

М 498248

Государственный комитет СССР по народному образованию
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

Полетаев Дмитрий Леонидович

РАЗРАБОТКА КИНЕТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ
И ЧИСЛЕННЫЙ АНАЛИЗ ПЛАЗМЫ
МАЛОРАДИОАКТИВНОГО АМБИПОЛЯРНОГО РЕАКТОРА

ОГ. 04. 14 - теплофизика и молекулярная физика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

А. П. Полетаев

Москва - 1991

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
АРСЕНИН В. В.
кандидат технических наук
ОБУХОВ В. А.

Ведущая организация: Ин-т ядерной физики СО АН СССР

Защита состоится "18" 11 1991 года в 15³⁰ 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 ознакомиться в библиотеке МГТУ.

Автореферат разослан "17" 10 1991 г.



КУТУКОВ Н. Н.

М 498248

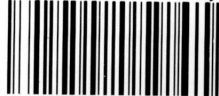
Изд. 100 экз. Объем I п. л.
Н. Э. Баумана

Актуальность темы. В настоящее время при разработке и анализе новых источников и способов производства энергии особое внимание уделяется обеспечению их надежности, безопасности и экологической чистоты. Именно поэтому очень важным для всей программы работ в области управляемого термоядерного синтеза становится вопрос о принципиальной возможности создания малорадиоактивного реактора синтеза (существенно более чистого, чем современные реакторы деления и проектируемые дейтерий-тритиевые реакторы синтеза). Одной из актуальных задач этого направления является углубленный анализ альтернативных топливных циклов.

Наиболее интересным сейчас представляется использование в качестве топлива смеси дейтерия и гелия-3. В соответствующей реакции синтеза отсутствуют радиоактивные элементы и нейтроны, что, как ожидается, должно обеспечить высокий уровень безопасности и экологической чистоты реактора, позволит значительно упростить его конструкцию, исключив из нее blanket и существенно облегчит выбор конструкционных материалов. Кроме того, энергию синтеза, полностью вложенную в заряженные частицы, можно было бы высоким КПД превращать в электричество, используя системы прямого преобразования энергии, и тем самым увеличить суммарный КПД электростанции и снизить тепловые выбросы.

Разработка малорадиоактивного термоядерного реактора должна базироваться на всестороннем изучении физики D^3He плазмы с целью определения наиболее благоприятных режимов его работы с точки зрения получения наибольшего энергетического выхода при возможно более низком уровне радиоактивности и нейтронных потоков.

Диссертационная работа посвящена исследованию характеристик амбиполярного реактора с D^3He топливом. Применение открытых амбиполярных ловушек для реализации D^3He топливного цикла представляется сейчас весьма привлекательным, так как они обладают рядом принципиальных преимуществ перед другими типами термоядерных систем. Прежде всего, они допускают возможность работы при высоких значениях β (отношения давления плазмы к давлению магнитного поля), что является необходимым условием замкновения энергетического баланса и эффективной работы D^3He



реактора с магнитным удержанием плазмы (Атомная Энергия. - 1990. - Т. 68, вып. 3. - С. 188-193).

В данной работе на основе численного моделирования кинетики многокомпонентной D^3He плазмы проводится углубленный анализ энергетического баланса реакторной плазмы с учетом влияния продуктов синтеза, расчет накопления в ней трития и уровня нейтронных потоков, которые определяют радиационное загрязнение реактора. Такой анализ является базой для выбора наиболее приемлимых режимов работы D^3He реактора, и формулирования требований к основным реакторным системам: удержания, дополнительного нагрева, откачки и нейтронной защиты.

Цели работы.

1. Анализ энергетического баланса и показателей радиационного загрязнения амбиполярного реактора с D^3He топливным циклом на основе расчета функций распределения основных компонент плазмы центральной секции такого реактора, учета накопления в ней продуктов синтеза и особенностей их взаимодействия и энергообмена с компонентами топлива и электронами.

2. Разработка детальной математической модели плазмы центральной секции D^3He реактора на основе рассмотрения баланса частиц и энергии для ионов топлива и электронов и подробного анализа кинетики высокоэнергетичных продуктов синтеза (протонов, α -частиц и трития).

3. Создание единой базы для проведения плазмофизических расчетов и исследования рабочих характеристик перспективных термоядерных установок на основе открытых ловушек в виде системы алгоритмов и пакетов программ для ЭВМ.

4. Численное моделирование многокомпонентной плазмы центральной секции D^3He амбиполярного реактора. Исследование основных закономерностей, энергетических характеристик и показателей радиационного загрязнения такого реактора в широком диапазоне рабочих параметров. Выбор наиболее предпочтительных режимов его работы.

Научная новизна работы.

1. Впервые поставлена задача об энергетическом анализе амбиполярного реактора с D^3He топливным циклом на основе решения задачи кинетики плазмы в центральной секции такого реактора и

детального рассмотрения влияния продуктов синтеза.

2. Впервые разработана подробная математическая модель многокомпонентной D^3He реакторной плазмы, в которой на основе рассмотренной кинетики высокоэнергетических частиц учитывается накопление в плазме продуктов реакций синтеза (протонов, α -частиц и трития) и создана база для проведения плазмозфизических расчетов центральной секции амбиполярного реактора с D^3He топливным циклом в виде системы алгоритмов и соответствующих пакетов программ.

3. Предложен метод решения системы двумерных нелинейных нестационарных уравнений Фоккера - Планка для плазмы открытой ловушки, позволяющий значительно сократить затраты машинного времени на решение задачи кинетики для такой плазмы. Разработан пакет программ для его машинной реализации.

4. Впервые проведен многопараметрический анализ кинетики высокоэнергетических продуктов синтеза в центральной секции D^3He амбиполярного реактора с учетом влияния как кулоновских, так и близких ядерных соударений. На основе этого анализа получены аппроксимационные зависимости, позволяющие с достаточной точностью описать в балансных моделях плазмы накопление протонов, α -частиц и трития в реакторе, а также их взаимодействие с различными компонентами топлива.

5. Впервые проделано широкое численное исследование энергетических характеристик и параметров радиационного загрязнения амбиполярного реактора с D^3He топливом на основе подробного рассмотрения кинетики плазмы центральной секции такого реактора и с учетом особенностей физики D^3He топливного цикла.

Научная и практическая ценность работы.

1. Создана система математического и программного обеспечения для численного моделирования кинетики многокомпонентной плазмы амбиполярных ловушек. Разработанные пакеты программ переданы для дальнейшего использования в ИАЭ им. И. В. Курчатова. Применение их возможно при анализе результатов и планировании экспериментов, разработке новых установок и концептуальном проектировании перспективных реакторных систем.

2. Проведенный численный анализ послужил основой для более глубокого понимания физики D^3He реакторной плазмы, изучения основных закономерностей работы и важнейших характеристик

амбиоплярного реактора с D^3He топливным циклом.

3. Полученные результаты расчетов позволили выявить область наиболее приемлемых режимов работы малорадиоактивного ambiоплярного реактора и сформулировать рекомендации по его схеме, требования к системам удержания, дополнительного нагрева топлива и откачки шлаков.

4. Основные результаты работы были использованы в ИАЭ им. И. В. Курчатова и НИИЭМ МГТУ им. Н. Э. Баумана при разработке физического обоснования проекта малорадиоактивного термоядерного реактора с D^3He топливным циклом.

На защиту выносятся:

1. Система алгоритмов и программ для численного моделирования физических процессов и исследования характеристик новых перспективных термоядерных систем на основе ambiоплярных ловушек.

2. Математическая модель кинетики многокомпонентной высокотемпературной плазмы центральной секции ambiоплярного реактора с D^3He топливным циклом.

3. Результаты численного исследования кинетики высокоэнергетических продуктов синтеза в D^3He реакторной плазме с учетом влияния как кулоновских, так и ядерных упругих соударений.

4. Результаты численного моделирования плазмы центральной секции ambiоплярного реактора с D^3He топливным циклом, анализа и оптимизации режимов работы такого реактора.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были представлены в докладах Международной школы по физике плазмы "Третий и перспективные топлива в реакторах синтеза" (Варенна, Италия, 1989 г.), на Всесоюзном совещании "Гелорадиоактивный термоядерный синтез" (Москва, ИАЭ им. И. В. Курчатова, 1990 г.), на научных семинарах в ИАЭ им. И. В. Курчатова, НИИЭМ МГТУ им. Н. Э. Баумана (Москва, 1989 - 1991 гг.) и ИЯФ СО АН СССР (Новосибирск 1991 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 печатные работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав с выводами, заключения и библиографического списка из 110 наименований. Она содержит 113 страниц текста, 57 рисунков

и I таблицу.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

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

В первой главе кратко изложены результаты и состояние исследований, касающихся разработки малорадиоактивного термоядерного реактора с D^3He топливом и показана необходимость проведения подробного численного моделирования плазмы такого реактора. На основе анализа результатов опубликованных работ рассмотрены особенности реализации D^3He топливного цикла (высокие рабочие температура и необходимые значения B топлива, большая доля мощности излучения в энергобалансе плазмы, заметное влияние близких ядерных взаимодействий на кинетику продуктов синтеза) и преимущества амбиполярных ловушек перед другими типами термоядерных систем, благодаря которым их использование в качестве реактора с D^3He топливным циклом кажется сейчас предпочтительным.

Кратко рассмотрены основные физические процессы, определяющие удержание плазмы в амбиполярном реакторе и различные по сложности математические модели, которые использовались для ее описания. С учетом особенностей физики высокотемпературной D^3He плазмы предложена модель плазмы центральной секции амбиполярного реактора с D^3He топливным циклом, которая базируется на кинетических уравнениях со столкновительными операторами Больцмана и Фоккера - Планка для высокоэнергетических частиц (протонов, α -частиц и трития) и уравнениях интегральных балансов для других компонент плазмы. Отличительной чертой этой модели является возможность детального изучения энергобаланса D^3He плазмы и строгой оценки мощности нейтронных потоков на основе подробного рассмотрения кинетики продуктов синтеза, особенностей их взаимодействия с различными компонентами топлива и накопления в реакторе.

Глава 2 посвящена развитию методов численного моделирования

кинетики неувядающей многокомпонентной плазмы амбиоплярных ловушек. Рассмотрена система нелинейных кинетических уравнений Фоккера - Планка, к которой сводится задача моделирования классического удержания такой плазмы и основные допущения, которые делаются при ее решении.

Предложен метод решения двумерных нелинейных кинетических уравнений, который позволяет значительно сократить необходимое для этого машинное время. Он основан на использовании для решения системы алгебраических уравнений, порождаемой разностной дискретизацией исходной задачи, варианта гауссовского исключения для разреженных систем алгебраических уравнений большой размерности с матрицей коэффициентов произвольной структуры. Изложены основные идеи метода, алгоритм и преимущества. Разработано соответствующее универсальное программное обеспечение (пакет SMPAS), применение которого возможно при решении различных многомерных задач математической физики.

Далее приведено описание разработанного пакета программ (FP) для решения системы нестационарных нелинейных уравнений Фоккера - Планка для многокомпонентной плазмы открытых ловушек и амбиоплярных систем. Проведены его отладка и тестирование. С этой целью выполнено численное моделирование классического удержания электронов и ионов в центральной секции амбиоплярной ловушки в присутствии других сортов частиц, имеющих максвелловское распределение по скоростям, и сравнение результатов этого моделирования с приближенным аналитическим решением этой задачи (Nucl. Fusion. - 1978. - V.18. - pp. 1229 - 1243).

Разработанный пакет программ может быть основой для решения широкого круга задач физики плазмы амбиоплярных реакторов и экспериментальных установок на основе открытых ловушек.

В третьей главе представлены результаты численного исследования кинетики высокоэнергетичных продуктов синтеза (протонов, α -частиц и трития) в плазме D^3He амбиоплярного реактора. Необходимость подробного рассмотрения кинетики продуктов синтеза объясняется тем, что распределение их по скоростям отличается от максвелловского и, следовательно, корректный учет накопления "шлаков" в реакторной плазме, расчет энергообмена при взаимодействии компонентов топлива и электронов

о продуктах синтеза и учет его при исследовании общего энергобаланса плазмы требуют знания реальных функций распределения и не могут проводиться на основе приближенных уравнений метода интегральных балансов. Кроме этого, важной задачей при разработке малорadioактивного реактора синтеза является расчет кинетики и накопления трития, по результатам которого можно определить уровень нейтронного потока и распределение нейтронов по энергии.

Параметрически исследовано влияние различных факторов (пробочное отношение, запирающий потенциал, температуры компонентов топлива) на интенсивность энергообмена с различными компонентами реакторной плазмы и накопление "шлаков" в центральной секции амбиполярного D^3He реактора. Показано, что концентрация продуктов синтеза (особенно α -частиц) в центральной секции при высоких запирающих потенциалах ($\Delta\phi/T \approx 3...4$) может быть сравнимой с концентрацией топлива, при этом значительным оказывается и их вклад в В.

Особенностью задачи кинетики продуктов синтеза в D^3He плазме является необходимость учета влияния близких ядерных соударений, вклад которых становится существенным, если энергия быстрой частицы составляет несколько мегаэлектронвольт. Проведен численный анализ влияния упругих ядерных соударений на кинетику термоядерных протонов и α -частиц в центральной секции D^3He амбиполярного реактора на основе решения системы кинетических уравнений со столкновительными операторами Больцмана и Фоккера - Планка

$$\frac{df_a}{dt} = \left(\frac{\partial f_a}{\partial t} \right)_{FP} + \left(\frac{\partial f_a}{\partial t} \right)_B + S_a \quad (1)$$

Здесь $f_a(v, \cos\theta, t)$ - функция распределения частиц сорта "а" ($a=p, \alpha, T, v$ - скорость, θ -pitch-угол), $\left(\frac{\partial f_a}{\partial t} \right)_{FP}$ - кулоновский столкновительный оператор (оператор Фоккера-Планка), $\left(\frac{\partial f_a}{\partial t} \right)_B$ - оператор Больцмана, описывающий изменение функции распределения за счет близких ядерных соударений, S_a - источники частиц сорта "а", связанные с рождением их в реакциях синтеза.

Проведенное численное моделирование показало, что учет ядерных упругих столкновений приводит к увеличению в 2 - 3 раза мощности, передаваемой термоядерными протонами ионам топлива

(рис. 1). Влияние близких соударений на кинетику α -частиц проявляется слабо, что объясняется большой долей удерживаемых запирающим потенциалом "холодных" α -частиц, для которых этот эффект мал.

Результаты исследования кинетики продуктов синтеза были представлены в виде аппроксимационных зависимостей:

$$P_i/P_{fus} = 1 - x_1 \exp(-T_e/x_2) \quad (2)$$

$$P_e/P_{fus} = x_3 \exp(-T_e/x_4) \quad (3)$$

$$P_{Loss}/P_{fus} = 1 - x_5 \exp(-T_e/x_6) \quad (4)$$

$$\tau_p^{-1} = x_7 \exp(-T_e/x_8) + x_9 \quad (5)$$

$$I_E = x_{10} \exp(-T_e/x_{11}) + x_{12} \quad (6)$$

где P_i/P_{fus} и P_e/P_{fus} - доли ионов топлива и электронов в энергообмене продуктов синтеза с плазмой, P_{Loss}/P_{fus} - доля мощности продольных потерь, $\tau_p = n/J$ и $\tau_e = n\langle E \rangle / P_{Loss}$ - времена удержания частиц и энергии, J - ток источника, обусловленный рождением частиц в реакциях синтеза, $\langle E \rangle$ - средняя энергия, T_e - температура электронов, кэВ, $x_1, x_2, x_3, \dots, x_{12}$ - коэффициенты, которые были подобраны так, чтобы формулы (2-6) наилучшим образом описывали результаты численного моделирования. С помощью этих скейлингов можно приближенно описать энергообмен продуктов с компонентами плазмы и их накопление в центральной секции. Применение их возможно при проведении балансных расчетов плазмы в D^3He реактора.

В главе 4 проводится подробное численное моделирование плазмы центральной секции амбиполярного реактора с D^3He топливным циклом. Рассмотрены особенности постановки задачи и используемые в ней упрощающие предположения. Предложенная математическая модель плазмы центральной секции основана на кинетических уравнениях со столкновительными операторами Больцмана и Фоккера - Планка для продуктов синтеза - протонов, α -частиц и трития:

$$\frac{df_p}{dt} = \left(\frac{\partial f_p}{\partial t} \right)_{FP} + \left(\frac{\partial f_p}{\partial t} \right)_a + S_p - \frac{f_p}{\tau_{Rp}} \quad (7)$$

$$\frac{df_\alpha}{dt} = \left(\frac{\partial f_\alpha}{\partial t} \right)_{FP} + S_\alpha - \frac{f_\alpha}{\tau_{R\alpha}} \quad (8)$$

$$\frac{df_T}{dt} = \left(\frac{\partial f_T}{\partial t} \right)_{FP} - \frac{f_T}{\tau_{DT}} + S_T - \frac{f_T}{\tau_{RT}} \quad (9)$$

(Здесь $\tau_{DT} = 1 / \langle \sigma v \rangle_{DT} n_D$ - эффективное время сгорания топлива, τ_{ra} - среднее эффективное время радиальных потерь, которые, как предполагалось, определяются классическим поперечным переносом).

Плотность ионов D и ^3He и электронов, имеющих близкое к максвелловскому распределение по скоростям, определялась из условия постоянства задаваемого как параметр суммарного значения в плазме и из уравнения квазинейтральности (с учетом всех сортов ионов, включая и продукты синтеза):

$$n = n_D + n_{He} + n_e + n_p + n_\alpha + n_T = \text{const.} \quad (10)$$

$$n_e = \sum_a Z_a n_a, \quad a = D, He, p, \alpha, T \quad (11)$$

(Мы считали, что $n_D = n_{He}$, $T_D = T_{He}$.) Температура ионов топлива ($T_i = T_D = T_{He}$) использовалась как второй свободный параметр, а температура электронов находилась из уравнения баланса энергии для электронной компоненты:

$$\frac{3}{2} \frac{d(n T_e)}{dt} = - \frac{n_e}{\tau_e} (T_e + \Delta\Phi_c) - \frac{3}{2} \frac{n_e}{\tau_{ra}} T_e + \sum_a P^{a \rightarrow e} - P_{rad} = 0 \quad (12)$$

$$a = D, He, p, \alpha, T$$

где τ_e - время жизни электронов, подсчитанное по формуле Пастухова, $\Delta\Phi_c$ - плавающий потенциал центральной секции, который определялся из уравнения амбиполярности:

$$\frac{dn_e}{dt} = \sum_a Z_a \frac{dn_a}{dt}, \quad a = D, He, p, \alpha, T \quad (13)$$

в котором учитывались все каналы потерь ионов топлива, продуктов синтеза и электронов из плазмы, τ_{ra} - "поперечное" время жизни электронов, $P^{a \rightarrow e}$ - энергия, которая передается в единицу времени электронам от ионов сорта "а", P_{rad} - суммарная мощность радиационных потерь, включающая мощность тормозного и циклотронного излучения.

Третьим свободным параметром в данной постановке задачи удержания плазмы в центральной секции был запирающий потенциал для ионов центральной секции $\Delta\Phi_c$, величина которого зависит от параметров плазмы запирающих ячеек - термобарьера.

Решение кинетических уравнений (7-9) производилось методом установления, причем на каждом временном шаге уравнения (10-13) решались совместно для определения согласованных величин $n_e = n_D = n_{He}$, n_p , T_e и $\Delta\Phi_c$.

Далее приведен результат расчета параметров плазмы центральной секции для $v=0.7$, $T_i=30 \dots 100$ кэВ, $\Delta\phi_i/T_i = 3 \dots 5$. Проведен анализ физических процессов, определяющих энергетический баланс и удержание плазмы. Показано, что если $\Delta\phi_i/T_i \geq 4$, то основным препятствием для повышения энергетической эффективности амбиполярного D-He реактора являются зашлаковывание плазмы (β протонов, α -частиц и трития) составляющее $0.15 \dots 0.20$ (рис. 2) при суммарном значении $v=0.7$ и большие продольные потери (мощность, уносимая из плазмы излучением превышает 80-90% от мощности синтеза, тогда как потери мощности за счет ухода частиц через потенциальный барьер - 50-60%). При меньших значениях запирающего потенциала ($\Delta\phi_i/T_i \leq 3$) степень зашлаковывания плазмы несколько ниже, но начинает сказываться ухудшение продольного удержания (продольные потери превышают мощность синтеза, тогда как на излучение приходится 35-40%, а шлаков 0.10...0.12).

В оптимальном диапазоне рабочих температур (60-70 кэВ при $\Delta\phi_i/T_i = 4$ и 70-100 кэВ при $\Delta\phi_i/T_i = 3$) коэффициент усиления мощности в плазме центральной секции (Q), равный отношению мощности термоядерного энерговыделения к мощности дополнительного нагрева, которая требуется для поддержания на выбранном уровне температуры ионов топлива, не превышает 1.5-2. Причем, видимо, выгоднее режимы работы с меньшим запирающим потенциалом, т.к. продольные потери мощности, которые преобладают в этом случае, могли бы преобразовываться в электричество с высоким КПД системой прямого преобразования. Для режимов с $\Delta\phi_i/T_i \geq 4$ эффективность преобразования определяется тепловым циклом, так как основную роль играет излучение.

Исследовано возможное влияние резонансной дрейфовой отдачи термализованных протонов и α -частиц на усиление мощности в плазме центральной секции. Проведены модельные расчеты, показывающие, что с помощью очистки плазмы от шлаков можно добиться существенного увеличения энергетической эффективности ($Q \approx 30-40$, если откачиваются пролетные частицы в области термобарьера), причем существуют оптимальные энергия и скорость отдачи, при которых Q максимально (рис. 3).

Приведенные результаты расчета кинетики и накопления трития позволили оценить уровень и энергетическое распределение

нейтронного потока: с нейтронами выделяется 1.5-2.5% термоядерной мощности, причем на наиболее опасные 14 МэВ-ные нейтроны приходится около 1%. Полученные результаты позволяют более обоснованно, чем в ранее опубликованных работах оценить параметры радиационного загрязнения реактора D^3He топливным циклом.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ РАБОТЫ

1. Решена новая актуальная научная задача, имеющая важное значение для программы УТС. - на основе численного решения задачи кинетики проведен подробный анализ энергетического баланса для многокомпонентной плазмы центральной секции мало-радиоактивного амбиполярного реактора с D^3He топливным циклом. Выполнены оценки энергетических характеристик, параметров радиационного загрязнения и возможных режимов работы такого реактора.

2. Разработана замкнутая математическая модель плазмы центральной секции амбиполярного реактора с D^3He топливом, которая построена на кинетических уравнениях со столкновительными операторами Больцмана и Фоккера - Планка для продуктов синтеза и уравнениях интегральных балансов для остальных сортов частиц. Такая модель позволяет, используя физически обоснованные упрощения, провести численное моделирование в широком диапазоне рабочих параметров и подробно исследовать основные процессы и характеристики реактора с учетом особенностей физики высокотемпературной D^3He плазмы.

3. Предложен метод решения системы двучленных нестационарных нелинейных уравнений Фоккера - Планка для плазмы открытой ловушки, позволяющий значительно сократить затраты машинного времени на решение задачи кинетики. Метод основан на применении гауссовского исключения для разреженных систем уравнений большой размерности, порождаемых конечно - разностной дискретизацией кинетических уравнений.

4. Разработаны соответствующие вычислительные алгоритмы и создан пакет программ для численного моделирования кинетики неравновесной многокомпонентной плазмы на основе решения системы нестационарных нелинейных уравнений Фоккера - Планка в двумерном пространстве скоростей. Решение кинетических уравнений осуществляется для произвольного числа компонент плазмы с

различными масштабами скоростей и энергий в присутствии произвольного числа компонент, имеющих максвелловское распределение по скоростям. Данный пакет программ может служить базой для решения широкого круга задач физики плазмы открытых ловушек и амбиполярных реакторов.

5. Впервые выполнен широкий многопараметрический анализ кинетики высокоэнергетичных продуктов синтеза в D^3He реакторной плазме с учетом вклада как кулоновских, так и близких ядерных соударений, играющих важную роль для частиц с энергиями несколько мегаэлектронвольт. Исследовано влияние различных факторов (пробочного отношения, запирающего потенциала, температуры топлива и т.д.) на накопление шлаков в центральной секции D^3He амбиполярного реактора и их взаимодействие с различными компонентами плазмы.

6. Получены аппроксимационные зависимости, описывающие результаты численного моделирования кинетики продуктов синтеза в центральной секции D^3He реактора в широком диапазоне рабочих параметров. Применение этих скейлингов при проведении балансных расчетов амбиполярного реактора с D^3He топливом позволит существенно повысить точность и достоверность их результатов.

7. Впервые проведено численное решение замкнутой задачи кинетики плазмы центральной секции амбиполярного реактора с D^3He топливом с учетом накопления продуктов реакций синтеза (протонов, α -частиц и трития). На этой основе проделан подробный анализ баланса мощностей в реакторной плазме. Получены оценки величин потребной мощности внешнего нагрева, токов подпитки и коэффициента усиления мощности в плазме, выявлены предпочтительные режимы его работы.

8. Впервые проведены подробные расчеты кинетики и накопления трития, а также величины нейтронных потоков для различных режимов работы амбиполярного реактора с D^3He топливом. Полученные результаты позволяют более обоснованно, чем ранее, судить об уровне радиационного загрязнения, характерном для такой системы и о возможности создания малорадиоактивного термоядерного реактора с D^3He топливным циклом на основе амбиполярной ловушки.

9. Показано, что основным препятствием для повышения эффективности работы D^3He реактора, кроме больших радиационных

потерь мощности из плазмы, является накопление в центральной секции термализованных продуктов синтеза. Проведенные модельные расчеты позволяют сформулировать требования к системе резонансной откачки, обеспечивающей очистку плазмы центральной секции от шлаков. Полученные результаты говорят о том, что дополнительные меры по удалению шлаков из плазмы должны привести к значительному повышению энергетической эффективности реактора.

10. Газовые статистические методики расчетов, пакеты программ и результаты численного моделирования переданы в ИАЭ им. И. В. Курчатова для использования их при разработке физического обоснования проекта малорадиоактивного термоядерного реактора и анализа экспериментальных результатов на действующих установках.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

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

2. Kinetics and analysis 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. - Vienna, 1989. - P. 673-682.

3. Полетаев Д. Л. Влияние неадиабатичности движения на кинетику частиц в ловушке со встречными магнитными полями //Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. - 1989. - Вып. 3. - С. 65-68.

4. Анализ магнитного реактора на D^3He топливе/ В. И. Хвесюк, Н. В. Шабров, Д. Л. Полетаев, В. В. Костенко // Труды Всесоюзного совещания по малорадиоактивному термоядерному синтезу на основе D^3He II-12 апреля 1990 г. - Москва. - 1991. - 150 с.

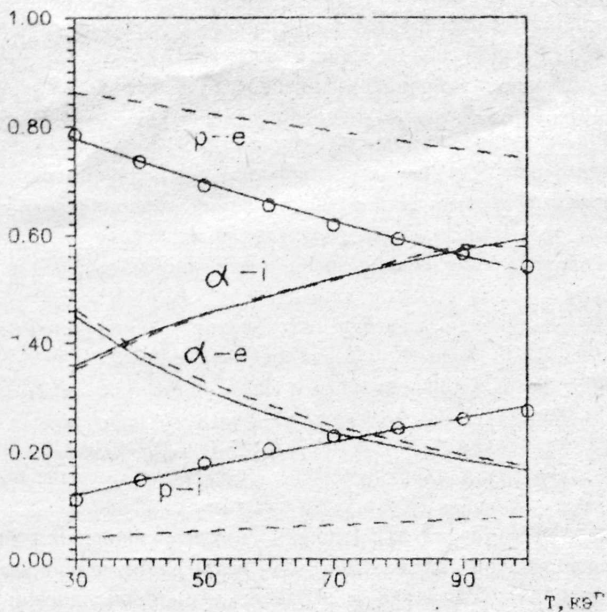


Рис. 1. Доля энергии протонов и α -частиц, которые идут на нагрев ионов и электронов D^3He плазмы

$$(R=10, 4\Phi_e=3T_i, T_i=T_e),$$

○ - результаты расчета с учетом ядерных упругих столкновений,

— по формулам (3.16, 3.17),

--- только кулоновские столкновения.

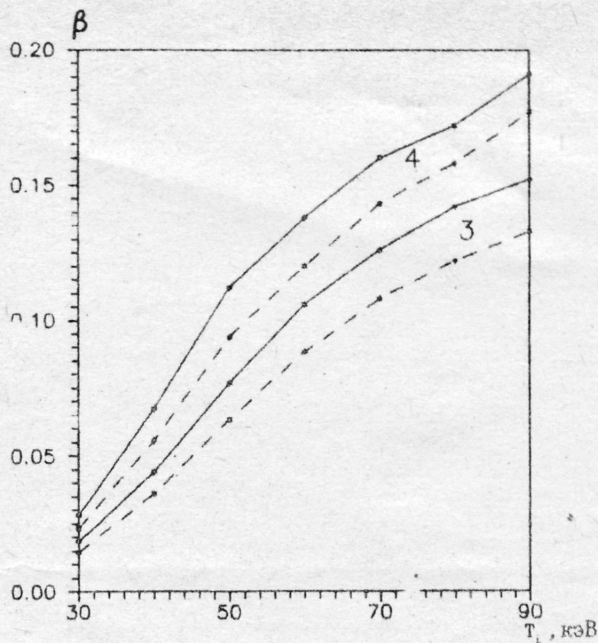


Рис. 2. Суммарная Σ шлаков в центральной секции реактора для $\beta=0.7$ в зависимости от температуры ионов, $\Delta\phi_i/T_i$ (4 - $\Delta\phi_i/T_i=4$, 3 - $\Delta\phi_i/T_i=3$) и пробочного отношения:
 ————— $R = 5$, - - - - - $R = 2$

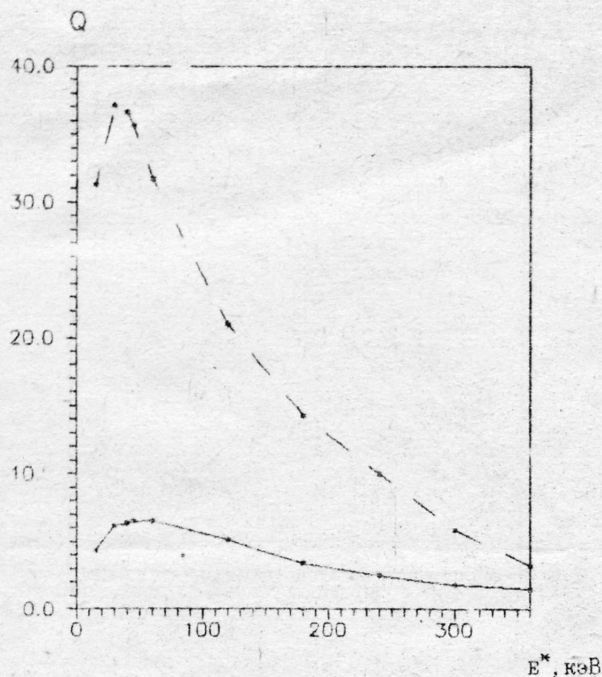


Рис. 3. Коэффициент усиления мощности в плазме центральной секции для $\rho=0.7$, $T_e=60$ кэВ, $\Delta T_e/T_e = 4$, $R = 5$ в зависимости от резонансной энергии и интенсивности отражки шлаков:
 — $\tau^*=10^{-1}$ с, --- $\tau^*=10^{-2}$ с