

1572659

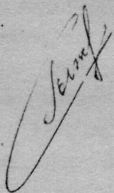
На правах рукописи

Рыжков Сергей Витальевич

МОДЕЛИРОВАНИЕ И АНАЛИЗ
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ D-³He ТЕРМОЯДЕРНОЙ ПЛАЗМЫ
ОБРАЩЕННОЙ МАГНИТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

01.04.14 - теплофизика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук



Москва - 2001

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете
им. Н. Э. Баумана

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

НТБ МГТУ им. Н. Э. Баумана



1572659

Рыжков С.В. Моделирование

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор ФРАНК А.Г.
кандидат технических наук,
стар. науч. сотрудник БИШАЕВ А.М.

исследовательский Институт Электро-
Аппаратуры им. Д.В. Ефремова

1572659

Рыжков С.В.

Моделирование и ана-
лиз теплофизических

2001

0.00

2001 г. в 16.00 часов на заседании
11.08 при Московском государственном
Э. Баумана по адресу: 107005, Москва,
гомашиностроение".

ся в библиотеке МГТУ им. Н.Э. Баумана.
ях, заверенные печатью, просьба
Бауманская ул., д. 5, МГТУ им.
онного совета Д212.141.08.

01 г.

КОПОСОВ Е. Б.

ем 1.0 п.л. Тираж 100 экз.

Баумана. Заказ 53т.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Развитие современной науки и техники настоятельно требует исследования и разработки высокоэффективного малорадиоактивного термоядерного реактора, обеспечивающего безопасную и дешевую электроэнергию.

Необходимость получения дешевой и безопасной энергии, в свою очередь, заставляет ученых, кроме тщательного изучения уже известных устройств, искать новые пути достижения цели, а именно стационарного удержания плазмы и промышленного получения электроэнергии в реакторах синтеза. И хотя уже достигнуты определенные успехи по направлению осуществления зажигания $D-T$ термоядерной реакции и строительства коммерческого реактора на основе токамака, за последние годы все большее внимание обращается на так называемые улучшенные топливные циклы и альтернативные системы.

Основные проблемы, с которыми сталкиваются во всех термоядерных устройствах, использующих принципы магнитного и инерционного удержания, включают в себя нагрев плазмы, подпитку топливом, контроль примесей, равновесие и устойчивость конфигурации. Системы магнитного удержания плазмы делятся на две категории. В первой категории магнитные силовые линии являются замкнутыми в области удержания. Представители этого класса - токамак, стелларатор, сферический токамак. К другой категории относятся системы, в которых силовые линии выходят за пределы области удержания (на бесконечность). Пример таких устройств - обращенная магнитная конфигурация (FRC - field reversed configuration), сферомак, амбиполярный реактор, газодинамическая ловушка.

FRC относится к альтернативным термоядерным схемам. Это направление выделялось из прямых, т.е. н-торондальных пинчевых систем с большим β (отношение газокINETического давления плазмы к давлению магнитного поля). Однако, по способу удержания, обращенная конфигурация принадлежит к замкнутым ловушкам. В рассматриваемой компактной цилиндрической системе плазма удерживается поперечным магнитным полем. Сепаратриса, разделяющая замкнутые и разомкнутые силовые линии, является естественной границей горячей плазмы. Плазма проводит азимутальный ток, который обращает направление внешнего приложенного поля. Преимуществами FRC являются простота геометрии, высокие β и удельные мощности синтеза, естественный дивертор и дешевизна.

Использование $D-T$ (дейтерий-тритий) реакции синтеза приводит к тому, что радиационная безопасность такого реактора сопоставима с.

опасностью ядерных реакторов, а стоимость электроэнергии от термоядерных электростанций не ниже стоимости электричества от АЭС.

Поэтому, более обещающим и надежным выглядит создание термоядерных реакторов с малой радиационной опасностью. Такую перспективу открывает использование в качестве топлива смеси дейтерия с гелием-3 (D^3He). При этом биологическая опасность термоядерных реакторов снижается на четыре-пять порядков величины по сравнению с ядерными реакторами, полностью отпадает необходимость обработки радиоактивных материалов и их транспортировки, качественно упрощается захоронение радиоактивных отходов.

В связи с этим, большой практический интерес представляет разработка и исследование компактных, простых в эксплуатации высокоэффективных коммерческих реакторов, работающих на малорадиоактивном топливе. Поэтому, на сегодняшний день наиболее актуальными направлениями развития и совершенствования термоядерных систем являются:

1. Осуществление зажигания термоядерной реакции, получение положительного энергетического выхода. Ближе всех к этой цели находятся токамаки. На действующих установках (DIII-D, JET, JT-60) этого достичь не удастся и поэтому одновременно запущено несколько дорогостоящих проектов (ITER, FIRE).

2. Изучение малорадиоактивных топлив (отсутствие нейтронов или минимальное радиационное загрязнение), альтернативных конфигураций (по отношению к токамаку) и продуктов синтеза. Кроме давно рассматриваемых D^3He , $p-^{11}B$ реакций теперь более тщательно исследуются и другие топливно-энергетические циклы (D^3He-D , D^3He-^6Li).

3. Получение стабильного удержания плазменного ядра (на данный момент на стеллараторе LHD время удержания конфигурации/ импульса равно 30 с), решение проблем аномального транспорта, вопросов равновесия плазмы, включая кинетическую и МГД-устойчивость.

Итогом деятельности в названных направлениях должно стать создание радиационно безопасных высокоэффективных термоядерных установок (коммерческий реактор), обеспечивающих дешевую электроэнергию и использующих последние достижения в области техники и физики плазмы.

Эта работа направлена на то, чтобы оценить возможности и преимущества D^3He FRC термоядерного реактора, основанного на методе формирования потока и поддержания тока вращающимся магнитным полем (RMF – rotating magnetic field). Эксперименты по данному методу начались недавно на установках TCS (Translation, Confinement, and Sustainment) и STX (Star Thrust Experiment) в Вашингтонском Университете (г. Сиэтл).

Цель работы

Фундаментальная проблема - теоретическое исследование и анализ тепло и плазмифизических процессов в термоядерных установках, конкретно в системах с обращенным магнитным полем, способных работать в широком диапазоне температур, магнитного поля и применяемых топлив. Основными целями данной работы являются:

- оценка осуществимости управляемой $D-^3He$ термоядерной реакции, определение с помощью энергобаланса наиболее характерных параметров плазмы реактора на основе обращенной магнитной конфигурации;
- изучение способов повышения энергетической эффективности FRC реактора при минимальном нейтронном выходе;
- определение максимально возможных параметров термоядерного реактора, поиск условий, обеспечивающих максимальную энергетическую эффективность $D-^3He$ плазмы и минимальную стоимость электричества; обоснование критериев и условий удержания плазмы в FRC.

Научная новизна работы

1 В работе поставлена и решена задача анализа $D-^3He$ плазмы термоядерного реактора на основе обращенной магнитной конфигурации с учетом баланса мощностей малорадиоактивного плазменного ядра.

2. Впервые в расчетах концептуальных проектов учтен метод поддержания тока посредством вращающегося магнитного поля (не θ -пинч).

3. Предложен принцип неработки 3He на Земле в ходе реакции $p-^6Li$. Представлены схемы реализации топливно-энергетического комплекса $D-^3He-^6Li$. Сделан предварительный анализ получения 3He и эффективности таких схем.

Научная и практическая ценность работы

Рассчитан баланс мощностей малорадиоактивной плазмы $D-^3He$ термоядерной электростанции, основанной на обращенной магнитной конфигурации. Выполнены оценки процессов энергообмена в плазме и накопления продуктов синтеза (протонов и альфа-частиц).

Получены условия удержания высокоэнергетичных продуктов $D-^3He$ реакции в области замкнутых и разомкнутых силовых линий для различных моделей обращенного поля (сферическая, эллиптическая и форма сепаратрисы в виде стадиона). Для фоновой плазмы проанализированы зависимости времен жизни частиц и энергии, и показано, что скейлинговые времена удержания в FRC зависят от транспортных режимов и геометрических параметров.

В результате проведенного анализа установлены существенные технические преимущества $D-^3\text{He}$ FRC термоядерного реактора – альтернативной схемы с малорадиоактивным горючим – по сравнению с токамаками и другими магнитными системами на $D-T$ топливе.

Разработаны три комбинированные реакторные схемы на основе $D-^3\text{He}-^6\text{Li}$ топлива с целью наработки ^3He на Земле и получены результаты по возможности дальнейшего использования этого альтернативного топливно-энергетического цикла.

Предложены формулы для мощности тормозного излучения (аппроксимирующие результаты численных квантово-электродинамических расчетов) из полностью ионизованной плазмы для случая релятивистских температур электронного газа ($T_e=10^1 \dots 10^4$ кэВ).

Показана возможность осуществимости управляемой термоядерной реакции в FRC на $D-^3\text{He}$ топливе. Выявлены параметры $D-^3\text{He}$ плазмы, обеспечивающие положительный энергетический выход, и наиболее эффективные режимы работы реактора.

Впервые получены характеристики FRC реактора с применением метода поддержания тока вращающимся магнитным полем, служащего также для формирования и увеличения потока. С учетом этого смоделированы плазменные процессы.

Проведен анализ времен удержания энергии и частиц плазмы FRC. Предложена обобщенная формула удержания энергии для настоящего статуса экспериментов (столкновительная плазма).

На защиту выносятся:

1. Результаты численного моделирования многокомпонентной $D-^3\text{He}$ плазмы термоядерного реактора на основе FRC, оценки осуществимости управляемой реакции в этой системе;
2. Баланс мощностей $D-^3\text{He}$ малорадиоактивной плазмы и способы повышения эффективности реактора синтеза при минимальном нейтронном выходе;
3. Оптимальные характеристики термоядерного реактора, обеспечивающие минимальную стоимость электричества;
4. Формулы для оценки времен удержания энергии и частиц в FRC;
5. Оптимизация параметров плазмы с точки зрения условий удержания и достижения максимальной энергетической эффективности.

Апробация работы

Основные результаты диссертационной работы были представлены и обсуждены в докладах на XXV и XXVIII конференциях по физике плазмы и УТС (Звенигород, 1998 и 2001 г.г. соответственно) и международных конференциях: "Congress on Plasma Physics & 25th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics" (Пара, 1998), "International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement" (Новосибирск, 1998) и (Цукуба, 2000).

Публикации

По теме диссертации опубликовано 7 печатных работ.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав и заключения. Работа содержит 131 страницу машинописного текста, в том числе 24 рисунка и 16 таблиц. Библиография насчитывает 105 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, поставлены цель и задачи работы, сформулированы положения, определяющие новизну и практическую ценность полученных результатов, перечислены положения, выносящиеся на защиту.

В первой главе проведен анализ современного состояния термоядерных систем, использующих принцип магнитного удержания и связанных с созданием эффективных электростанций.

В данной главе кратко изложено состояние исследований по разработке малорadioактивного термоядерного реактора с $D-^3He$ топливом. Рассмотрены некоторые подходы к моделированию таких систем и характерные особенности реакторной плазмы. Показаны параметры основных концептуальных проектов на основе токамака и FRC.

В заключении обзора термоядерных систем показана целесообразность и важнейшие направления дальнейшего изучения магнитных конфигураций и альтернативных топлив в соответствии с современными и перспективными технологическими запросами.

В результате проведенного анализа литературы были сформулированы задачи работы.

Во второй главе описана математическая модель, приведены исходные данные для расчета и представлены параметры плазмы и оптимальный режим работы реактора на основе FRC.

Приводится анализ квазиравновесной конфигурации $D\text{-}^3\text{He}$ многокомпонентной плазмы в системе с обращенным магнитным полем. Представлена математическая модель теплофизических процессов термоядерного реактора. Учитывается, что в плазме присутствуют компоненты с неравновесной функцией распределения - тестовые частицы и компоненты с максвелловской функцией распределения - фоновые частицы (для $D\text{-}^3\text{He}$ плазмы эти числа равны соответственно 3 и 3).

В работе учтены четыре основные реакции: $^3\text{He}(d, p)^4\text{He} + 18353 \text{ кэВ}$, $D(d, n)^3\text{He} + 3269 \text{ кэВ}$, $D(d, p)^3\text{He} + 4033 \text{ кэВ}$ и $T(d, n)^4\text{He} + 17589 \text{ кэВ}$. Все единицы в СИ кроме температуры и энергии, которые выражены в кэВ.

Представленные вычисления основаны на сравнительно простом аналитическом квазиравновесии, которое может быть использовано для определения профилей плотности, температуры и тока плазмы. Интегрированием этих профилей получены удельные энергии и другие параметры, необходимые для расчета баланса мощности, которого требует моделирование плазменного ядра FRC. Произведено сравнение конфигурации Hill's vortex с более реалистичным равновесием формы racetrack. Для расчетов была выбрана последняя модель, потому что реальное равновесие обычно имеет меньшую эллиптичность границы сепаратрисы, чем Hill's vortex, т.е. более похоже на "стадион" (racetrack). Построены профили магнитного поля, плотности тока, давления, плотности и температуры плазмы квазиравновесной конфигурации.

Показаны мощности плазмы и энергетические потоки для термоядерной электростанции. Приведены формулы для энергобаланса плазмы FRC и баланса мощности для электронной компоненты, предназначенного для получения самосогласованной температуры электронов. В них учтены мощности заряженных частиц, передача энергии от продуктов синтеза фоновой плазме, нейтроны, циклотронное и тормозное излучения. Главным преимуществом баланса мощностей плазмы является получение энергетических характеристик и параметров.

Для проведения численного моделирования заданы макропараметры системы, определяющие характеристики термоядерной плазмы, т.е. исходные данные для расчета. Начальные геометрические параметры выбраны из соображений компактности системы и удобства обслуживания реактора, а значения магнитного поля, температуры и концентраций топлива приняты, исходя из условий получения наибольшего энергетического выхода $D\text{-}^3\text{He}$ реакции.

В результате вычислений выбран оптимальный, с точки зрения физики/инженерии (максимальная выходная энергетическая мощность) и экономики

(минимальная стоимость электричества), вариант и приведены основные параметры $D\text{-}^3\text{He}$ плазмы и характеристики FRC реактора (табл. 1).

Таблица 1.

Радиус сепаратрисы, r_s	1.25 м
Длина сепаратрисы, l_s	30.75 м
Вытянутость, k_{ifc}	12.26
Радиус первой стенки, r_w	1.77 м
Радиус 0-точки, R_0	0.89 м
Радиус сепаратрисы / радиус катушки, x_s	0.71
Объем плазмы, V_D	121.5 м ³
Площадь проводящей стенки, S_w	341.2 м ²
Ток плазмы, I	299.75 МА
Внешнее магнитное поле, B_e	6.39 Тл
Бета, усредненное по объему, $\langle\beta\rangle$	75 %
Средняя температура ионов, T_i	71.96 кэВ
Средняя температура электронов, T_e	71.85 кэВ
Ионная температура 0-точки, T_{0i}	72.5 кэВ
Электронная температура 0-точки, T_{0e}	72.39 кэВ
Средняя плотность ионов, n_i	$3.25 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$
Средняя плотность электронов, n_e	$5.07 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$
Энергетическое время удержания, τ_E	1.46 с
Топливо, $^3\text{He} / \text{D}$	50% / 50%
Термоядерная мощность, P_f	1937 МВт
Заряженные частицы, P_a	1192 МВт
Нейтроны, P_n	49 МВт
Излучение, $P_{\text{brems}} + P_{\text{syn}}$	745 МВт
Электрическая мощность, P_{encl}	1000 МВт
Коэффициент усиления мощности, Q	40.1
Мощность дополнительного нагрева, P_{inj}	49.5 МВт
Мощность RMF, P_{rmf}	32.6 МВт
Эффективность системы, $E_{f,\text{sys}}$	49.8 %
Стоимость электричества, COE	0.045 \$/кВт·ч
Объем камеры сгорания, V	301 м ³
Поток на стенку, P_t	2.18 МВт/м ²
Нейтронный поток, P_{nwall}	0.14 МВт/м ²

Для того чтобы построить стационарный реактор на основе FRC, необходимо разработать метод формирования магнитного потока и поддержания тока. Образование конфигурации на основе θ -пинча было удачно использовано в предыдущих экспериментах, но плохо экстраполируется к режиму термоядерной электростанции (коммерческий реактор). За последнее время были найдены другие жизнеспособные методы с разумными входными энергиями. Ранее были определены и смоделированы требования для двух способов: слияние сфермаков и поддержание тока вращающимся магнитным полем (RMF). В этой работе выбран второй метод.

Формирование потока и поддержание устойчивости плазменной конфигурации вращающимся магнитным полем является важным инструментом, т.к. приводит к равновесию плазмы и сохранению константами интегралов движения (E и P_0). Более того, отмечено, что метод RMF обладает высокой эффективностью, как при поддержании тока, так и при стабилизации tilt-неустойчивости.

Для плазмозфизического расчета FRC использован код WISC, который вычисляет параметры плазмы, включая плотность всех сортов частиц, и энергетические характеристики реактора интегрированием соответствующих профилей магнитного поля, плотности и температуры плазмы. Код содержит физические, инженерные и экономические модели, которые являются стандартными моделями для системного анализа.

С точки зрения энергетической эффективности термоядерного реактора наибольший интерес представляет плазменный коэффициент усиления мощности (рис. 1). Как видно из рисунка, достаточный положительный энергетический выход ($Q > 10$) из $D\text{-}^3\text{He}$ плазмы может быть достигнут при температуре горючего 60-90 кэВ.

Представленная функция имеет немонотонный характер с точкой максимума. Полученное в работе значение коэффициента ($Q=40.1$) является более чем надежным запасом для работы реактора на основе FRC. Отметим, что это не случайное совпадение, а результат правильного моделирования тепло и плазмозфизических процессов обращенной конфигурации, оптимизации энергетических характеристик $D\text{-}^3\text{He}$ плазмы и геометрических размеров FRC реактора. Следует также заметить, что существенное увеличение плазменного коэффициента усиления мощности может быть достигнуто в результате применения методов принудительного удаления частиц-продуктов синтеза, один из которых (метод селективной откачки шлаков) разработан в МГТУ им. Н.Э. Баумана.

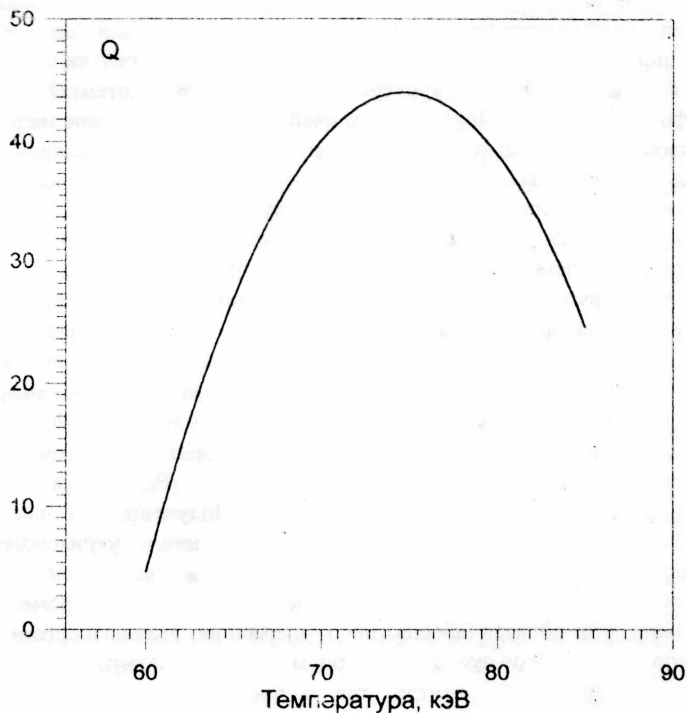


Рис. 1. Зависимость коэффициента усиления мощности в плазме обращенной магнитной конфигурации от температуры топлива

В третьей главе представлены критерии удержания продуктов синтеза в обращенной магнитной конфигурации. Определены зависимости времен удержания фоновых частиц и энергии плазмы. Показано влияние правильного учета тормозного излучения в термоядерной плазме.

Для решения поставленных в данной работе задач потребовалось провести большой объем теоретических исследований в области физики продуктов $D-^3\text{He}$ реакции, излучения плазмы высоких температур ($T_e \sim 100 \text{ кэВ}$). Получены области удержания высокоэнергетичных частиц в обращенной магнитной конфигурации, проанализированы времена удержания энергии и частиц фоновой плазмы FRC и предложены простые формулы для вычисления удельной мощности тормозных потерь,

аппроксимирующие результаты численных расчетов с использованием методов квантовой электродинамики.

Для понимания физики процессов (в том числе передачи и потерь энергии) в FRC выработаны критерии удержания высокотемпературных частиц и фоновой плазмы. Показано, что скейлинги времен жизни энергии и частиц горючего в FRC зависят от транспортных режимов и геометрических параметров. Улучшенные формулы сравнены с другими эмпирическими и теоретическими скейлинговыми законами. Полученные зависимости времен удержания хорошо согласуются с экспериментальными измерениями (для данного статуса экспериментов: $T_i \leq 3$ кэВ) потерь энергии и частиц.

С целью выявления потенциальных возможностей конфигураций исследованы аналитические модели равновесия FRC, обеспечивающие удержание энергии и частиц. Для вывода критериев удержания продуктов реакции – высокоэнергетичных протонов и альфа-частиц – выбраны интегралы движения: полная энергия – E и обобщенный импульс – P_θ .

Для сферической конфигурации Hill's vortex и вытянутого равновесия gasetrack построены области удержания в координатах (P_θ , E). Все расчеты выполнены для протона с энергией 14,7 МэВ. Получено, что для всех рассмотренных моделей область абсолютного удержания (внутри системы), как по энергии, так и по каноническому угловому моменту больше, чем область удержания в замкнутом поле (внутри сепаратрисы). Кроме того, сделан вывод, что область абсолютного удержания высокоэнергетичных частиц расположена в слое около сепаратрисы (диапазон радиусов, близких к радиусу сепаратрисы), как внутри, так и вне ее и продукты синтеза удерживаются там наиболее эффективно.

Как показали расчеты, равновесие gasetrack представляет собой наибольший интерес, т.к. области удержания для данной конфигурации максимальны по сравнению с Hill's vortex. Области абсолютно удерживаемых частиц в координатах (P_θ , E) превосходят области частиц внутри сепаратрисы не зависимо от того, какое – радиальное или аксиальное – удержание преобладает (радиальное преобладает если максимально допустимая эквипотенциальная поверхность касается радиальной стенки системы до того, как она коснется торцевой).

За последние три десятилетия исследования FRC был достигнут прогресс в понимании и предсказании удержания энергии и частиц плазмы различными методами и теориями. Более того, главные вопросы физики обращенной конфигурации, такие как магнитное перезамыкание, эффекты конечного ларморовского радиуса и транспортные процессы в X-точке, точке нуля поля и на сепаратрисе были изучены с теоретической и экспериментальной точек зрения. Тем не менее, все еще остается открытым

вопрос о главном механизме потерь энергии и частиц плазмы. Различие между эмпирическими и классическими скейлинговыми законами предполагает, что потери в FRC имеют аномальный характер. Однако, нижнегибридная дрейфовая (НГД), низкочастотная дрейфовая (НЧД) и другие теории не описывают транспорт в FRC адекватно. Необходим полный кинетический анализ плазмы и исследование транспортных эффектов для различных режимов и параметров системы. Это должно быть критической целью в исследовании FRC. Правильный выбор и контроль профилей температуры, плотности и магнитного поля, тоже играют очень важную роль.

Наши результаты, полученные благодаря использованию теории потерь частиц в пространстве скоростей, показали, что значительная доля удерживаемых частиц (компоненты топлива и продукты синтеза) может выходить через сепаратрису и все еще удерживаться в системе в зависимости от значений интегралов движения.

Тормозное излучение является неизбежным механизмом потерь энергии из высокотемпературной плазмы. Как показывает анализ балансов мощностей альтернативных термоядерных топливных циклов ($D\text{-}^3\text{He}$, $D\text{-}D$, $p\text{-}^{11}\text{B}$, $p\text{-}^6\text{Li}$ и др.), важнейшая энергетическая характеристика, - коэффициент усиления мощности в плазме Q , - очень сильно зависит от мощности тормозных потерь, так как, при определенных условиях, в этих циклах тормозное излучение может уносить более половины выделяемой термоядерной мощности. В работе представлены результаты расчетов мощности и спектров. Формулы для тормозных потерь, вычисленные здесь с использованием квантово-электродинамического подхода, пригодны для широкого диапазона плазменных температур (10-10000 кэВ). Следует отметить, что полученные выражения для расчета тормозного излучения требуются для точных кинетических оценок и вычислений энергетического баланса плазмы при температурах оптимальных для рассматриваемых термоядерных реакций.

В четвертой главе сформулирована концепция высокоэффективной компактной электростанции на основе обращенной магнитной конфигурации, работающей на малорадиоактивном топливе. Результаты, полученные в процессе комплексного теоретического исследования, - это оптимальные параметры $D\text{-}^3\text{He}$ плазмы и термоядерного реактора на основе FRC на сегодняшний день. Характеристики термоядерной электростанции сравнены с параметрами аналогичных концептуальных установок, затронута проблема получения гелия-3. Используя в качестве критерия эффективности плазменный коэффициент усиления мощности Q , найдены параметры, при которых в плазме реализуется наибольший положительный энергетический выход, а система имеет наибольшую эффективность.

Часть главы посвящена изучению возможности обеспечения гелием-3 малорадиоактивных реакторов на $D\text{-}^3\text{He}$ топливе. В работе предложен и исследован $D\text{-}^3\text{He}\text{-}^6\text{Li}$ топливно-энергетический цикл, обеспечивающий (полное или частичное) получение ^3He на Земле (в ходе реакции $p\text{-}^6\text{Li}$). Рассмотрены и проанализированы три реакторные схемы на его основе.

Энергетический баланс $D\text{-}^3\text{He}$ FRC реактора, соответствующий температуре горючего 72,5 кэВ и внешнему магнитному полю 6,4 Тл при $\beta=0,75$ представлен на рис. 2. В работе приведено его сравнение с балансом мощностей в центральной секции $D\text{-}^3\text{He}$ амбиполярного реактора (78 кэВ, 5 Тл, 0,7). В данной работе выполнен анализ плазмы с учетом примесей и получены удовлетворительные результаты без использования селективной откачки. Естественно, что FRC с системой откачки продуктов синтеза будет обладать лучшими энергетическими и экономическими характеристиками.

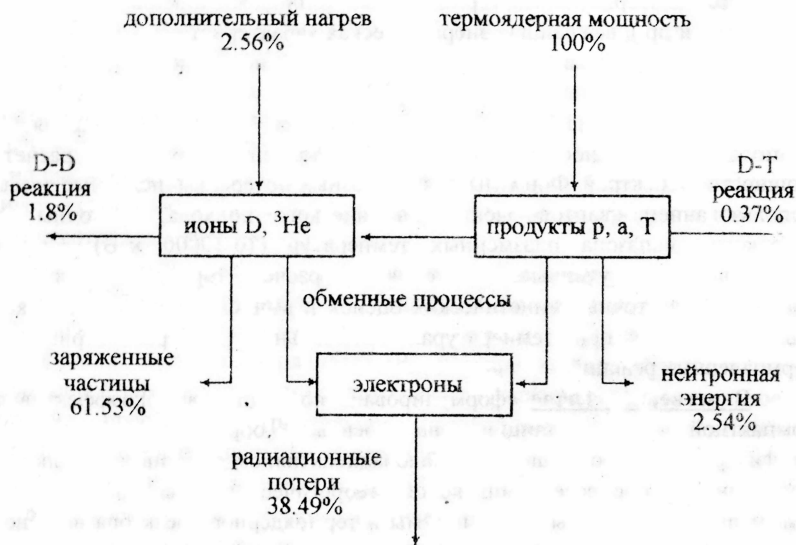


Рис. 2. Энергетический баланс $D\text{-}^3\text{He}$ плазмы (в % к полной мощности термоядерного синтеза) реактора на основе FRC

Чтобы показать преимущество простой геометрии и выгоду альтернативного топлива, приведено сравнение $D-^3He$ FRC и его главных оппонентов $D-T$ токамака и FRC. Обращенная магнитная конфигурация, использующая малорадиоактивное топливо, имеет по сравнению с аналогичной $D-T$ установкой лучшие показатели по следующим параметрам: меньшая нейтронная мощность (0.15 MBt/m^2 и 5 MBt/m^2 соответственно), наибольшие удельное энергосодержание (15.5 MBt/m^3 и 5.5 MBt/m^3) и эффективность системы (50% и 44%).

По сравнению с термоядерными реакторами на основе токамаков и FRC на $D-T$ топливе, представленная $D-^3He$ FRC электростанция более компактна, имеет существенно меньшие массогабаритные характеристики и обладает принципиальными достоинствами, позволяющими использовать перспективные технические методы (в том числе, методы поддержания устойчивости плазмы и преобразования энергии) и получать безопасную и дешевую электроэнергию.

Предшествующий концептуальный проект $D-^3He$ FRC реактора ARTEMIS включает в себя образование магнитной конфигурации на основе θ -пинча, перевод ее из качеры формирования в камеру сгорания, где плазма поддерживается инжекцией нейтральных частиц, и волновое прямое преобразование тепловой энергии протонов ($\sim 15 \text{ МэВ}$) в электрическую до того, как они замедлились на фоновой плазме (передали ей свою энергию). Упомянутая схема не подтверждена экспериментально в отличие от данной работы, где предполагается использовать электростатическое прямое преобразование, апробированное на экспериментах малого масштаба.

Более того, в ARTEMIS сделаны значительные допущения, что приводит к возникновению ошибок. Например, температуры ионов и электронов принимаются равными, т.е. нет элементарного расчета электронного баланса. Параметры, определяющие балансы энергии и частиц, также вычислены с упрощениями. Так, например, предполагается мгновенный уход части продуктов синтеза (время удержания $\tau_E = 0$) из реактора в систему прямого преобразования. При этом пренебрегается передачей энергии от этих частиц к ионам горючего и электронам.

В целом, результаты теоретических и экспериментальных исследований свидетельствуют об эффективности, универсальности и экономичности разработанных и предлагаемых устройств на основе обращенной магнитной конфигурации.

В заключение следует отметить, что итогом работы стало получение удовлетворительных результатов - на рассмотрение выносится часть концептуального проекта $D-^3He$ термоядерного реактора на основе FRC. На данный момент изучены привлекательные характеристики

малорадиоактивной термоядерной электростанции и сделаны первые шаги к пониманию транспорта и стабильности FRC реактора.

Полученный коэффициент усиления мощности плазмы ~ 40 обеспечивает возможность работы в стационарном режиме. Общая масса реактора намного меньше массы $D-T$ или атомных электростанций. Все это совместно с простотой геометрии и удобством эксплуатации приводит к цене электричества $\sim 4,5$ цента за киловатт-час, что намного ниже по сравнению с тскамаками, и делает $D-^3\text{He}$ FRC электростанцию наиболее вероятным кандидатом в качестве термоядерного реактора.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. В работе впервые поставлена и решена задача теплофизического анализа $D-^3\text{He}$ термоядерной электростанции, основанной на обращенной магнитной конфигурации (FRC), с учетом баланса мощностей малорадиоактивной плазмы в широком диапазоне температур ($T = 50 \dots 100$ кэВ). Выполнены оценки процессов энергообмена в плазме и накопления продуктов синтеза (протонов и альфа-частиц).

2. В качестве формирования и поддержания плазменной конфигурации (подтвержден недавними экспериментальными данными) учтен метод увеличения потока и поддержания тока вращающимся магнитным полем. С учетом этого смоделированы плазменные процессы и исследованы различные физические, инженерные и экономические факторы. В ходе теоретического исследования плазменного ядра FRC установлено существенное влияние внешнего магнитного поля и метода формирования потока на удержание и устойчивость конфигурации.

3. Получены критерии удержания продуктов $D-^3\text{He}$ реакции внутри сепаратрисы и в системе вообще для конфигурации Hill's vortex и улучшенного равновесия gasetrack. Проанализированы зависимости времен жизни частиц и энергии, и показано, что скейлинговые времена удержания в FRC зависят от транспортных режимов и многих инженерных параметров.

4. Разработаны три комбинированные реакторные схемы на основе $D-^3\text{He}-^6\text{Li}$ топлива с целью наработки ^3He на Земле и получены результаты по возможности дальнейшего использования этого альтернативного топливно-энергетического цикла.

5. Выработаны критерии высокой энергетической эффективности (плазменный коэффициент усиления мощности $Q \geq 10$) термоядерного $D-^3\text{He}$ реактора на основе обращенной магнитной конфигурации.

6. Предложены формулы для мощности тормозного излучения (аппроксимирующие результаты численных квантово-электродинамических

расчетов) из полностью ионизованной плазмы легких элементов ($Z_1 < 137$) для случая релятивистских температур электронного газа ($T_e = 10^1 \dots 10^4$ кэВ).

7. На рассмотрение выносятся характеристики плазмы и реактора синтеза, обладающие высокой энергетической эффективностью и минимальными экономическими затратами. В результате проведенного анализа установлены существенные технологические преимущества (отсутствие blankets, возможность использовать жидкие первые стенки и систему прямого преобразования энергии) D^3He FRC термоядерного реактора – альтернативной схемы с малорадиоактивным горючим – по сравнению с токамаками и другими магнитными системами на $D-T$ топливе.

Основные результаты диссертации отражены в публикациях:

1. Khvesyuk V. I., Ryzhkov S. V. Analysis of D^3He - 6Li Fuel Cycle // Summary of IAEA TCM on Innovative Approaches to Fusion Energy. - Pleasanton, 1997. - P. 29-31.

2. Хвесьюк В.И., Чирков А.Ю., Рыжков С.В. Радиационные потери из плазмы с учетом релятивизма и квантовых эффектов // Вторая Российская Национальная Конференция по Теплообмену.: Труды. - Москва, 1998. - Т. 6. - С. 382-385.

3. Chirkov A. Yu., Khvesyuk V. I., Ryzhkov S. V. Modified Open Systems for Low Radioactive Fusion Reactors // Fusion Technol. - 1999. - V. 35 (1T). - P. 393-397.

4. Ryzhkov S. V. Energy and Particle Confinement Times for a Field-Reversed Configuration. - Madison: University of Wisconsin, Fusion Technology Institute, 1999 (UWFD-1102). - 7 p.

5. Santarius J. F., Mogahed E. A., Emmert G. A., Khater H. Y., Nguyen C. N., Ryzhkov S. V. et al. Final Report for the Field-Reversed Configuration Power Plant Critical-Issue Scoping Study. - Madison: University of Wisconsin, Fusion Technology Institute, 2000 (UWFD-1129). - 72 p.

6. Рыжков С.В. Проблема удержания частиц в компактном торе // Тез. докладов XXVII конференции по физике плазмы и УТС. - Звенигород, 2000. - С. 56.

7. D^3He Field Reversed Configuration Fusion Power Plant / V. I. Khvesyuk, S. V. Ryzhkov, J. F. Santarius et al. // Fusion Technol. - 2001. - V. 39 (1T). - P. 410-413.

Автор выражает благодарность д-ру Джону Ф. Сантариусу (Университет Висконсин-Мэдисон, США) за помощь в работе, ценные замечания и полезные обсуждения.