 3-х компонентный численный код, описывающий удержание α -частиц в центральной секции амбипольного реактора и с его помощью выполнен параметрический анализ кинетики α -частиц в термоядерном реакторе.
4. Впервые разработаны и построены одно- и многофакторные численные коды, одновременно учитывающие целый ряд кинетических процессов, и на их основе выполнен комплексный многофакторный параметрический анализ результатов экспериментальных исследований на установке 2Х11В.

Научная и практическая ценность работы. Создана система МАПО численных экспериментов, предназначенная для решения самого широ-

кого класса задач по удержанию плазмы в открытых ловушках. Применение данной системы в исследованиях по УТС необходимо при анализе имеющихся экспериментальных данных, прогнозе работы новых установок и планировании экспериментов на них, проектировании установок следующего поколения, а также при проведении работ по концептуальному проектированию термоядерных реакторов. Использование системы МАПО позволяет повысить информативность результатов экспериментов и точность концептуального проектирования, сократить сроки проектирования и освоения термоядерных установок.

Разработанные методы плазмофизических расчетов и выполненный численный анализ позволили глубже понять физику удержания плазмы в открытых ловушках и установить ряд закономерностей удержания плазмы. Методика расчета и созданные численные коды были использованы в ИАЭ им. И. В. Курчатова при разработке обоснования на проект установки ОГРА-5.

На защиту выносятся:

- система МАПО численных экспериментов по удержанию плазмы в открытых ловушках;
- математические модели классического удержания плазмы в одно- и двухкомпонентном приближении и результаты численного моделирования классического удержания;
- математическая модель кинетики ионов с учетом неадиабатичности их движения и результаты численного исследования удержания плазмы с учетом этого процесса;
- 3-х компонентная модель удержания α -частиц в центральной секции амбиполярного реактора и результаты параметрического анализа кинетики α -частиц в термоядерном реакторе;
- одно- и многофакторные численные коды и результаты комплексного параметрического анализа удержания плазмы в ловушке 2XIIВ.

Апробация работ. Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались на Всесоюзной конференции по физике плазмы и УТС (Звенигород, 1982 г.), совещании экспертов МАГАТЭ по открытым ловушкам (Москва, 1984 г.), научно-технических конференциях МВТУ им. Н. Э. Баумана, кафедра Э-8 (Москва, 1982-83 г.г.), научных семинарах в ИАЭ им. И. В. Курчатова (Москва, 1980-85 г.г.) и Инф СО АН СССР (Новосибирск, 1984 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 5 печатных работ.
Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения,

пяти глав с выводами, заключения и приложения. Она содержит 117 страниц текста, 4 таблицы, 68 рисунков и список литературы из 77 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, поставлена цель работы, кратко изложено содержание диссертации, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносимые на защиту.

В первой главе анализируются математические фоккер-планковские модели, использовавшиеся для численного моделирования удержания плазмы в адиабатической магнитной ловушке.

Кратко рассмотрены основные кинетические процессы, определяющие вид функций распределения f_α компонент плазмы ($\alpha = e, i$) и продольные потери частиц из ловушки и предложена модификация уравнения Фоккера-Планка (УФП), описывающая совокупное влияние комплекса этих процессов на кинетику плазмы в ловушке

$$\frac{df_\alpha}{dt} = L_{FP}(f_\alpha) + L_M(f_\alpha) + L_{RF}(f_\alpha) + S_\alpha. \quad (I)$$

Здесь действие кулоновского рассеяния учитывается оператором Фоккера-Планка $L_{FP}(f_\alpha)$, а неадиабатичности и неустойчивости — операторами $L_M(f_\alpha)$ и $L_{RF}(f_\alpha)$, влияние элементарных процессов (например, ионизации и перезарядки) описывается членом S_α , представляющим собой сумму источников и стоков частиц в пространстве скоростей.

Проведен анализ различных приближений при записи УФП и на базе этого рассмотрены основные математические модели, в которых УФП решалось как конечно-разностными методами, так и методами Монте-Карло. Показано, что большинство моделей основывается на одно- или двумерном УФП, то есть учитывает только классическое кулоновское рассеяние и не позволяет корректно описать удержание плазмы в реальной экспериментальной установке, поэтому дальнейшее развитие методов численного анализа открытых адиабатических ловушек требует создания многофакторных моделей, которые бы в комплексе и детально учитывали одновременное воздействие основных кинетических процессов на удержание плазмы.

Глава 2 посвящена вопросам создания и отработки системы математического, алгоритмического и программного обеспечения (МАПО) численных экспериментов, позволяющей решать УФП для самого широко-

го класса задач по удержанию компонент плазмы в адиабатической ловушке.

Сформулирован ряд требований, которым должна удовлетворять система МАПО — работоспособность, надежность и точность результатов, гибкость, экономичность и др.

Для классической модели ловушки с магнитными пробками рассмотрены основные упрощающие предположения (приближение "прямоугольной ямы" и изотропных потенциалов Розенблюта $g_a(v)$ и $h_a(v)$) и на основе двумерного нестационарного нелинейного УЧП построена математическая модель однокомпонентной плазмы. Детально описаны примененный для решения УЧП конечно-разностный метод дробных шагов со счетом на установление, разработанный алгоритм численного счета и его программная реализация — код TRAP-I.

Представлены результаты тестирования и отладки кода и системы МАПО, проведенных на задачах релаксации и классического удержания однокомпонентной плазмы. Показано хорошее согласие полученных численных данных с аналитическими оценками и результатами расчетов других авторов.

В главе 3 рассматривается двухкомпонентная модель плазмы адиабатической ловушки и приводятся результаты численного исследования классического удержания, то есть удержания, когда потери плазмы из ловушки и энергообмен между ее компонентами определяются только кулоновскими столкновениями заряженных частиц.

Большое различие во временных масштабах изменения f_i и f_e , необходимость дополнительных итераций для определения амбиполярного потенциала Φ , а также то, что средняя скорость электронов намного превышает среднюю скорость ионов, представляют значительные трудности при совместном решении УЧП для ионов и электронов на современных ЭВМ. Для упрощения задачи в работе построена модель 2М, где считается, что в каждый момент времени электроны имеют максвелловское распределение, а их параметры определяются из уравнений баланса частиц и энергии

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} = L_{sp} [f_i, g_i(f_i, f_e), h_i(f_i, f_e)] + S_i, \quad (2)$$

$$f_e = n_e \left(\frac{m_e}{2\pi T_e} \right)^{3/2} \exp \left(-\frac{m_e v^2}{2 T_e} \right), \quad (3)$$

$$\frac{dn_e}{dt} = J_{IN\sigma} - \frac{n_e}{\tau_p}, \quad (4)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{3}{2} n_e T_e \right) = \frac{n_i (E_i - \frac{3}{2} T_e)}{\tau_D} - (e\Phi + T_e) \frac{n_e}{\tau_p}, \quad (5)$$

$$\frac{d n_i}{d t}(R, \Phi) = \frac{d n_e}{d t}(R, \Phi). \quad (6)$$

$$\sin^2 \theta_{ic} = \frac{1 + 2 e \Phi / (m_i v^2)}{R}. \quad (7)$$

Здесь J_{inj} — объемная плотность тока инжекции, R — пробочное отношение, τ_D — время удержания электронов по Пастухову, τ_D — время обмена энергией по Спитнеру, уравнение (6) служит для определения величины самосогласованного амбиполярного потенциала, а формула (7) описывает границу области удержания ионов в пространстве скоростей (θ_{ic} — значение угла потерь при скорости v).

Модель была реализована в виде численного кода TRAP-2M, где решение задачи находилось путем счета на установление. На каждом шаге по времени уравнение (2) решалось методом дробных шагов, для определения Φ использовалась итеративная процедура, а интегрирование уравнений (4) и (5) проводилось по методу Эйлера.

Тестирование кода проводилось на задаче релаксации. Полученные результаты хорошо согласуются с аналитическими оценками, а несохранение числа ионов и средней энергии системы для различных вариантов расчетов не превышает 5–13%.

В результате моделирования классического удержания было выявлено влияние электронов и амбиполярного потенциала на вид f_i и параметры плазмы, показано, что с увеличением R или энергии инжекции E_{inj} улучшается удержание плазмы и возрастают значения n , T_e и Φ , причем изменение E_{inj} практически не влияет на величину отношений $e\Phi/T_e$ и E_i/T_e , а увеличение R приводит к небольшому росту $e\Phi/T_e$ и падению E_i/T_e . Результаты моделирования классического удержания для ловушки с $R = 2 - 20$ при перпендикулярной инжекции $\theta_{inj} = 90^\circ$ можно представить в виде

$$E_i \approx E_{inj}, \quad e\Phi/T_e \approx 4.5 - 5, \quad E_i/T_e \approx 9 - 15, \quad (8)$$

$$\eta \tau_{p, class} \approx 3.357 \cdot 10^{-4} \frac{\sqrt{m_i}}{\Lambda e i} E_i^{3/2} \lg \frac{R}{1 + e\Phi/E_i}. \quad (9)$$

Здесь $\eta \tau_{p, class}$ — параметр удержания частиц в $\text{см}^{-3}\text{с}$; $\Lambda e i$ — кулоновский логарифм; m_i — масса иона в а.е.м.; E_i — средняя энергия ионов в кэВ.

Расчеты при углах инжекции $\theta_{inj} \neq 90^\circ$ показали, что при этом в медианном сечении ловушки формируется "двугорбое" распределение ионов, которое позволяет получить немонокотное распределение плотности плазмы вдоль оси ловушки. При уменьшении θ_{inj} ухудшается

удержание плазмы и падают значения E_i , n , T_e , Φ и $e\Phi/T_e$. Величина E_i/T_e при этом возрастает.

Для учета наряду с ионизацией атомов нейтрального пучка и перезарядки ионов плазмы на инжектируемых нейтралах была создана модель 2MB, где уравнение для f_i записывалось так

$$\frac{\partial f_i}{\partial t} = L_{FP} [f_i, g_i(f_i, f_e), h_i(f_i, f_e)] + S_{ION} + S_{CX} - L_{CX}, \quad (I0)$$

$$S_{ION} = \langle v \rangle_{ION} f_a = \frac{J_{TRP}}{n_a} f_a, \quad S_{CX} = \langle v \rangle_{CX}^i f_a = \frac{J_{CX}}{n_a} f_a, \quad (II)$$

$$L_{CX} = \langle v \rangle_{CX}^a f_i = \frac{J_{CX}}{n_i} f_i.$$

Здесь S_{ION} , S_{CX} - источники ионов, образующихся при ионизации и перезарядке пучка нейтралов; L_{CX} - сток перезаряжающихся ионов; f_a - распределение нейтралов в пучке; $\langle v \rangle_{ION}$, $\langle v \rangle_{CX}^i$, $\langle v \rangle_{CX}^a$ - средние частоты ионизации и перезарядки на ионах и атомах; J_{TRP} , J_{CX} - объемные плотности токов ионизации и перезарядки.

Моделирование с учетом перезарядки проводилось для различных значений $J_{CX}/J_{TRP} = \langle v \rangle_{CX}^i / \langle v \rangle_{ION}$ и показало, что с увеличением J_{CX}/J_{TRP} f_i подстраивается под распределение источника и $E_i \rightarrow E_{I\Omega}$. Остальные параметры плазмы при росте J_{CX}/J_{TRP} сначала несколько уменьшаются, а затем начинают возрастать, причем наиболее сильно меняются значения nT_p и n . Величина nT_p в диапазоне $J_{CX}/J_{TRP} \approx 0-3$ может быть представлена так

$$nT_p = nT_{p,CLAS} \Delta_{CX}, \quad \Delta_{CX} = \frac{1.585(J_{CX}/J_{TRP}) + 1.25}{J_{CX}/J_{TRP} + 1.25}, \quad (I2)$$

где $nT_{p,CLAS}$ рассчитывается по формуле (9).

Четвертая глава посвящена дальнейшему развитию системы МАПО с целью учета наряду с кулоновскими столкновениями и влияния неадиабатичности движения заряженных частиц (НА), для чего в основу модели положено модифицированное УФП (I), где $L_{\mu}(f_i) = \frac{\partial}{\partial \mu} D_{\mu} \frac{\partial f_i}{\partial \mu}$.

Здесь в соответствии с работой Чирикова (Физ.плазмы, 1978, т.4, в.3, с.521-541) считается, что НА приводит к диффузии частиц в области стохастического движения, где изменения магнитного момента частицы μ носят случайный характер, а значения коэффициента диффузии D_{μ} рассчитываются для ловушки с "квадратичным" магнитным полем.

Однокомпонентное моделирование с учетом НА проводилось для различных значений Z_{max} , R , B_{00} , $E_{I\Omega}$, m_i и Z_C , где $2Z_{max}$ - расстояние между пробками ловушки, B_{00} - магнитное поле в центре

системы, Z_c — радиус дрейфовой поверхности ионов в медианном сечении, и показало, что с увеличением R , E_{INJ} , Z_c , m_i и уменьшением Z_{MAX} и B_{00} потери ионов из-за НА возрастает. С учетом НА нарушается известный скейлинг $n\tau_p \sim E_{INJ}^{3/2} \lg R$ — зависимость $n\tau_p$ от R становится немонотонной с максимумом при $R \approx 5-7$, а $n\tau_p$ от E_{INJ} — более пологой, чем $E_{INJ}^{3/2}$, причем разница в значениях $n\tau_p$ с учетом и без учета НА для больших R и E_{INJ} достигает 1-2 порядков величины. НА сильно изменяет вид f_i в области стохастичности и для $R \geq 7-10$ из-за значительного уменьшения числа быстрых ионов $E_i \approx E_{INJ}$ и даже несколько меньше.

Численные расчеты показывают, что для ловушки с $R \leq 5$, $E_{INJ} \leq 20$ кэВ, $Z_{MAX} \geq 0.4-0.5$ м, $B_{00} \geq 1.4-1.6$ Тл и $Z_c \leq 0.2$ м потери протонов из-за НА должны быть невелики.

В главе рассмотрена 3-х компонентная модель ALPHA, описывающая кинетику α -частиц в центральной секции амбиполярного реактора. Для α -частиц записывалось модифицированное УЧП с учетом кулоновских столкновений и НА, а распределения ионов и электронов полагались максвелловскими с фиксированными температурами и плотностями. Численный анализ проводился для параметров реактора WITAMIR-I.

Моделирование с учетом НА показало, что изменяя конфигурацию магнитного поля можно регулировать накопление α -частиц в реакторе. Результаты расчетов кинетики ионов и α -частиц с учетом НА позволили определить критическое значение $(\rho/\ell)_{cr} \approx 0.1$ (ρ — ларморовский радиус, ℓ — длина удвоения поля), ниже которого НА практически не сказывается на удержании плазмы.

Параметрический анализ кинетики α -частиц показал, что с ростом Φ , T_e и T_i улучшается удержание α -частиц, увеличивается их плотность и суммарная величина β (отношение кинетического давления плазмы к магнитному). Энергия α -частиц возрастает с увеличением T_e и падает при увеличении Φ или T_i . Расчеты показывают, что в реакторе типа WITAMIR-I не происходит катастрофического накопления α -частиц, их параметры остаются на уровне $n_\alpha \approx 6 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$, $E_\alpha \approx 700$ кэВ, а суммарная величина β не превышает 0.3, причем изменение потенциала в пределах 100-300 кэВ слабо сказывается на параметрах α -частиц.

В главе 5 рассматривается одно- и многофакторное моделирование кинетики плазмы в ловушке 2XII B (Nucl. Fus., 1979, v. 19, No. p. 1011-1028; Nucl. Fus., 1980, v. 20, No. 6, p. 655-664), учитывающее не только классическое кулоновское рассеяние, но и ряд других процессов,

определяющих удержание горячей плазмы. Считается, что низкие значения T_e в экспериментах связаны с дополнительным охлаждением (ДО) электронов (из-за эмиссии холодных электронов со стенок, взаимодействия с холодной запорочной плазмой и др. процессов), а аномальные потери плазмы определяются дополнительной диффузией (ДД) ионов в пространстве скоростей (из-за кинетической неустойчивости или "квазиклассического" рассеяния).

В однофакторных кодах ДО электронов учитывается либо заданием T_e на достаточно низком уровне (код 2MT), либо увеличением потерь мощности электронами, которые задаются в виде $q T_e n_e / T_p$ (код 2Mq), а ДД ионов учитывается модифицированным УФИ (I), где $L_{RF}(f_i) = -\text{div}(-D_{RF} \text{grad}, f_i)$ и коэффициент ДД для приближенных оценок задается в виде (код 2MD)

$$D_{RF} = \text{const} (v < v_{INT}), D_{RF} = 0 (v > v_{INT}), v_{INT} = \sqrt{2E_{INT}/m_i}. \quad (I3)$$

В многофакторных кодах учитывается как совокупное влияние ДО электронов и ДД ионов (код 2MqD), так и захват атомов пучка при ионизации и перезарядке, а также перезарядка ионов плазмы на инжестируемых нейтралах (код 2MTDB).

Однофакторное моделирование по кодам 2MT, 2Mq и 2MD позволило оценить влияние ДО электронов и ДД ионов на кинетику плазмы в ловушке и показало, что

- учет неклассических механизмов потерь даже на уровне однофакторных моделей позволяет получить значительно лучшее согласие с экспериментальными данными (в среднем отличие численных результатов от экспериментальных не превышает 40-60%), чем модель классического удержания, где разница между численными и экспериментальными данными достигает I порядка величины (табл. I);
- при таком выборе величины D_{RF} , что $C_i' / C_{i, \text{class}}' \approx 5$ (C_i' - значение коэффициента диффузии ионов по углам, $C_{i, \text{class}}'$ - его классическое значение), все параметры плазмы (за исключением T_e) практически совпадают с экспериментальными данными;
- при низкой T_e , когда $E_i / T_e \geq (E_i / T_e)_{cr} \approx 24-27$ удержание энергии, в основном, определяется торможением ионов на электронах и $nT_e \approx nT_D$ (nT_e - параметр удержания энергии);
- пренебрежение $i-i$ столкновениями приводит к большим погрешностям в определении параметров плазмы, которые даже при низкой T_e (60 эВ) остаются на уровне 9-58%.

Расчеты по коду 2MTDB при фиксированных T_e , D_{RF} и J_{TRD} в

диапазоне $T_{ex}/T_{TRP} = 1-3$ показали, что перезарядка на пучке слабо сказывается на параметрах плазмы и только изменения n и nT_p составляют 20-40%.

Многофакторное моделирование по кодам 2M7D и 2MTDB показало, что они позволяют получить значительно более хорошее согласие с экспериментальными результатами, чем любой из однофакторных, причем наилучшее совпадение с экспериментом (для различных экспериментов на 2XIIВ) коды с ДД ионов дают при таком выборе D_{RF} , что $C_i'/C_{iCLAS}' \approx 4.5-7.5$ и минимальные средние отклонения численных данных от экспериментальных (16-19%) для кода 2MTDB приходятся на $C_i'/C_{iCLAS}' \approx 6$ (табл.2).

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Решена актуальная научная задача, имеющая важное значение для программы УТС с магнитным удержанием, - разработаны основы и создана база нуль-мерных плазмозфизических фоккер-планковских расчетов адиабатических магнитных ловушек в виде системы МАПО численных экспериментов по удержанию плазмы:

- а). сформулированы основные требования к системе;
- б). на основе двумерного нестационарного нелинейного уравнения Фоккера-Планка разработаны ряд одно- и многокомпонентных математических моделей и построены соответствующие численные коды, в комплексе учитывающие основные кинетические процессы в плазме ловушки;
- в). выбран метод решения кинетических уравнений и разработаны алгоритмы численного счета;
- г). созданы пакеты программ для ЭВМ типа БЭСМ-6, ЕС-1060, ЕС-1040;
- д). проведена отладка и тестирование системы на известных задачах по релаксации и классическому удержанию плазмы в открытой ловушке.

2. Проведен анализ различных приближений при записи уравнения Фоккера-Планка для плазмы адиабатической ловушки и на его основе рассмотрены основные математические модели, применявшиеся для численного моделирования удержания плазмы.

3. Анализ существующих моделей показал, что они, как правило, из целого ряда кинетических процессов учитывают лишь классическое кулоновское рассеяние, поэтому не позволяют адекватно описать удержание плазмы в реальной экспериментальной установке. Для такого описания впервые предложено и использовано в качестве основы

математической модели модифицированное уравнение Фоккера-Планка, учитывающее наряду с кулоновскими столкновениями и влияние неадиабатичности, неустойчивости и элементарных процессов на изменение функции распределения компоненты плазмы.

4. С помощью кодов системы МАПО выполнен детальный численный анализ классического удержания плазмы в адиабатической ловушке как в однокомпонентном, так и в двухкомпонентном приближении с учетом самосогласованного амбиполярного потенциала и установлены основные характеристики и закономерности классического удержания плазмы. Получено хорошее качественное и количественное совпадение результатов моделирования с данными аналогичных работ.

5. На основе двумерного уравнения Фоккера-Планка построена математическая модель двухкомпонентной плазмы, учитывающая наряду с ионизацией атомов пучка и перезарядку ионов плазмы на инжестируемых нейтралах. Численные расчеты по данной модели показали, что учет перезарядки на пучке приводит к значительному изменению вида функции распределения ионов (функция распределения ионов "подстраивается" под распределение источника) и немонотонным зависимостям параметров плазмы от величины отношения тока перезарядки к захватываемому току пучка.

6. Впервые на основе модифицированного уравнения Фоккера-Планка построена математическая модель кинетики ионов в ловушке с магнитными пробками с учетом неадиабатичности их движения и на ее основе проведено широкое численное исследование удержания плазмы. В результате установлены основные закономерности удержания плазмы с учетом неадиабатичности, выявлено влияние различных факторов на ухудшение удержания из-за этого процесса и определены значения параметров магнитного поля и плазмы ловушки, при которых потери ионов из-за неадиабатичности должны быть невелики. Показано, что в условиях эксперимента на 2ХИВ влияние неадиабатичности на удержание плазмы пренебрежимо мало.

7. Впервые на основе модели с неадиабатичностью создан 3-х компонентный численный код ALPHA, описывающий кинетику α -частиц в амбиполярном реакторе, и с его помощью выполнен комплексный параметрический анализ удержания α -частиц как с учетом, так и без учета неадиабатичности их движения, определено влияние таких факторов как амбиполярный потенциал, температура электронов и температура ионов плазмы центральной секции на удержание α -частиц в реакторе. Показано, что путем изменения конфигурации магнитного поля централь-

ной секции можно эффективно регулировать накопление α -частиц в амбиполярном реакторе.

8. Результаты численного анализа удержания ионов и α -частиц с учетом неадиабатичности показывают, что влияние неадиабатичности на удержание заряженных частиц в ловушке можно оценивать по величине отношения ларморовского радиуса частицы к характерной длине изменения магнитного поля ρ/ℓ , причем существует критическое значение $(\rho/\ell)_{cr} \approx 0.1$, ниже которого неадиабатичность практически не сказывается на удержании плазмы в ловушке.

9. Впервые создан аппарат комплексного численного анализа удержания плазмы в ловушке с магнитными пробками в виде одно- и многофакторных кодов, которые позволяют в комплексе оценить влияние таких кинетических процессов как классическое кулоновское рассеяние, дополнительное охлаждение электронов, дополнительная диффузия ионов из-за неустойчивости, ионизация атомов нейтрального пучка и перезарядка ионов плазмы на инжектируемом пучке на кинетику плазмы в адиабатической магнитной ловушке.

10. Впервые на основе однофакторных кодов 2MT, 2Mq и 2MD проанализировано воздействие дополнительного охлаждения электронов и дополнительной диффузии ионов на удержание плазмы, определено влияние $i-i$ и $i-e$ столкновений на параметры плазмы в ловушке и показано, что пренебрежение $i-i$ столкновениями приводит к большим ошибкам в расчете параметров плазмы при любой температуре электронов. С помощью кода 2MT показано, что при низкой температуре электронов, когда $E_i/T_e \geq (E_i/T_e)_{cr}$, удержание энергии в плазме открытой ловушки определяется, в основном, торможением ионов на электронах.

11. Однофакторное моделирование удержания плазмы на установке 2XIIВ показало, что однофакторные коды дают значительно лучшее согласие с экспериментальными данными, чем модель классического удержания, однако из-за неполноты таких моделей (наряду с кулоновским рассеянием учитывается только один неклассический процесс) они не позволяют адекватно описать удержание плазмы в реальной ловушке.

12. Впервые с помощью многофакторных кодов 2MqD и 2MTDB проведен комплексный многофакторный параметрический анализ удержания плазмы на установке 2XIIВ. В результате показано, что многофакторные коды позволяют достаточно корректно описать удержание плазмы в такой системе и могут быть использованы для прогноза и анализа

результатов реального эксперимента, причем модели с дополнительной диффузией ионов дают наилучшее совпадение с экспериментальными данными (различие между численными и экспериментальными данными не превышает 16-19%) при таком выборе величины коэффициента неклассической дополнительной диффузии, что $C_i' \simeq (4.5-7.5) C_{i'clas}$.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Решение уравнения Фоккера-Планка для адиабатических магнитных ловушек /И.Н.Головин, А.А.Ершов, Н.П.Козлов, В.И.Хвесюк.-М., 1982.-39 с. Препр./Ин-т атомн. энергии №3606/6 .

2. TRAP-I - программа решения двумерного нестационарного уравнения Фоккера-Планка /И.Н.Головин, А.А.Ершов, Н.П.Козлов, В.И.Хвесюк.-М., 1982.-36 с. Препр./Ин-т атомн. энергии №3697/6 .

3. Влияние неадиабатичности на интенсивность продольных потерь ионов из магнитной ловушки /И.Н.Головин, А.А.Ершов, Н.П.Козлов, В.И.Хвесюк.-Письма в ЖТФ, 1982, т.8, в.18, с.1105-1108.

4. А.А.Ершов. О численном решении системы двумерных уравнений Фоккера-Планка.-Труды /МВТУ, 1993, №398, с.22-26.

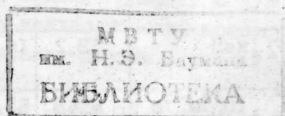
5. Моделирование пространственных зависимостей функции распределения частиц в открытой адиабатической ловушке /И.Н.Головин, А.А.Ершов, А.И.Филимоненко, В.И.Хвесюк.-М., 1984.-24 с. Препр./Ин-т атомн. энергии №3907/6 .

Параметры плазмы	2XIIIB	Численный код				
		2M	2MT	2MD	2MD ₀	2MTDB
$n, 10^{19} \text{ м}^{-3}$	4.8	14.22	6.76	4.85	5.2	4.8
$T_e, \text{ эВ}$	122.8	1047	129	434.9	206.9	128
$E_z, \text{ кэВ}$	13.2	16.12	5.97	13.19	10.11	10.3
$n\tau_p, 10^{16} \text{ м}^{-3} \text{ с}$	6.48	61.25	13.8	7.11	8.19	6.98
$n\tau_E, 10^{16} \text{ м}^{-3} \text{ с}$	6.67	70.52	5.9	6.7	5.92	2.84

Таблица 1. Результаты расчета параметров плазмы ловушки 2XIIIB по различным численным кодам системы МАПО.

Параметры плазмы	2Х1ПВ	Расчет	2Х1ПВ	Расчет	2Х1ПВ	Расчет
I_{BEAM}, A	200		300		500	
$E_{BEAM}, KэВ$	13.3		13.3		13.3	
R	2.38		2.86		6.67	
$n, 10^{19} м^{-3}$	6.97	6.87	9.07	9.06	11.89	12.8
$T_e, эВ$	60	60.1	86.4	86.2	135.3	136
$E_c, KэВ$	12.4	8.67	12.4	8.82	12.4	9.25
$n\tau_p, 10^{16} м^{-3} с$	6	5.8	8	7.98	8	9.18
$n\tau_e, 10^{16} м^{-3} с$	4.7	1.9	6.48	3.04	6.48	3.86

Таблица 2. Результаты моделирования 3-х экспериментов на 2Х1ПВ по коду 2MTDV, полученные при $c_i'/c_{iAS}' \approx 6$.



A. G. ...