

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

ВОИЦЕНЯ Владимир Сергеевич

ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ
И ПОСТУПЛЕНИЕ ПРИМЕСЕЙ В УСТАНОВКАХ СТЕЛЛАТОРНОГО ТИПА

Специальность 01.04.08 - физика и химия плазмы

Диссертация
на соискание ученой степени доктора
физико-математических наук
в форме научного доклада

Харьков 1992



00825727 (V)

№ 26.68

Работа выполнена в Харьковском физико-техническом институте

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
Бужинский О.И. (ТРИНИТИ, г.Троицк,
Московской обл.)

доктор физико-математических наук,
Бревнов Н.Н. (РИЦ, Курчатовский
институт, г.Москва)

доктор физико-математических наук,
профессор Степанов К.Н.
(ХФТИ, г.Харьгов)

Ведущая организация: Институт физики АН Украины, г.Київ

Защита состоится 12 февраля 1993 г. в 15⁰⁰ часов на
заседании специализированного совета Д.053.06.01 при Харьковском
государственном университете по адресу: ЗІОІОВ, Харьков,
пр.Курчатова, ЗІ, ауд.ЗОІ.

С диссертацией можно ознакомиться в центральной научной
библиотеке ХГУ.

Диссертация разослана " 11 " января 1993 г.

Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физико-математических наук,
доцент

В.И.Лапшин

В.И.Лапшин

1. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

1.1. Актуальность темы. В настоящее время в программе магнитного удержания плазмы стеллараторная программа играет роль основного альтернативного и поддерживающего направления исследований на токамаках. Наглядное свидетельство тому - запуск в 80-е годы целого ряда установок ("Ураган-3", Heliotron-E, CHS, ATF, W-7AS) с параметрами, близкими к параметрам токамаков средних размеров, и ведущиеся сейчас работы над проектами стеллараторных установок (LHD, W-7X) с параметрами, соответствующими крупнейшим из действующих токамаков.

Важнейшей составной частью программы исследований на стеллараторах (как и на токамаках) является изучение взаимодействия плазмы с поверхностью, поскольку в конечном итоге вся плазма из объема удержания попадает на те или иные материальные поверхности внутри вакуумной камеры установки. Можно с уверенностью утверждать, что достигнутый в термоядерных исследованиях прогресс был бы невозможен без понимания ведущих процессов взаимодействия плазмы с поверхностью и установления главных механизмов эрозии и источников поступления примесей. (В приложении к токамакам эти вопросы подробно обсуждены в книге С.В.Мирнова "Физические процессы в плазме токамака".) Именно результаты в этих областях обеспечили правильный выбор материалов наиболее энергонапряженных элементов конструкции термоядерных установок, позволивший достичь нынешнего уровня в исследованиях по УТС.

1.2. Основные направления исследований автора: экспериментальное изучение особенностей удержания и взаимодействия плазмы с поверхностью, обусловленных спецификой стеллараторной магнитной конфигурации; определение основных механизмов эрозии элементов конструкции установок стеллараторного типа и их роли в поступлении примесей в удерживаемую плазму; изучение массопереноса примесей в установках с существенно различными характеристиками магнитной конфигурации; исследование возможности регулирования распределения плазменных потоков, попадающих на поверхности элементов вакуумной камеры установки, воздействием на количество локально запертых частиц или на уровень дрейфовых колебаний.

1.3. Новизна результатов

Автором впервые получены следующие результаты:

1) на установках типа "классического" стелларатора выполнены измерения распределений потоков плазмы в местах их попадания на стенку вакуумной камеры. Показана сильная зависимость характера распределе-

ния от вида магнитной конфигурации стелларатора и, в частности, от того, вписана в камеру крайняя замкнутая магнитная поверхность (КЗМП), или же она частично или полностью находится вне её;

2) установлен факт совпадения участков максимальной эрозии поверхности металлических стенок тороидальных участков стелларатора с локализацией областей выхода потоков плазмы; определен основной механизм эрозии - дугообразование в результате непосредственного воздействия плазменных потоков на поверхность стенок;

3) определены скорости переосаждения продуктов эрозии на поверхности, не подвергавшиеся сильному плазменному воздействию, и дано объяснение полученным значениям массопереноса;

4) на примере установки "Ураган-3" показано принципиальное преимущество торсатрона с дивертором перед классической схемой стелларатора в отношении поступления примесей в объем удержания, прежде всего, за счет удаления от него областей выхода плазменных диверторных потоков на материальные поверхности;

5) в экспериментах на этой установке определен основной механизм эрозии поверхности ВЧ-антенны из нержавеющей стали (дугообразование) и оценены величины потоков атомов с неё, свидетельствующие о ведущей роли поверхности рабочей антенны в поступлении в плазму примесей металлов. Этот факт явился основанием для покрытия ВЧ-антенны плёнкой нитрида титана, имеющего, как показали специальные исследования, большую стойкость к плазменному воздействию;

6) проведено сравнение потоков атомов металлов с поверхностями, обращенных к объему удержания, указывающее на сопоставимость вклада в загрязнение плазмы ВЧ-антенны с TiN-покрытием и соответствующих участков поверхностей коробов винтовой обмотки, несмотря на большое (в-200 раз) различие площадей, подвергаемых плазменному воздействию;

7) установлено, что в торсатроне с дивертором "Ураган-3" при использовании ВЧ-антенны с TiN-покрытием основным механизмом, ответственным за поступление в плазму примесей металлов, является распыление. Причина распыления поверхности антенны - приобретение диверторной плазмой квазипостоянного положительного потенциала, а поверхностей коробов винтовой обмотки - ВЧ-колебания потенциала в "фоновой" плазме, заполняющей пространство вне объема удержания;

8) детально изучено удержание плазмы с низкой частотой столкновений в установках стеллараторного типа, существенно различающихся величиной винтовой неоднородности магнитного поля;

9) при удержании плазмы с низкой частотой столкновений показана

возможность внешнего влияния на распределение плазменных потоков, падающих на стенки тороидальной камеры установок стеллараторного типа путем воздействия на количество локально запертых частиц возбуждением в удерживаемой плазме ВЧ-колебаний с частотами, близкими к баунс-частотам этих частиц;

10) показано, что изменением характеристик магнитной конфигурации (шира, магнитной ямы) или возбуждением в плазме ВЧ-полей в области нижнего гибридного резонанса можно эффективно воздействовать на турбулентные потери плазмы, обусловленные дрейфовыми колебаниями. В условиях, когда вклад турбулентных потерь в общем балансе частиц и энергии является большим, такой путь позволяет осуществлять до некоторой степени регулирование неоднородностей распределения полного плазменного потока на стенку.

1.4. Научная и практическая ценность работы.

1) Результаты определения областей локализации плазменного воздействия на поверхности различных элементов конструкции, механизмов и источников поступления примесей в установках стеллараторного типа используются при проведении исследований, направленных на снижение уровня загрязнения плазмы в действующих установках.

2) Выявление основного механизма эрозии поверхности стенок стеллараторов "Сириус" и "Ураган-2" (дугообразование) стимулировали разработку и реализацию специальной программы, направленной на возможное снижение вероятности образования дуг при контакте плазмы с поверхностью (Волков Я.Ф., Грибанов Ю.А.).

3) Установление ведущей роли ВЧ-антенны из нержавеющей стали в поступлении примесей металлов стимулировали исследования по изучению плазменного воздействия на TiN- и TiC-покрытия, наносимые с помощью плазменного дугового разряда (Полякова Г.Н., Летучий А.Н.). Разработана и реализуется программа по обеспечению низкого уровня примесей в плазме установки "Ураган-2М", которая топологически соответствует конструкции "классического" стелларатора (Волков Е.Д.). Разработана и реализуется программа исследований, направленная на оптимизацию стойкости TiN-покрытий к плазменному воздействию (Кунченко В.В.).

4) Результаты по уменьшению эффекта локально запертых частиц возбуждением в плазме ВЧ-колебаний с широким спектром стимулировали проведение теоретических исследований динамики запертых частиц в установке "Ураган-2М" (Шишкин А.А.).

5) Результаты по установлению важной роли дрейфовых колебаний в переносе частиц и энергии, и возможности эффективного воздействия на

связанные с ними турбулентные потери инициировали проведение соответствующих экспериментальных исследований на установке "Ураган-3" (Чечкин В.В.).

В целом, в ходе работ по теме диссертации и в их развитие была существенно расширена экспериментальная база исследований взаимодействия плазмы с поверхностью в ХФТИ, проведены усовершенствования и адаптация к условиям стеллараторных установок ХФТИ ряда методов диагностики периферийной плазмы и плазмоповерхностного взаимодействия.

1.5. Достоверность результатов и выводов работы обеспечена применением различных взаимодополняющих методов измерений, экспериментальной проверкой условий их применения, качественного, а иногда и количественного, согласия экспериментальных результатов и теоретических представлений, а также подтверждением многих из полученных в диссертации результатов данными других авторов в ходе выполнения исследований на других установках стеллараторного типа.

1.6. Апробация работы.

Представляемый доклад составлен на основе материалов, содержащихся в 33 публикациях в отечественных и иностранных журналах, сборниках трех Всесоюзных и девяти Международных конференций, трех рабочих групп, в четырех сборниках ВАНТ, в виде двух препринтов ХФТИ и одного изобретения.

2. ВВЕДЕНИЕ

В диссертационной работе представлены результаты экспериментальных исследований, направленных на выяснение особенностей удержания плазмы и её взаимодействия с поверхностью в замкнутых магнитных ловушках стеллараторного типа, выполненных в рамках стеллараторной программы ХФТИ в 1972-1990 г.

Известно, что установки стеллараторного типа, в отличие от токамаков, могут работать без лимитеров, ограничивающих поперечный размер плазмы. В таком режиме, когда крайняя замкнутая магнитная поверхность вписана в вакуумную камеру, роль лимитера в формировании плазменного шнура играет "магнитная диафрагма" [1]. Фактически же, при этом в качестве лимитера выступают те элементы конструкции вакуумной камеры, на поверхность которых выходят открытые силовые линии магнитного поля, близкие к объёму удержания плазмы. От конкретной конструкции установки в существенной мере зависит, где и насколько эффективно будет идти взаимодействие плазмы с поверхностью, вызывающее поступление продуктов эрозии в объём удержания. Следовательно, изучение взаимодейст-

вия плазмы с поверхностью должно быть не менее важной составной частью программы исследований на стеллараторах, чем подобные программы в исследованиях на токамаках.

Но по сравнению с токамаками взаимодействие плазмы с поверхностью и динамика примесей в магнитных ловушках стеллараторного типа имеют целый ряд особенностей, связанных со спецификой стеллараторной магнитной конфигурации. Проявление этих особенностей связано с наличием весьма существенных различий между токамаками и стеллараторами. Прежде всего, отметим отсутствие в стеллараторной конфигурации аксиальной симметрии, так что каждое сечение внутри периода магнитного поля отличается от любого другого. Во-вторых, длина открытых силовых линий вне объема удержания мала по сравнению с тороидальной длиной установки. В-третьих, большую роль в распределении плазменных потоков, попадающих на стенки при удержании плазмы термоядерных параметров, могут играть заряженные частицы, движение которых ограничено локальными магнитными пробками. Наконец, относительное положение объема удержания и областей наиболее сильного взаимодействия плазмы с поверхностью, влияющее на поступление примесей, зависит от конкретной конструкции установки и режима её работы, т.е. от того, вписана или нет внутрь камеры крайняя магнитная поверхность, имеется ли дивертор, какова конструкция диверторной камеры, и т.д.

Ко времени начала исследований по теме диссертации практически отсутствовали достоверные экспериментальные данные относительно проявления указанных особенностей плазмоповерхностного взаимодействия и поступления примесей в магнитных ловушках стеллараторного типа, и только начинала вырисовываться картина механизмов, характерных для процесса взаимодействия плазмы с поверхностью в токамаках (первый обзор на эту тему появился в сентябре 1979г.).

В то же время на ряде установок в модельных экспериментах (в том числе, на установках "Сатурн" и "Винт-20" в ХФТИ) были подтверждены основные положения теории удержания плазмы в стеллараторной конфигурации, важные с точки зрения взаимодействия плазмы с поверхностью. К ним относится, в частности, доказательство существования ансамбля частиц, движение которых ограничено локальными пробками, обусловленными наличием токов в винтовых обмотках. Выдрейфовывание этих частиц из объема удержания должно приводить к попаданию значительной доли их на стенки в местах, расположенных в стороне от выхода на поверхность той плазмы, которая попадает на стенку, двигаясь вдоль открытых силовых линий, ближайших к объему удержания. В конечном счете, распреде-

ление потоков плазмы на стенку зависит от относительного вклада в их формирование пролетных и запертых частиц. При этом для каждой конкретной установки определяющим является то, какова величина гофров магнитного поля, каковы режим удержания по частоте столкновений заряженных частиц и напряженность радиального электрического поля.

Кроме того, распределение потоков, а следовательно, и областей основного плазмоповерхностного взаимодействия, зависит, как показано в настоящей работе, от ряда деталей магнитной конфигурации. Так, в случае "классической" схемы стелларатора существенно соотношение поперечных размеров камеры и КЗМП (т.е. описана ли последняя вокруг тороидальной вакуумной камеры или же вписана в неё, и насколько). В случае торсатрона важное значение имеет наличие или отсутствие дивертора.

Наконец, на распределение потоков должно оказывать влияние и то, какую роль в общих потерях частиц и энергии плазмы играют турбулентные потери, являющиеся несимметричными вдоль направлений к внутреннему и внешнему обходам тора.

Экспериментальные исследования, результаты которых составили основу диссертации, имели своей целью выяснение следующих вопросов:

- определение областей локализации выхода плазменных потоков на стенки вакуумных камер установок типа "классического" стелларатора, измерение параметров пристеночной плазмы, выяснение основных механизмов эрозии поверхности под воздействием плазмы и изучение массопереноса примесей;

- определение областей наиболее сильного плазмоповерхностного взаимодействия в торсатроне с пространственным дивертором; измерение параметров периферийной и пристеночной плазмы; изучение ведущих механизмов и основных источников генерации примесей, и на этой основе разработка предложений относительно возможных путей снижения поступления примесей;

- выявление эффекта локально запертых частиц на плазменные потери в установках стеллараторного типа с существенно различными величинами винтовой неоднородности магнитного поля;

- изучение возможности внешнего влияния на распределение потоков плазмы, попадающих на стенки тороидальной камеры установок стеллараторного типа, путем воздействия на количество локально запертых частиц или уровень дрейфовых колебаний.

Экспериментальные исследования по теме диссертации проводились на ряде установок ХФИ: трехзаходном стеллараторе-торсатроне "Сатурн",

трехзаходных стеллараторах-рейстраках "Сириус" и "Ураган-2", однозаходном торсатроне "Винт-20", а также на трехзаходном торсатроне с дивертором "Ураган-3" (параметры установок и плазмы даны в Приложении).

Для измерения параметров плазмы в модельных экспериментах на установках "Сатурн" и "Винт" использовались электрические зонды, спектроскопические и СВЧ-методы. Определение параметров периферийной и пристеночной плазмы установок "У-2" и "У-3" осуществлялось с помощью диагностических средств, обычно применяемых для этих целей [1а]: электрических зондов различных типов, спектроскопии примесных атомов, СВЧ-интерферометрии, собирающих коллекторов. Анализ осадка на коллекторах выполнялся с использованием ядерно-физических и химических методов анализа поверхности. Полученные результаты излагаются и обсуждаются в частях 3-5 диссертации.

Часть 3 содержит результаты измерений распределений областей выхода плазменных потоков на стенки вакуумных камер установок "Сатурн" и "Ураган-2" (раздел 3.1), анализ характера эрозии стенок камер установок "Ураган-2" и "Сириус" (раздел 3.2) и массо-переноса продуктов эрозии (3.3), а также оценки параметров потоков плазмы на стенку установки У-2М (3.4). В части 4 излагаются и обсуждаются результаты подобных измерений в торсатроне "Ураган-3" при ВЧ-способе создания и нагрева плазмы: диверторных потоков (4.2), потоков примесей металлов с ВЧ-антенны и с поверхности корпусов винтовой обмотки и механизмов их генерации (4.3-4.4), сравнение абсолютных величин потоков атомов металлов в плазму с обоих этих основных источников загрязнения плазмы (4.5). Пятая часть посвящена обсуждению роли локально запертых частиц в плазменных потерях (5.1) и изучению вопроса о возможности изменения распределений потоков плазмы на стенку стелларатора путём воздействия на долю запертых частиц (5.2-5.3) или на уровень дрейфовых колебаний (5.4-5.5). В Заключение приведены выносимые на защиту основные выводы, следующие из результатов выполненных исследований.

Литература, относящаяся к теме диссертации, обозначается дополнительным индексом "а".

3. ПЛАЗМЕННЫЕ ПОТОКИ НА СТЕНКУ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ ("КЛАССИЧЕСКИЙ" СТЕЛЛАТОР)

3.1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОТОКОВ ПЛАЗМЫ НА СТЕНКУ ВАКУУМНОЙ КАМЕРЫ

Измерения выполнялись на установках "Сатурн" (плазма СВЧ-разряда) [2а] и "Ураган-2" (плазма омического разряда) [3а] с помощью спе-

циальных многоламелльных зондов. Зонды располагались в меридиональном сечении и измеряли распределения по малому азимуту потоков плазмы, падающих вдоль открытых силовых линий на стенку вакуумной камеры. Площади всех ламелей были одинаковы с точностью до $\leq 10\%$, а расстояние между центрами ламелей составляло 0,5 см и было меньше полуширины плазменного потока, что позволяло изучать поведение профиля каждой отдельной части потока при изменении магнитной конфигурации. Большая часть приводимых ниже результатов была получена на установке "Сатурн", конструкция которой позволяла легко изменять характеристики магнитной конфигурации в режимах стелларатора и торсатрона, или напротив, сохранять основные параметры крайних магнитных поверхностей (радиус, угол вращательного преобразования) примерно одинаковыми в обоих режимах. В стеллараторной конфигурации были получены данные о влиянии на распределение потоков плазмы величины винтовой гармоник магнитного поля и направления его продольной составляющей. При изменении амплитуды винтовой гармоник изменялись все основные характеристики магнитной конфигурации, в том числе, соотношение размеров КЗМП и малого радиуса вакуумной камеры. В сечении, где располагались зонды, магнитные поверхности были симметричны относительно центральной плоскости тора, т.е. одна из вершин сепаратрисы была обращена внутрь или наружу, в

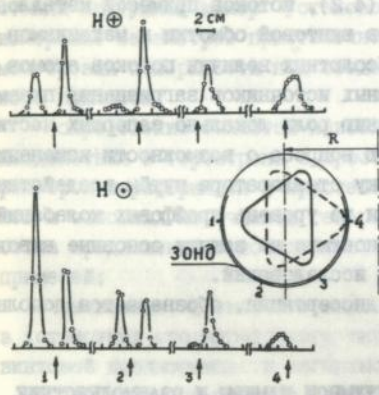


Рис.1. Распределение диверторных потоков вдоль малого азимута для двух направлений магнитного поля. Стрелками и цифрами отмечены положения указанных на вставке вершин КЗМП

зависимости от направлений продольного магнитного поля и токов в винтовых проводниках.

Все наиболее характерные особенности полученных распределений видны из рис.1, (плазма СВЧ-разряда, $n_e \leq 10^{11} \text{ см}^{-3}$; $T_e \leq 10 \text{ эВ}$; $T_i < 0,5 \text{ эВ}$), где приведены данные для режима, когда сепаратриса была вписана в камеру. На вставке этого рисунка качественно показаны положения КЗМП для противоположных направлений токов в системе винтовых проводников. Отметим, прежде всего, что плазма выходит на стенку только вблизи скругленных вершин треугольной КЗМП, а на остальных участках, в пределах чувствительности зондов, т.е. с точностью до $\sim 1\%$ от измеренных средних

значений вблизи вершин сепаратрисы, потоков плазмы обнаружить не удалось. Полная азимутальная протяженность всех плазменных потоков, найденная путем сложения их полуширин, составила $\sim 1/6$ длины малой окружности камеры (в предположении симметрии верх-низ распределений потоков, исходя из симметрии магнитных поверхностей). Вторая особенность — отсутствие симметрии внутрь-наружу, проявляющаяся по-разному в зависимости от характеристик магнитной конфигурации. Свидетельством этому являются данные рис.2, где для различных величин винтовой гармоники

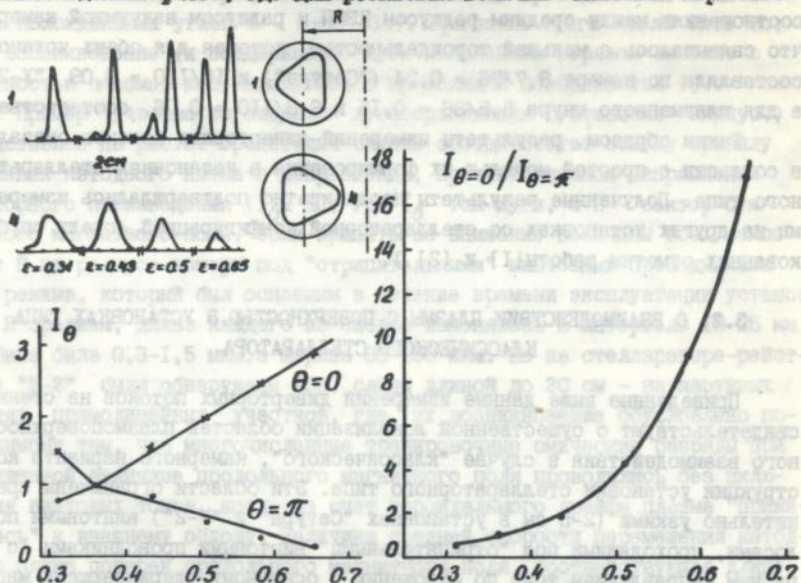


Рис.2. Зависимость от величины винтовой гармоники потоков плазмы в направлении наружного ($\theta=0$) и внутреннего ($\theta=\pi$) обходов тора (соответственно, вершины 1 и 4 на рис.1) — а, б, и их отношения — в

магнитного поля, ϵ_n , (стеллараторный режим) приведены величины суммарных потоков на все ламели, находящиеся вблизи тех вершин КЗМП, которые расположены на наружном ($\theta=0$) и внутреннем ($\theta=\pi$) обходах тора (соответственно, вершины 1 и 4 на рис.1). Отношения этих потоков наружу и внутрь в зависимости от величины ϵ_n показано на рис. 2в. Видно, что для стеллараторного режима с "описанной" сепаратрисой ($\epsilon_n < 0,43$), когда размеры КЗМП ограничивались стенками камеры, величины потоков внутрь и наружу различались менее чем в 2 раза, тогда как при сильно "вписанной" КЗМП отношение потоков приближалось к 20. Наибольшее раз-

личие между потоками наружу и внутрь (≤ 50) было зарегистрировано на этой установке в случае чисто торсатронной конфигурации, тоже в режиме с сильно вписанной в камеру КЗМП [2а].

Подобные данные о распределении потоков плазмы на стенку были получены и на стеллараторе "Ураган-2", где плазма омического разряда имела более высокие параметры: $n_e(0) > 10^{13} \text{ см}^{-3}$, $T_e > 100 \text{ эВ}$, $T_i \approx 100 \text{ эВ}$. Существенным отличием здесь от распределений на стеллараторе "Сатурн" было значительно меньшее различие потоков внутрь и наружу при сравнимых соотношениях между средним радиусом КЗМП и радиусом вакуумной камеры, что связывалось с меньшей тороидальностью, которая для обеих установок составляла по камере $8,7/36 = 0,24$ ("Сатурн") и $10/110 = 0,09$ ("У-2"), а для плазменного шнура $5,5/36 = 0,15$ и $6,3/110 = 0,06$, соответственно.

Таким образом, результаты измерений диверторных потоков оказались в согласии с простой моделью их формирования в установках стеллараторного типа. Полученные результаты неоднократно подтверждались измерениями на других установках со стеллараторной конфигурацией (среди опубликованных отметим работы [1] и [2]).

3.2. О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСТАНОВКАХ ТИПА КЛАССИЧЕСКОГО СТЕЛЛАТОРА

Приведенные выше данные измерений диверторных потоков на стенку свидетельствуют о существенной локализации областей плазмоповерхностного взаимодействия в случае "классического", камерного варианта конструкции установки стеллараторного типа. Эти области ограничены сравнительно узкими (2-5 см в установках "Сатурн" и "У-2") винтовыми пелосами, проходящими под "отрицательными" винтовыми проводниками (с обратным направлением тока по отношению к основному удерживающему магнитному полю). И поскольку вдоль длины каждой такой винтовой линии имеет место сильная модуляция величин потоков плазмы (рис. 1 и 2) то это должно проявляться в сильной неоднородности эффективности плазменного воздействия на стенку (сильнее снаружи и слабее внутри), что на самом деле и оказалось, как показал анализ состояния внутренних поверхностей стенок вакуумных камер стеллараторов "У-2" и "Сатурн" (материал - нержавеющая сталь), выполненный после нескольких лет их эксплуатации.

Участки наиболее сильной эрозии поверхности совпали с областями выхода на стенку плазменных потоков. Полная площадь поверхности камер "Сириус" со следами сильной эрозии составила около 10 % [3а, 4а] (камера была разрезана после демонтажа установки), в качественном согласии с данными измерений диверторных потоков на установках "Сатурн" и "У-2".

Основной механизм эрозии связан с процессом дугообразования в местах непосредственного контакта плазмы с металлической поверхностью. Причем, неоднородность в распределении следов дугообразования на камере стелларатора "Сириус" была существенно более сильной, чем неоднородность в распределении диверторных потоков вдоль винтовых полос, измеренных ранее на стеллараторах "Сатурн" и "Ураган-2" [2а, 4а]. По-существу, следы интенсивного дугообразования покрывали только наружные участки винтовых полос под "отрицательными" винтовыми проводниками, в диапазоне полоидальных углов $\theta = 0 \pm 55^\circ$ [3а]. Причиной этого могло быть то, что возникновение (и поддержание) дуги нелинейным образом связано с плотностью плазмы, контактирующей с проводящей поверхностью [3].

Пример участка со следами дугообразования (установка "Сириус") представлен на рис.3. Ориентация следов соответствует общему правилу движения катодного пятна в направлении, противоположном направлению векторного произведения $(\vec{i}_0 \times \vec{H})$, где \vec{i}_0 - ток дуги, а \vec{H} - вектор суммарного магнитного поля, если принять во внимание величины всех компонент \vec{H} на радиусе камеры под "отрицательными" винтовыми проводниками для режима, который был основным в течение времени эксплуатации установки. В среднем, длина каждого из следов изменялась в интервале 10-25 мм, глубина была 0,3-1,5 мкм, а ширина 80-150 мкм. Но на стеллараторе-рейстрекре "У-2" были обнаружены [5а] следы длиной до 20 см - на наружных частях прямолинейных участков, где их возникновение обусловлено по-видимому тем, что многочисленные тренировочные омические разряды при пониженной величине продольного магнитного поля проводились без включения винтовых токов, когда за счет тороидального дрейфа плазма "прижималась" к внешнему обходу. Величина средней скорости перемещения катодного пятна поперек продольного магнитного поля, соответствующая длине следа и длительности разрядного импульса ($v_{\perp} \sim 10^4$ см/с), находится в диапазоне результатов измерений многих авторов (например, [4]).

Необходимо отметить и наличие следов с многократным дугообразованием, на стенках как стелларатора "У-2", так и стелларатора "Сириус" (один из таких участков показан на рис.3). Многократное прохождение катодного пятна дуги по одному и тому же месту приводило к образованию канавок глубиной до 150 мкм и шириной $\leq 1,5$ мм. Приблизительный подсчет полного числа следов дуг на стенках камеры установки "Сириус" показал, что за каждый разрядный импульс ($\Delta t = 1$ мс, $\bar{n}_e(0) \sim 10^{13}$ см $^{-3}$, $T_e(0) \sim 100$ эВ) образовывалось около 5 следов дуг. При указанных средних размерах каждого следа полный выброс металлических атомов с поверхности за один импульс составлял $\sim 5 \cdot 10^{17}$. Большая часть этого количества, как известно

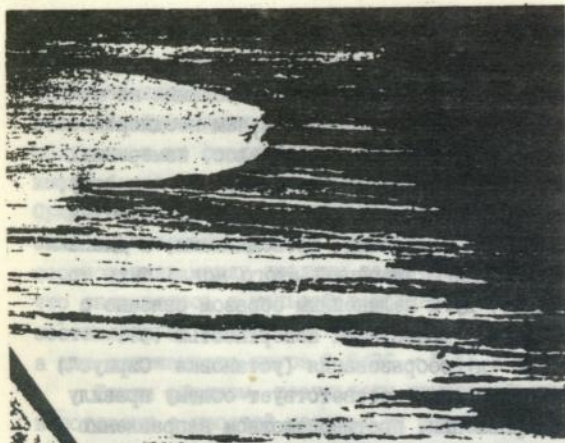


Рис.3. Примеры следов дугообразования на стенке тороидального участка стелларатора "Сириус"

удержания имеют металлические атомы, распыленные ионами плазмы, или образующиеся в результате перезарядки (или нейтрализации) ионов, ускоренных в прикатодном пространстве дуги. Причинами этого являются, во-первых, большая скорость атомов ($\bar{v} \geq 2 \cdot 10^5$ см/с) и, во-вторых, малая толщина λ_n защитного диверторного слоя плазмы. Последнее обусловлено тем, что в стеллараторе с вписанной сепаратрисой, в отличие от токамака, длина всех "открытых" силовых линий, где формируются диверторные потоки, много меньше длины тороидальной камеры. Приблизительно толщина слоя выражается известным соотношением $\lambda_n \propto (D_1 \cdot C_1 / 2v_s)^{1/2}$, где $D_1 \propto (I/16)(\sigma T_e / eV)$ — коэффициент поперечной диффузии, C_1 — длина открытой силовой линии, $v_s = [(T_e + T_i)/M_1]^{1/2}$, и для типичных параметров периферийной плазмы в установке "Ураган-2" ($T_e \approx T_i \approx 20$ эВ, $C_1 \approx 2$ м, $B = 20$ кГс) величина $\lambda_n \approx 0,5$ см. Это значение в несколько раз (≈ 5) ниже, чем длина ионизации распыленных атомов металлов при плотности в защитном слое $n_{e0} < 10^{12}$ см $^{-3}$. Если же рабочим режимом выбран режим с "описанной" сепаратрисой, когда КЗМП ограничивается непосредственным контактом плазмы с поверхностью вблизи винтовых ребер магнитных поверхностей, то диверторный слой в местах контакта вообще отсутствует. В результате, значительная доля примесных атомов, покидающих в этом месте поверхность камеры, сразу же окажется внутри КЗМП, где их динамика будет зависеть от параметров удерживаемой плазмы.

Что касается экспериментального обнаружения самого процесса

[5], выбрасывается в виде микрокапель вдоль поверхности, и только сравнительно небольшая доля ($\approx 10\%$) имеет возможность попадать в диверторный поток (почти перпендикулярно его толщине). На самом деле, из-за сложного движения плазменной струи, выбрасываемой из катодного пятна на стенке магнитной ловушки [6], в объем удержания попадет еще меньшая часть выбрасываемого материала.

Существенно большую

вероятность попасть в объем

распыления, то следы его проявления (т. е. следы ионного травления) наблюдались на стенках камер обеих установок, но особенно в стеллараторе "У-2", где их положение чередовалось с областями, заполненными следами дугообразования.

Специальные измерения в пристеночной плазме стелларатора "У-2" показали, что электронная температура находится на уровне $T_e \approx 20$ эВ, [6а], так что пристеночная разность потенциалов ($\sim 3T_e$) была достаточной для возникновения и поддержания дугообразования.

3.3. МАССОПЕРЕНОС ПРИМЕСЕЙ (3а, 5а, 6а)

Для изучения массопереноса металлических примесей в установке "У-2" применялся большой набор собирающих коллекторов, изготовленных из графита и стекла, а в стеллараторе "Сириус" о динамике примесей можно было судить по величине осадка на керамической вставке, стоявшей на прямолинейном участке рейстректовой вакуумной камеры. Кроме того, анализу был подвергнут осадок, появившийся на стенках камеры стелларатора "У-2" в течение той же экспериментальной кампании, когда экспонировались графитовые коллекторы. Из-за слабой адгезии с поверхностью пленка осадка отслаивалась в ходе чистки камеры после её вскрытия для проведения профилактических работ.

Анализ осадка на коллекторах проводился методами обратного рассеяния, характеристического рентгеновского излучения и вторичной ионной масс-спектрометрии. Транспортировка образцов от установки к месту анализа осуществлялась в воздушной атмосфере, однако это не влияло на результаты измерения качества и количества металлических атомов в осадке. Определение состава металлической части осадка с керамической вставки стелларатора "Сириус" и собранного на различных участках камеры "У-2" выполнялось с применением атомно-абсорбционного метода.

Установлено, что распределение атомов металла в осадке, появившемся на собирающих коллекторах за одну экспериментальную кампанию является сильно неоднородным, изменяясь от $\leq 1 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$ до $\leq 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$. Минимальное количество металла в осадке наблюдалось на прямолинейных участках и на тороидальных участках в промежутках между "отрицательными" винтовыми проводниками. Наибольшая же плотность осадка была зарегистрирована вблизи мест выхода на стенку диверторных потоков, т. е. вблизи мест с наибольшей эрозией. Здесь на некоторых образцах толщина металлической части осадка превышала 1 мкм за время экспозиции, в течение которого было произведено ~ 3200 рабочих и ~ 8500

маломощных тренировочных импульсов. Последние выполнялись при включении только продольного магнитного поля. Поэтому тот факт, что распределение осадка по камере в значительной степени отражало особенности стеллараторной магнитной конфигурации, может служить доказательством преобладающей роли именно рабочих импульсов в переносе массы металла на поверхности собирающих коллекторов.

На установке "Сириус" количество осадка оказалось на уровне $3 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-2}$, т.е. близким к минимальным величинам, зарегистрированным на прямолинейном участке и под "положительными" винтовыми проводниками стелларатора "У-2".

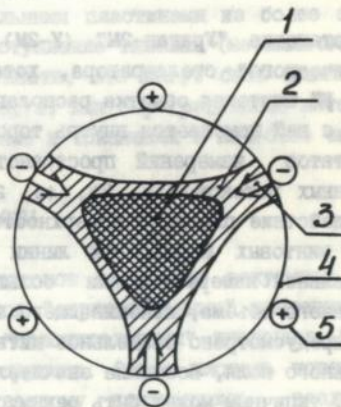
С учетом количества рабочих импульсов и их длительности (10 мс для "У-2" и ~1 мс для стелларатора "Сириус") можно получить среднюю скорость осаждения. Если для "У-2" принять среднее значение плотности металлического осадка равным $\sim 10^{17} \text{ см}^{-2}$, то скорости осаждения оказываются на уровне $3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$ и $3 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, соответственно, для установок "Сириус" и "У-2".

Эти величины существенно больше, чем максимально наблюдаемые скорости осаждения металлических примесей в токамаках. Об этом можно судить на основании того, что приведенные выше цифры плотности металлического осадка ($\approx 3 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) находятся на том же уровне, что и количество металлов в осадке на тех участках площади графитового лимитера, где скорость осаждения превышала скорость эрозии [7], несмотря на существенно меньшую (на ~2 порядка) длительность экспозиции (из-за сравнительно малой длительности разряда в "У-2").

Главной причиной такой высокой скорости осаждения (а значит, и скорости эрозии где-то в другом месте) в стеллараторе является сильное взаимодействие плазмы с поверхностью. Если в токамаке основное воздействие плазмы на поверхность реализуется на лимитере, как правило, изготавливаемом из графита, то в "классическом" стеллараторе вся плазма попадает непосредственно на участки металлической стенки, находящиеся под "отрицательными" винтовыми проводниками. Взаимное расположение объема удержания и областей выхода диверторных потоков на стенку, рис. 4, оказывается таким, что большая часть продуктов эрозии может попадать непосредственно в объем удержания, загрязняя плазму, и пересаживаться на стенки после окончания разряда.

Благодаря существенной разнице в химическом составе различных элементов конструкции стелларатора "У-2", из анализа осадка удалось определить, какие участки поверхности дадут наибольший вклад в поступление металла в плазму с последующим осаждением его на стенках камеры и на

Рис.4. Схематическое изображение особенностей плазменно-поверхностного взаимодействия в "классическом" стеллараторе. 1 - объем удержания плазмы, 2 - область диверторных потоков, 3 - основное направление движения продуктов эрозии (распыленные атомы и атомы перезарядки из катодного пятна), 4 - камера, 5 - винтовые проводники



собирающих коллекторах. Соответствующие данные приведены в Таблице. Как видно, химический состав осадка существенно отличается от состава всех проанализированных элементов конструкции, подвергавшихся плазменному воздействию. Особенно велико различие в содержании железа и никеля. Из сопоставления приведенных в Таблице данных следует, что вклад тороидальных участков и цилиндриителя составляет ~80 %, а вклад материала остальных элементов, находящихся на прямолинейных участках, в том числе ВЧ-антенн, диафрагм, сильфонов, - около 20 % [6а].

№	Объекты анализа	Fe, %	Ni, %	Cr, %
1	Материал тороидальных участков	2	70	20
2	Материал цилиндриителя	1,5	75	19
3	Материал ВЧ-антенны	72	9,9	17,5
4	Материал диафрагмы	72	9,2	17,4
5	Вещество осадка на стенках вакуумной камеры	10	71	17

Факт преобладающего вклада в осадок тех участков поверхности вакуумной камеры, которые подвергаются большему воздействию плазмы, подтверждается и результатами измерений распределений по глубине осадка методом ВИМС. Оказалось, что распределения по глубине атомов хрома и никеля являются качественно подобными, а распределения атомов железа от них отличается существенно.

3.4. О ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСТАНОВКЕ УРАГАН-2М

Установка "Ураган-2М" (У-2М) имеет конструкцию, типичную для "классического" стелларатора, хотя и является двухзаходным торсатроном. Ее винтовая обмотка располагается снаружи тороидальной камеры и вместе с ней помещается внутрь тороидального соленоида. На основании результатов измерений пространственной локализации и параметров плазменных потоков [1а, 2а, 4а, 2] можно утверждать, что основное взаимодействие плазмы с поверхностью здесь будет осуществляться вдоль двух винтовых линий. Эти линии "рисуются" на внутренней стенке тороидальной камеры концами большого диаметра поперечного сечения плазменного объема, напоминающего эллипс. Благодаря тому, что в установке предусмотрено раздельное питание винтовой обмотки и обмотки тороидального поля, возможна значительная вариация режимов работы. Например, типичным может быть режим, когда крайняя магнитная поверхность лежит вне вакуумной камеры, стенки которой таким образом должны играть роль, аналогичную роли лимитеров в токамаке. На установке "Сатурн" подобный режим реализовывался при малых токах в винтовой обмотке [2а]. Другой режим - когда крайняя магнитная поверхность вписана внутрь вакуумной камеры и играет роль магнитной диафрагмы, вне которой формируются диверторные потоки плазмы, уходящие вдоль открытых силовых линий. Во всех случаях суммарная площадь поверхности, находящейся в непосредственном контакте с плазмой, будет определяться длиной винтовых "следов" на стенке, шириной слоя пристеночной плазмы и углом, под которым силовые линии магнитного поля пересекают поверхность.

Для оценок эффективной площади взаимодействия плазмы с поверхностью камеры У-2М можно пользоваться данными, полученными ранее на установках стеллараторного типа [2а, 4а], в том числе в условиях, когда изменялось соотношение между винтовой и продольной компонентами магнитного поля [2а]. Эти оценки дают значение средней ширины плазменного следа 4-5 см, так что непосредственное воздействие плазмы с поверхностью будет осуществляться на площади, составляющей малую часть ($\sim 1/20$) полной площади внутренней поверхности тороидальной вакуумной камеры ($R_0 = 1,7$ м, $r_{\text{кам}} = 34$ см). Соответственно, воздействие плазмы на стенку должно приводить к сильной ее эрозии (материал стенки нержавеющей сталь) как из-за бомбардировки ионами (водорода и примесей), так и в результате дугообразования. В отсутствие дивертора значительная часть продуктов эрозии будет попадать в объем удержания.

В связи с этим необходимо будет закрывать области непосредственного взаимодействия плазмы с поверхностью в камере У-2М, располагающиеся вдоль винтовых полюс, специальными пластинами из более стойких материалов, позволяющими снизить поступление тяжелых (металлических) примесей в объем удержания. В частности, это могут быть пластины из нержавеющей стали с TiN покрытием [8,7a] или бор-графитовые материалы, находящие все более широкое применение в токамаках в качестве энергонапряженных элементов конструкции.

3.5. ВЫВОДЫ

1. Места выхода диверторных потоков на стенку вакуумной камеры локализованы вблизи вершин КЗМП, под "отрицательными" винтовыми проводниками в стеллараторе и между "положительными" винтовыми проводниками в торсатроне такой же конструкции. Общая площадь поверхности стенки, подвергающейся непосредственному плазменному воздействию составляет ~15 % от полной площади внутренней поверхности вакуумной камеры. Наблюдаемая неоднородность распределения потоков зависит в основном от характеристик магнитной конфигурации и особенно проявляется в различии (вплоть до 20-кратного в некоторых режимах стелларатора) величин потоков в направлении внутреннего и внешнего обходов тороидальной камеры.

2. В разрядах с использованием омического тока непосредственное воздействие на поверхность плазмы диверторных потоков вызывает эрозию поверхности вакуумной камеры, в первую очередь, за счет дугообразования. В рейстректовом варианте стелларатора наиболее сильной является эрозия тороидальных частей установки. Благодаря близости КЗМП к поверхности камеры, вероятность попадания продуктов эрозии в объем удержания очень велика.

3. Поступление в плазму продуктов эрозии и их пересаднение проявляется в быстром росте осадка на собирающих коллекторах и на самой стенке вакуумной камеры в местах, локализованных вблизи "ребер" КЗМП. Основной вклад в осадок (в случае стелларатора рейстректовой формы) дают тороидальные участки камеры (~80 %).

4. Оценки показывают, что для нормальной работы установки У-2М следует закрывать участки стенки в местах выхода потоков плазмы материалами, являющимися существенно более стойкими к плазменному воздействию, чем материал камеры (нержавеющая сталь).

5. Кардинальным решением задачи снижения загрязнения плазмы, удерживаемой в конфигурации стеллараторного типа, является переход к

конструкции "чистого" торсатрона, когда участки поверхности под "отрицательными" проводниками, подвергаемые воздействию плазменных потоков, заменяются щелями, через которые эти потоки выводятся на поверхности, расположенные вне прямой видимости удерживаемой плазмы.

4. ДИВЕРТОРНЫЕ ПОТОКИ И ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСТАНОВКЕ "УРАГАН-3"

4.1. ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Приведенные в предыдущей части результаты свидетельствуют о том, что в установках с конструкцией типа "классического" стелларатора полностью решить проблему снижения поступления примесей в объем удержания нельзя. Возможно, конечно, применение покрытий из материалов с низкими Z в местах выхода диверторных потоков, позволяющее уменьшить поступление примесей металла (как предполагается для У-2М). Но наиболее кардинальный путь — полное исключение из конструкции установки "отрицательных" винтовых проводников и, соответственно, располагающихся под ними участков стенки вакуумной камеры, то-есть, переход к чисто торсатронной конфигурации. В этом случае область выхода диверторных потоков может быть удалена от объема удержания и так трансформирована по своей форме, чтобы, в основном, продукты эрозии не попадали в удерживаемую плазму. Одно из конструктивных решений такого рода было дано в описании авторского свидетельства "Дивертор торсатрона" [8а]. Фактическим же воплощением идеи переноса области непосредственного взаимодействия плазмы с поверхностью как можно дальше от плазменного объема явилось создание установки "Ураган-3", где магнитная система трехзаходного торсатрона помещена в большой вакуумный бак.

На рис.5 качественно показаны два меридиональных сечения магнитной системы установки, максимально различающиеся между собой взаимным расположением объема удержания и винтовых проводников, и характеризующиеся симметричным расположением относительно центральной плоскости тора. Как видно, имеются только небольшие участки вдоль длины тора вблизи сечения рис.5б, где дивертируемые силовые линии обходят винтовые проводники, находящиеся на наружном обходе тора. Остальные же участки винтовых проводников пересекаются "открытыми" силовыми линиями таким образом, что для продуктов эрозии, вызываемой выходящей вдоль этих силовых линий плазмой, имеется очень малая вероятность попасть в объем удержания. И в этом отношении установка "У-3" существенно отличается от всех других установок стеллараторного

типа, за исключением сооружаемой в Японии установки LHD, которая будет иметь распределенный винтовой дивертор и винтовую диверторную камеру.

Задачей исследований, описанных ниже, было изучение особенностей взаимодействия плазмы с поверхностью в установке "У-3", а именно: из-

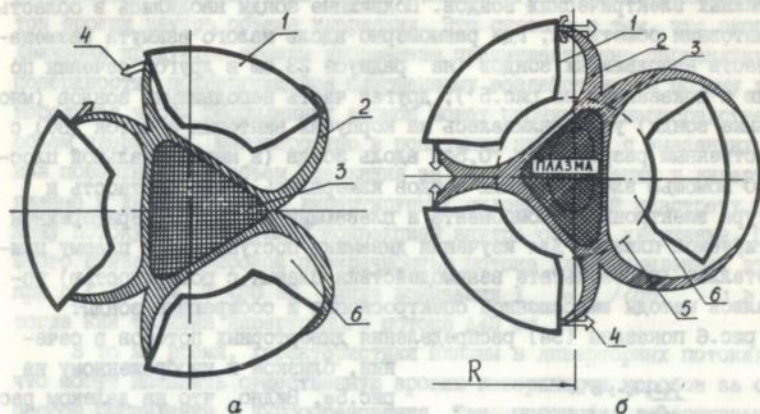


Рис.5. Схематическое изображение особенностей плазмо-поверхностного взаимодействия в тороиде с винтовым дивертором "У-3". 1 - сечения коробов В0, 2 - область диверторных потоков, 3 - область удержания плазмы, 4 - основное направление движения продуктов эрозии, 5 - положение стенки вакуумной камеры в случае камерного варианта (конфигурация "классического" стелларатора), 6 - область фоновой плазмы

мерение распределений диверторных потоков и параметров дивертируемой плазмы, определение источников и механизмов поступления металлических примесей в объем удержания при используемых ВЧ-способах создания и нагрева плазмы, и на этой основе выработка предложений по снижению потока атомов металлов. (Первые достаточно подробные результаты экспериментальных исследований диверторных плазменных потоков на токамаках опубликованы в сборнике: IAEA Technical Committee Meeting on Divertors and Impurity Control, Garching, FRG, 1981, Editors M.Keilhaker and U.Daybelge.)

4.2 ИЗМЕРЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ДИВЕРТОРНЫХ ПОТОКОВ

Все приведенные в части 4 результаты были получены на установке "У-3" при использовании создания и поддержания плазмы в условиях ионного циклотронного резонанса с помощью одной или двух ВЧ-антен, каждая из которых излучала до 250 кВт ВЧ-мощности. При постоянной излучаемой антеннами ВЧ-мощности на фиксированной частоте изменение режима разря-

да, определявшего параметры плазмы в объеме удержания и вне его, достигалось изменением давления рабочего газа в пределах 10^{-5} – 10^{-4} Тор, или изменением величины магнитного поля вблизи его резонансного значения.

Распределение диверторных потоков измерялось с помощью подвижных и неподвижных электрических зондов. Подвижные зонды вводились в область между винтовыми обмотками, где равномерно вдоль малого азимута размещалась и часть неподвижных зондов (на радиусе 23 см в другом сечении по отношению к показанным на рис.5); другая часть неподвижных зондов (многоламельные зонды) устанавливалась на корпусах винтовых обмоток (ВО) с пространственным разрешением $\sim 0,5$ см вдоль зонда (в меридиональной плоскости). С помощью электрических зондов измерялись также плотность и температура электронного компонента и плавающий потенциал периферийной и дивертируемой плазмы. Для изучения динамики поступления в плазму примесей металлов (в результате взаимодействия плазмы с поверхностью) использовались методы эмиссионной спектроскопии и собирающие зонды.

На рис.6 показаны [9а] распределения диверторных потоков в сече-

нии, близком к изображенному на рис.5а. Видно, что на далеком расстоянии от объема удержания ширина диверторного потока составляет $\sim 1,5$ см, а его плотность не превышает $\sim 1,5 \cdot 10^{11}$ см^{-3} . В соответствии с расчетами траекторий силовых линий [9] диверторные потоки в данном сечении не обходят вокруг винтовых обмоток, а попадают на поверхности корпусов из нержавеющей стали, в которые уложены винтовые проводники. Аналогичные распределения были получены с помощью многоламельных зондов, которые устанавливались в различных сечениях (не только в тех, что показаны на рис.5).

Данные зондовых измерений свидетельствует о том, что на большей части длины винтовых обмоток (>60 %) диверторные потоки

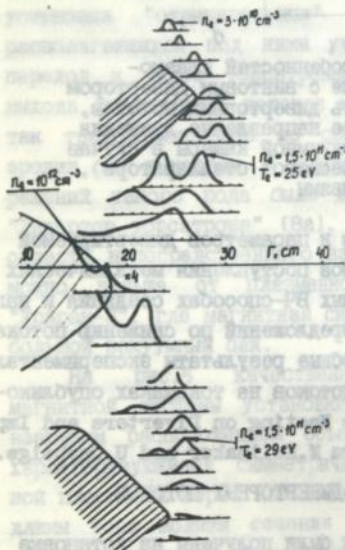


Рис.6. Распределение плотности плазмы в диверторных потоках (сечение, близкое к показанному на рис.5а)

не обходят вокруг них, а выходят на поверхности корпусов.

Из рис.5 видно, что само расположение поверхностей, подвергаемых воздействию дивертируемой плазмы, сильно ограничивает попадание продуктов эрозии внутрь объема удержания. Это связано с тем, что скорость движения продуктов эрозии направлена преимущественно перпендикулярно поверхности, подвергающейся плазменному воздействию, и потому только небольшая часть распыленных атомов может проникать непосредственно в объем удержания. Маловероятно и попадание примесей с указанных участков поверхности в объем удержания за счет их ионизации в диверторной плазме и движения вдоль дивертируемых силовых линий навстречу плазменному потоку с последующей конвекцией внутрь объема удержания. Причина этого связана с высокой прозрачностью потока для распыленных атомов: при $n_e \leq 10^{11}$ см⁻³, $T_e \leq 30$ эВ длина ионизации $l_{ion} = v_o / \langle \sigma v_{ion} \rangle \cdot n_e \geq 20$ см, тогда как толщина диверторного потока $\Delta \leq 3$ см.

В то же время, характеристики плазмы в диверторных потоках таковы, что могут вызывать существенную эрозию поверхности коробов за счет процессов распыления и дугообразования. Так, потенциал дивертируемой плазмы на активной фазе разряда достигает ≤ 200 В [10а], при котором коэффициент распыления поверхности нержавеющей стали двух- и трех-зарядными легкими ионами приближается к единице [10]. То-есть, в случае традиционной конструкции установки типа "классического" стелларатора, (с тороидальной камерой, рис.4), поток в плазму металлических примесей мог бы быть неприемлемо большим.

Из сказанного следует, что основные причины поступления примесей с поверхностей корпусов винтовой обмотки в плазму могут быть связаны с потоками нейтралов перезарядки и с воздействием достаточно редкой фоновой плазмы, выбрасываемой на поверхность поперек силовых линий за счет дрейфа в скрещенных постоянном магнитном и переменном электрическом полях [IIa]. А как известно [II], в термоядерных установках с магнитным удержанием в традиционном варианте (с тороидальной вакуумной камерой) обе эти причины являются более слабыми в отношении генерации примесей, чем непосредственное воздействие на поверхность плазмы, уходящей вдоль открытых силовых линий.

Таким образом, существующая конструкция установки в принципе должна обеспечивать значительное снижение потока металлических примесей в плазму с поверхности элементов, играющих здесь роль вакуумной камеры классического стелларатора, т.е. коробов винтовой обмотки, на которые попадает практически вся плазма и большая доля электромагнитного и корпускулярного излучения.

Единственными участками поверхности, обращенными к объему удержания и подвергающимися воздействию дивертируемой плазмы, на установке "У-3" являются некоторые части рамочных ВЧ-антенн. Антенны располагаются на наружном обходе тора вблизи КЭМП так, чтобы основная площадь поверхности винтовых антенных рамок была бы ориентирована вдоль силовых линий магнитного поля, и только поверхности поперечных перемычек пересекаются диверторными силовыми линиями. Центры каждой антенны находятся в сечении подобном изображенному на рис.5а, где распределения диверторных потоков имеют вид, близкий к показанному на рис.6. До недавнего времени перемычки имели такую же ширину, как и винтовые части антенны, и общая площадь участков антенны, подвергавшихся воздействию плазменных диверторных потоков, составляла ~0,2 % от площади, обращенной к объему удержания поверхности корпусов винтовой обмотки. Полная же обращенная к плазме поверхность антенны составляет около 3 % площади коробов, что близко к значениям, являющимися типичными для тех токамаков, где используются ВЧ-методы дополнительного нагрева плазмы.

В токамаках для уменьшения эрозии электростатического металлического экрана работающей антенны уже давно применяются специальные защитные лимитеры. Применяемые в экспериментах на "У-3" рамочные антенны, изготавливаемые из нержавеющей стали, экрана не имеют и первоначально не имели никакого покрытия.

4.3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ И МЕХАНИЗМОВ ПОСТУПЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ (ВЧ-АНТЕННЫ)

По причинам, изложенным в предыдущем разделе, ясно, почему на первых этапах работ на "У-3" основное внимание при проведении исследований проблемы примесей было уделено ВЧ-антеннам [12а]. Для изучения потоков металлических атомов с поверхности антенны применялась спектроскопическая методика, позволившая определить величину потока примесей в плазму по результатам измерений интенсивности линий излучения и уширения, связанного с эффектом Доплера. Благодаря наличию связи средних скоростей выбрасываемых с поверхности атомов и механизмами их выброса [12а], были определены ведущие механизмы эрозии, реализующиеся в результате воздействия плазмы на антенну.

Для измерения формы спектральных линий металлов, входящих в состав поверхности антенны из нержавеющей стали (CrI, FeI, а затем TiI), применялась стандартная методика [12]: выделение той или иной линии осуществлялось с помощью монохроматора МДР-23, и для анализа её

формы применялся интерферометр Фабри-Перо, помещенный в барокамеру. Необходимые для нахождения абсолютных значений концентраций примесей величины n_e и T_e были получены с применением электрических зондов, а результаты зондовых измерений T_e , кроме того, были подтверждены измерением отношения интенсивностей линий CrI 359,3 нм и CrI 520,4 нм [13].

На расстоянии ~ 3 см от антенны, в maximume распределения интенсивности свечения линий атомов Cr и Fe, их концентрации в плазме оказались равными: $n_{Cr} = (1 \pm 0,5) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $n_{Fe} = (8 \pm 4) \cdot 10^{10} \text{ см}^{-3}$, так что полное количество металлических атомов $n_{Me} \approx 1 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, т.е. около 1% от величины \bar{n}_e .

При определении средних значений скоростей атомов металлов переход от распределений по скоростям вдоль линий наблюдения (примерно вдоль поверхности антенны) к скоростям в направлении к центру плазмы (примерно перпендикулярно поверхности антенны) проводился в предположении, что угловые зависимости распределений атомов по скоростям имеют вид $\cos \theta$ или $\cos^2 \theta$, где θ отсчитывается от нормали к поверхности средней части антенны. Соответственно, оценки дали значения $v_1 \approx 2,5 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ и $\sim 3 \cdot 10^6 \text{ см/с}$ в maximume функции распределения по скоростям для обоих указанных угловых распределений. Эти величины примерно на порядок выше тех, которые типичны для атомов, покидающих поверхность в результате распыления.

На основе анализа большого количества данных, полученных при исследовании энергетических спектров ионов и атомов, генерируемых в катодном пятне, в работе [12а] был сделан вывод о том, что причиной таких высоких значений скоростей атомов, измеренных вблизи антенны, может быть только генерация их в результате возникновения дуг на поверхности. Таким образом, измеренные распределения по скоростям атомов металлов, покидающих антенну, указывают на то, что дугообразование является ведущим механизмом эрозии ВЧ-антенны, изготовленной из нержавеющей стали, - в результате воздействия на нее периферийной плазмы и плазмы диверторного потока. Косвенным подтверждением этого вывода является обнаружение большого количества следов возникновения катодных пятен на обращенной к плазме поверхности антенны. Усиление дугообразования в процессе ВЧ-нагрева плазмы может быть обусловлено формированием в плазме вблизи антенны положительного флуктуирующего (и квазипостоянного) потенциала, величина которого существенно превышает ленгмювскую разность потенциалов: по оценкам в работе [11а] потенциал достигал ~ 1 кВ.

Полная плотность потока атомов металлов (Cr+Fe+N1) с антенны, $\sim 2,5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2} \cdot \text{с}^{-1}$, была получена с учетом его ослабления в перифе-

рийной плазме на пути от поверхности до области наблюдения (~3 см) в предположении, что плотность потока однородна по всей поверхности тех участков антенны, где наблюдались следы дугообразования.

После установления роли работающей антенны как существенного источника поступления примесей металлов, авторы статьи [8] предложили использовать такое покрытие (TiN), скорость эрозии которого при плазменном воздействии является более низкой, чем у нержавеющей стали. Специальные исследования показали [7а]: коэффициент распыления покрытия ионами He^+ и Ar^+ в ~3 раза ниже, чем у нержавеющей стали; эрозия TiN покрытия в результате дугообразования примерно на порядок величины ниже, чем для поверхности без покрытия; склонность к блистерообразованию не оценивалась количественно, но при бомбардировке до одинаковой дозы (ионы Ar^+ , 80 кэВ, доза $2 \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$) на TiN покрытие наблюдалась только начальная стадия роста блистеров, тогда как на нержавеющей стали уже наступала фаза флехинга.

В результате более сильного снижения величины эрозии, обусловленной дугообразованием, по сравнению с эрозией, вызываемой распылением, существенно изменился энергетический спектр атомов металлов, поступающих в плазму с поверхности антенны. При использовании антенны, имеющей TiN покрытие, скорость атомов Ti в максимуме распределения по скоростям оказалось равной $\sim 5 \cdot 10^5$ см/с, т.е. близкой к обычно измеряемой во время процесса распыления содержащих титан материалов [14].

Качественным подтверждением ведущей роли распыления в поступлении примесей металла с поверхности антенны является обнаруженная в [IIa] хорошая корреляция между изменением потока атомов Ti вблизи работающей антенны и ионного потока, выходящего в область дивертора. Этот факт послужил основанием для изменения конструкции перемычек антенны, позволившего в последних экспериментах в несколько раз уменьшить величину поверхности антенны, пересекаемой дивертируемыми силовыми линиями.

4.4. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИСТОЧНИКОВ И МЕХАНИЗМОВ ПОСТУПЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПРИМЕСЕЙ (КОРПУСА ВИНТОВОЙ ОБМОТКИ)

Выше уже отмечалось, что вследствие удаления от объема удержания участков попадания диверторных потоков на поверхность, основным источником поступления примесей металлов, наряду с ВЧ-антеннами, в "У-3" являются обращенные к удерживаемой плазме поверхности корпусов винтовой обмотки, изготовленных из нержавеющей стали.

Из рис.5 видно, что прямое воздействие плазмы объема удержания или

диверторных потоков на эти поверхности исключается. Воздействующими факторами здесь могут быть, во-первых, атомы перезарядки, покидающие объем удержания, и во-вторых, фоновая плазма, заполняющая пространство между КЗМП и поверхностью корпусов В0, которая образуется преимущественно в результате ионизации рабочего газа ($P_{H_2} = 1,5 \cdot 10^{-5}$ Тор) ультрафиолетовым излучением из плазмы и за счет распространения в этой области ВЧ-колебаний. Проверка относительной роли обеих этих причин в поступлении примесей металлов (т.е. нейтралы перезарядки и фоновая плазма) осуществлялась сравнением взаимной корреляции поведения интенсивности линий атомов металлов в плазме, с одной стороны, и потоком на стенку атомов перезарядки (в диапазоне энергий 0,7-3,4 кэВ) или потоками на стенку фоновой плазмы - с другой стороны.

Оказалось, [IIa, I4a] что при изменении режимов разряда с изменением начального давления рабочего газа или напряженности магнитного поля высокая степень корреляции имеет место только во втором случае, а именно: между поступлением атомов металла в плазму с поверхности корпусов В0 (СгI, FeI) и выбросом на эту поверхность фоновой плазмы (её характеристики изучались с помощью зондов-коллекторов, установленных непосредственно на корпусе В0). Причем корреляция (на уровне 0,8-0,9) сохранялась как при изменении давления рабочего газа или напряженности магнитного поля, так и при инъекции примесей или при временных флуктуациях тока фоновой плазмы на коллектор. И, соответственно, особенности поведения фоновой плазмы никак не отражались на изменениях интенсивности свечения линии атомов Т1 (поступающих с ВЧ-антенны), которая коррелировала с поведением потока ионов на коллектор, расположенный в области дивертора.

Подробно характеристики фоновой плазмы специально не изучались, но согласно оценкам, её плотность составляет $> 10^9$ см⁻³, а средний поток заряженных частиц на поверхность корпуса В0 $\Gamma \approx (1+10) \cdot 10^{16}$ см⁻²·с [I4a].

4.5. СООТНОШЕНИЕ МЕЖДУ ПОТОКАМИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ АТОМОВ В ПЛАЗМУ С АНТЕННЫ И КОРПУСОВ В0

Соотношение между вкладами в поступление примесей металлов в плазму ВЧ-антенн и корпусов В0 было получено на основании изучения осадка на собирающих коллекторах [I5a-I7a]. Коллекторы изготавливались из молибденовых пластин (φ 40 мм) и пластин из фотостекла (30 x 30 мм²), и размещались по периметру установки в идентичных сечениях каждого из 9 периодов магнитного поля, непосредственно на корпусах винтовой обмотки.

Использовались два полных набора молибденовых и один набор стеклянных пластинок, так что в каждом наборе количество коллекторов соответствовало числу периодов магнитного поля ловушки. Предварительные исследования показали [18а], что низкое содержание элементов группы железа и титана в материале пластинок позволяет резко повысить чувствительность регистрации их в осадке по сравнению с другими материалами, обычно применяемыми для изготовления коллекторов.

На первой стадии экспериментов плазменному воздействию подвергались молибденовые пластинки только одного набора; было проведено $\sim 10^4$ маломощных очистительных импульсных разрядов с длительностью 30 мс и ~ 600 рабочих разрядов длительностью 25 мс. При этом параметры плазмы в очистительных разрядах были на уровне $\bar{n}_e \sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T_e \sim 10 \text{ эВ}$, а в рабочих разрядах $\bar{n}_e = (2-4) \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$ и $T_e(0) \sim 200 \text{ эВ}$.

После проведения рентгено-флуоресцентного анализа (РФА) образцов они вновь были помещены в камеру примерно на те же самые места вместе с двумя новыми наборами (по одному из каждого набора на каждом периоде винтовой обмотки). За время второй экспозиции образцы подвергались воздействию $3,3 \cdot 10^4$ очистительных и 3800 рабочих разрядов с приблизительно теми же параметрами, что и в первой экспозиции. Затем вышеописанная процедура РФ анализа проводилась для всех трех наборов образцов.

Повторная экспозиция первого набора Мо образцов-коллекторов позволила оценить скорость изменения плотности указанных металлов в осадке при увеличении числа рабочих разрядов.

Для получения абсолютных значений примесей в осадке был использован метод обратного резерфордского рассеяния (ОРР) ионов He^+ . С этой целью были отобраны и проанализированы три стеклянных образца с наиболее характерными осадками металлических примесей.

На рис.7 приведены распределения вдоль азимутального направления поверхностных концентраций атомов титана, осажденных в течение второй экспозиции, и элементов группы железа ($\text{Cr} + \text{Fe} + \text{Ni}$) для двух экспозиций, полученные при помощи РФА. Положения нижних, ближайших к образцам, краёв обеих ВЧ антенн отмечены стрелками.

Как видно, распределение титана в осадке (рис. 7а) имеет достаточно хорошо выраженную структуру, свидетельствующую о заметном вкладе в его образование близко расположенных участков ВЧ-антенн с TiN-покрытием. Но такая структура отсутствует в распределении тех осажденных атомов металлов (Fe , Cr , Ni), которые обусловлены эрозией корпусов ВО. Наблюдающееся различие в концентрациях осадка на образцах из разных наборов, рис.7б, может быть обусловлено некоторым

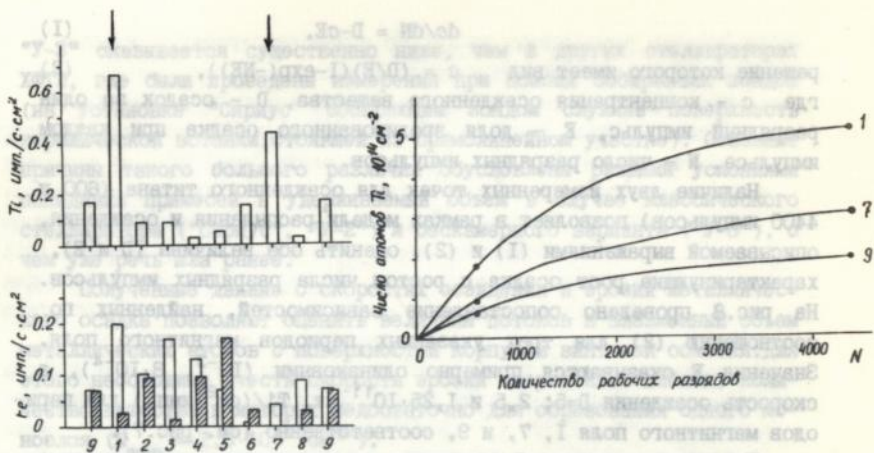


Рис.7. Распределение в осадке на собирающих зондах атомов а) титана и б) железа (две экспозиции). Ближайшие к зондам края ВЧ-антенн находились вблизи зондов I и 7

Рис.8. Сравнение с экспериментальными данными расчетных зависимостей титанового осадка от числа импульсов (собирающие коллекторы I, 7 и 9; 600 и 4400 рабочих импульсов)

различием режимов работы установки и различной установкой образцов на каждом периоде магнитного поля по отношению друг к другу (в пределах 5-6 см).

Приведенные данные, таким образом, свидетельствуют о наличии нескольких источников металлических примесей. Так, за поступление титана ответственно главным образом TiN покрытие ВЧ-антенн, а поступление материала нержавеющей стали обусловлено в основном эрозией обращенных к плазме поверхностей корпусов винтовой обмотки. Имеющиеся данные позволяют оценить скорость эрозии этих поверхностей. Действительно, из рис.8 следует, что начальная скорость роста осадка (за первую экспозицию) на образцах с наибольшим содержанием титана (периоды I, 7, 9) существенно выше, чем в среднем за время более длительной 2-й экспозиции. Такое поведение количества осаждаемого вещества характерно для случаев, когда наряду с осаждением одновременно идет и процесс эрозии осадка, так что изменение его плотности со временем может быть описано простым дифференциальным уравнением:

$$dc/dN = D - cE, \quad (1)$$

$$c = (D/E)(1 - \exp(-NE)), \quad (2)$$

где c - концентрация осажденного вещества, D - осадок за один разрядный импульс, E - доля эродированного осадка при каждом импульсе, N - число разрядных импульсов.

Наличие двух измеренных точек для осажденного титана (600 и 4400 импульсов) позволяет в рамках модели распыления и осаждения, описываемой выражениями (1) и (2), оценить обе величины (D и E), характеризующие рост осадка с ростом числа разрядных импульсов. На рис.8 проведено сопоставление зависимостей, найденных по соотношению (2) для трех указанных периодов магнитного поля. Значения E оказываются примерно одинаковыми (10^{-3} , $8 \cdot 10^{-4}$), а скорость осаждения $D=5; 2,5$ и $1,25 \cdot 10^{11}$ ат. $T1/(cm^2 \cdot \text{имп.})$ для периодов магнитного поля 1, 7, и 9, соответственно (см. рис.7).

При оценке скоростей осаждения не учитывались тренировочные разряды, поскольку вклад их в эрозию осадка, по-видимому, пренебрежимо мал. Это обусловлено низкими параметрами плазмы в тренировочных разрядах ($\bar{n}_e \leq 10^{12} \text{ см}^{-3}$, $T_e \leq 10 \text{ эВ}$), в результате чего энергия попадающих на поверхность частиц (H^+ , H) должна быть ниже порога распыления, который для нержавеющей стали равен $E_{th} = 85 \text{ эВ}$, а для титана $E_{th} \approx 90 \text{ эВ}$ [10].

В предположении постоянства условий генерации металлических примесей и скорости их осаждения на протяжении всей длительности разряда (25 мс): $D=2,2$; I и $0,5 \cdot 10^{13}$ ат. $T1/(cm^2 \cdot c)$, было проведено сравнение с результатами средних скоростей осаждения металлических атомов на стенки стеллараторов "Сириус" [3а] и "Ураган-2" [6а]. Результаты для всех трех установок приведены в таблице.

Установка	Длительность разряда, с	$T_e(0)$, эВ	$n_e(0)$, 10^{12} см^{-3}	\bar{n}_D^* ат./ $(cm^2 \cdot c)$
"Сириус"	10^{-3}	10-500	4-20	$\sim 3 \cdot 10^{14}$
"Ураган-2"	10^{-2}	50-200	2-8	$\sim 3 \cdot 10^{15}$
"Ураган-3"	$2,5 \cdot 10^{-2}$	200	4-6	$\sim 2 \cdot 10^{13}$

* Примечание. Состав примесей: "Сириус" - Fe + Ni + Cu + Mn;
 "У-2" - Fe + Cr + Ni;
 "У-3" - Fe + Cr + Ni + Ti.

Как видно, скорость роста металлического осадка в установке

"У-3" оказывается существенно ниже, чем в других стеллараторах ХФИ, где были проведены измерения при помощи собирающих зондов (на установке "Сириус" собирающим зондом служила поверхность керамической вставки, стоявшей на прямолинейном участке). Основные причины такого большого различия обусловлены разными условиями попадания примесей в удерживаемый объем в случае классического стелларатора ("Сириус", "У-2") и бескамерного варианта ("У-3"), о чем уже речь шла ранее.

Полученные данные о скоростях осаждения и эрозии металлического осадка позволяют оценить величины потоков в плазменный объем металлических атомов с поверхностей корпусов винтовой обмотки. Для этого необходимо учесть скорость эрозии сверхтонких плёнок, количество вещества в которых недостаточно для образования одного монослоя ($N_{\text{мон}} \approx 2,5 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$).

В описываемых экспериментах насыщение роста титанового осадка, наблюдающееся (см. рис.8) при концентрации атомов титана $c \approx 5 \cdot 10^{14} \text{ ат./см}^2 \approx 0,2 N_{\text{мон}}$, означает, что за каждый импульс происходит полное удаление всего осаждаемого в этом же импульсе количества атомов $T_1 - 2 \cdot 10^{11} \text{ ат.} T_1 / (\text{см}^2 \cdot \text{имп.})$. Поэтому, если принять (согласно [15]), что пропорциональное увеличение эрозии имеет место вплоть до толщины двух монослоев, а затем остается на некотором постоянном уровне, соответствующем распылению массивного металлического образца, то за каждый импульс с поверхности будет уноситься количество металлических атомов, равное: $N_{T_1} = 2 \cdot 10^{11} \cdot 2 N_{\text{мон}} / c = 2 \cdot 10^{12} \text{ ат.} T_1 / (\text{см}^2 \cdot \text{имп.})$.

Использованные собирающие зонды находились непосредственно на корпусах винтовой обмотки, поэтому эрозия поверхности корпусов должна была идти примерно с такой же скоростью, если бы они были изготовлены из титана. Но поскольку корпуса винтовой обмотки изготовлены из нержавеющей стали, коэффициент распыления которой примерно вдвое выше [10], чем титана, то для получения оценки потока металлических атомов с поверхности корпусов указанные выше значения необходимо удвоить. Однако с учетом взаимного расположения плазменного объема и винтовых обмоток (рис.5), в действительности, поток атомов в объем удержания плазмы должен быть меньше, чем полный поток распыляемых атомов. Величину доли потока распыляемых атомов Φ , попадающего в объем удержания плазмы (без учета ослабления его в диверторном слое), можно оценить, используя выражение, в основе которого лежит предположение о распределении плот-

ности потоков распыляемых частиц по углам относительно нормали к поверхности по косинусному закону [17а]:

$$\Phi = \left(\frac{r_0}{a} \right) + \frac{4}{\pi} \int_{\gamma_b}^{\gamma_{max}} \cos \gamma \sin \gamma \times \\ \times \arctg \frac{r_0 \cos \gamma_b \sin \gamma_{max}}{(R_0 + b) \sin \gamma (\cos \gamma - \sqrt{\cos^2 \gamma - \cos^2 \gamma_{max}})} d\gamma, \quad (3)$$

где $\gamma_b = \arctg(r_0 / \sqrt{a^2 - r_0^2})$, $\gamma_{max} = (R + b) / \sqrt{(R + a)^2 - (R + b)^2}$,

$b = \frac{r_0^2}{a}$, r_0 - средний малый радиус области удержания плазмы,

a - малый радиус винтовой обмотки, R_0 - большой радиус тора.

Подставляя в формулу (3) значения геометрических параметров установки "У-3", а именно: $r_0 = 10$ см, $a = 19$ см и $R_0 = 100$ см, можно найти $\Phi = 0,44$; т.е. ~40 % от полного потока распыленных атомов попадали на границу области удержания плазмы, что составляет $\sim 2 \cdot 10^{12}$ ат.мет./см²·имп.), $\sim 1 \cdot 10^{14}$ ат.мет./см²·с) (где имеется в виду сумма Fe+Cr+Ni). Предполагая, что эрозия поверхности коробов винтовой обмотки всюду одинакова, можно найти величину площади поверхности, обращенной к плазме, приходящуюся на единицу длины (1 см) установки, $S \sim 50$ см², и определить соответствующее число металлических атомов, попадающих на границу плазменного шнура, на каждый погонный сантиметр его длины: $N_{мет} = 10^{14}$ ат.мет./имп·см). Это значение по порядку величины согласуется с оценками, полученными по данным спектроскопических измерений для потока атомов металлов (Fe+Cr+Ni) в условиях одного из типичных режимов работы установки ($\sim 5 \cdot 10^{13}$ ат.мет./см²·с).

Полное количество металлических атомов, поступающих с коробов В0 в объем удержания ($2\pi R_0 \cdot N_{мет}$), оказывается всего лишь в 2-4 раза выше, чем полное количество атомов титана, попадающих в плазму с TiN покрытия антенн, хотя площадь поверхности антенн, подвергавшихся воздействию диверторных потоков, составляет <0,5 % площади, обращенной к объему удержания поверхности коробов.

4.6. ВЫВОДЫ

1. Измерены распределения диверторных потоков и определены параметры диверторной плазмы вблизи поверхностей, подвергаемых её воздействию ($n_e \approx 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 20 \text{ эВ}$, $V_{\text{пл}} \approx 200 \text{ В}$). Исходя из конфигурации поверхностей коробов винтовой обмотки, дано объяснение тому экспериментальному факту, что вклад диверторных потоков в эрозию этих поверхностей незначителен: основной поток эрозии не направлен в сторону объема удержания (в отличие от ситуации в "классическом" стеллараторе).

2. В то же время, установлено, что диверторные потоки играют ведущую роль в эрозии поверхности ВЧ-антенн и соответствующем поступлении примесей в плазму. Основной механизм эрозии - дугообразование (как и в случаях установок "Сириус" и "Ураган-2") при использовании антенны из нержавеющей стали. Поток атомов металлов ($\text{Fe} + \text{Cr} + \text{Ni}$) с поверхности такой антенны оказался чрезвычайно большим. Этот факт послужил основанием для реализации предложения о покрытии антенны нитридом титана, что обеспечило существенное снижение потока атомов металла в плазму.

3. Определено, что распыление обращенных к плазме поверхностей коробов В0 вызывается в основном, потоками малоплотной фоновой плазмы, образовавшейся вне объема удержания, в области открытых силовых линий, и выбрасываемой на поверхности коробов за счет дрейфа в скрещенных переменном электрическом (ВЧ-колебания) и постоянном магнитном полях.

4. Различие в потоках металлических атомов в удерживаемую плазму с поверхности коробов винтовой обмотки и ВЧ-антенн, покрытых пленкой нитрида титана, не превышает 2-4 раз, тогда как отношение величин их поверхностей (подвергаемых воздействию фоновой плазмы и плазмы диверторного потока, соответственно) составляет ≈ 200 .

5. Таким образом, результаты экспериментов на установке "У-3" свидетельствуют о принципиальном преимуществе магнитной конфигурации (и конструкции) торсатрона перед стеллараторной в отношении возможностей контроля за поступлением в плазму продуктов эрозии материальных поверхностей. Эти результаты подтверждают сделанный в [III] вывод о том, что в термоядерных установках основное поступление примесей обусловлено непосредственным воздействием плазмы на близкие расположенные поверхности.

5. О ВОЗМОЖНОСТИ КОНТРОЛЯ И РЕГУЛИРОВАНИЯ НЕОДНОРОДНОСТИ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ПОВЕРХНОСТЬЮ В УСТАНОВКАХ СТЕЛЛАРАТОРНОГО ТИПА

5.1. ОБОСНОВАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

5.1.1. Во Введении уже отмечалось, что одно из принципиальных отличий стеллараторной конфигурации от конфигурации токамака заключается в существенно большей роли, которую должен играть перенос запертых частиц в общем балансе частиц и энергии. Соответственно, большим может быть и вклад запертых частиц в плазменное воздействие на поверхности вакуумной камеры установки, особенно в тех случаях, когда для нагрева плазмы используются ВЧ-методы, т.е. когда приращение энергии удерживаемых частиц идет преимущественно за счет увеличения её поперечной составляющей.

В настоящее время методы расчета траекторий запертых частиц вне объема удержания только разрабатываются [16, 17]. Как и предсказывалось качественно неоклассической теорией, расположение областей выхода частиц, запертых на винтовых неоднородностях магнитного поля, за пределы КЗМП отличается от расположения областей выхода открытых силовых линий и, соответственно, потоков основной части удерживаемой плазмы, формируемых пролетными частицами [16].

Таким образом, разработка методов воздействия на соотношение числа локально запертых и пролетных частиц не только могла бы позволить контролировать транспорт частиц и энергии, но и открыла бы возможность регулирования интенсивности плазменного воздействия на различные участки поверхности вакуумной камеры.

К началу работ по теме диссертации в модельных экспериментах на двух установках стеллараторного типа ХТИ ("Сатурн" и "Винт-20"), а также на установках Proto-Cleo, Heliotron-D и Spac-1 было показано [19a-22a], что вклад локально запертых частиц в перенос плазмы поперек магнитного поля является более низким, чем предсказывалось неоклассической теорией для стеллараторов [18, 19]. Различие это заключалось в том, что по мере уменьшения частоты столкновений, ν_{eff} , скорость потерь плазмы из объема удержания увеличивалась не пропорционально ν_{eff}^{-1} (предсказание теории), а значительно медленнее, как $\nu_{eff}^{-\gamma}$, где $\gamma < 1$. Оказалось, что коэффициент γ тем ниже, чем меньше винтовая неоднородность магнитного поля установки: для стелларатора "Сатурн" с $\bar{E}_n \approx 0,05$ величина $\gamma \approx 0,1$ [18a], тогда как $\gamma \approx 0,4$ для одного из режимов однозаходно-

го торсатрона "Винт" с $\bar{\epsilon}_n \approx 0,65$ [20a, 21a].

Тщательному анализу данных по удержанию в установке "Сатурн" плазмы с низкой частотой столкновений ($n_e \leq 10^9$ см⁻³, $T_e = 5 \cdot 10$ эВ) посвящена работа [23a]. В ней было показано, что во всей низкочастотной области ($0,1 \leq \frac{v_{\text{эфф}}}{v_1} \leq 1$, где v_1 соответствует левой границе плато на диффузионной кривой) из-за малости эффекта локально запертых частиц сохраняется характерная для режима плато пропорциональность времени жизни плазмы углу вращательного преобразования.

Причины заметного уменьшения γ по сравнению с теорией может быть несколько. В работе [21a, 22a], например, отмечались такие возможные причины, как воздействие флуктуаций электрического (или магнитного) поля или влияние квазипостоянного радиального электрического поля.

Под действием переменного электрического поля запертые заряженные частицы могут становиться пролетными. Для магнитных ловушек с аксиальной симметрией (токамаки) подобная возможность превращения части запертых электронов в пролетные с соответствующим изменением коэффициентов переноса обсуждалась в работах [20, 21]. Авторы этих работ рассматривали влияние электрических полей либо возбуждаемых в плазме извне [21], либо существующих в виде ионно-звуковых, дрейфовых или других колебаний [20]. Для того, чтобы воздействие колебаний электрического поля было эффективным, частота его изменения во времени должна совпадать с баунс-частотой запертых частиц (или быть кратной ей).

Важно, что добавка продольной скорости, приобретаемой запертыми частицами в переменном электрическом поле для превращения их в пролетные, может составлять малую долю их тепловой скорости ($\Delta v_{\parallel} / v_{t \approx 0,1}$), поскольку для большинства установок стеллараторного типа в них малой является и сама средняя величина v_{\parallel} у запертых частиц ($v_{\parallel} / v_t < \sqrt{\epsilon}_n$). Благодаря этому в пролетные будут превращаться, прежде всего, слабозапертые частицы. Для выбивания же из локальных магнитных ямок сильнозапертых частиц нужны большие амплитуды переменных электрических полей, которые, в свою очередь, могут приводить к увеличению потерь за счет высокого уровня плазменных колебаний.

Экспериментальная проверка возможности контролируемого изменения эффекта, обусловленного наличием запертых частиц, проводилась на установках "Сатурн" и "Винт-20".

5.1.2. Ещё одним фактором, влияющим на неоднородность взаимодействия плазмы с различными участками поверхности в установках

стеллараторного типа может быть дрейфовая турбулентность [21]. В экспериментах с плазмой СВЧ-разряда на стеллараторе "Сатурн" (ЗП-разряд, $f_0 = 10$ МГц, $B_0 = 3,1$ кГс, $n_0 < 8 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T_e < 10$ эВ, $T_i < 0,5$ эВ) было установлено, что связанный с дрейфовыми колебаниями турбулентный поток, измеренный в области максимального градиента плотности плазмы, является сильно неоднородным по малому азимуту. Величина потока в центральной плоскости на наружном обходе в несколько раз (4-5) превышала поток в направлении стенки на внутреннем обходе [24а]. А поскольку, как установлено в работах [25а, 26а], дрейфовая турбулентность была здесь основной причиной потерь энергии по электронному каналу, а также играла важную роль в диффузионных потерях частиц [26а], то наблюдавшаяся неоднородность потоков могла проявляться в сильной неоднородности взаимодействия плазмы с поверхностью стенок вакуумной камеры.

В связи с этим были предприняты исследования, направленные на изучение возможности стабилизации дрейфовых колебаний, используя особенности магнитной конфигурации трехзаходного стелларатора (т.е. изменяя величины средней магнитной ямы и шире магнитных силовых линий) и путем внешнего возбуждения ВЧ-колебаний.

5.2. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЫБИВАНИЮ ЗАПЕРТЫХ ЧАСТИЦ НА СТЕЛЛАТОРЕ С МАЛОЙ ВИНТОВОЙ НЕОДНОРОДНОСТЬЮ "САТУРН" (27а, 28а)

При проведении экспериментов на стеллараторе "Сатурн" учитывалось, что ожидаемое улучшение удержания плазмы не может превышать несколько десятков процентов в связи с малостью самого наблюдаемого эффекта запертых частиц в полных потерях плазмы ($\tau_n \propto \nu_{eff}^{-0,1}$). То есть, требовались большая тщательность при проведении измерений и достаточно большая статистика.

Существенным оказалось и то, что с самого начала подготовки экспериментов было учтено существование большого различия частот отражений локализованных электронов в различных областях сечения плазменного шнура ($\epsilon_n = \epsilon_n(r)$). Для того, чтобы одновременно воздействовать на большую долю запертых частиц, был использован шумовой генератор, ширина спектра которого могла регулироваться в пределах от 0 до 2 МГц, а рабочий диапазон частот составлял 0-10 МГц. ВЧ-напряжение прикладывалось между двумя парами возбуждающих элементов, расположенных вблизи границы плазмы, между крайней магнитной поверхностью и стенкой металлической вакуумной камеры. Как было показано экспериментально и в расчетах, при таком подключении генератора в плазме должны

возбуждаться, в основном, продольные электрические ВЧ-поля. Измерялись зависимости времени жизни распадающейся плазмы $\tau \propto \left(\frac{1}{n} \frac{dn}{dt}\right)^{-1}$ от амплитуды и характера спектра ВЧ-напряжения, подаваемого на возбуждающие элементы.

На рис.9 в двух масштабах приводятся результаты измерений, полученные в широком диапазоне изменения амплитуды ВЧ-напряжения \bar{U} со спектром в диапазоне 1-3 МГц (показан на вставке рис.10). Как видно, при малых \bar{U} (рис.9а) время удержания увеличивается с ростом переменного напряжения, достигает некоторого максимума, а затем начинает уменьшаться. Максимальное значение τ превышает начальное значение τ_0 (для $\bar{U}=0$) примерно на 30-40%. Дальнейшее увеличение \bar{U} на возбуждающих элементах приводило к заметному (в 1,5-2 раза) спаду времени жизни, как показывают данные рис.9б (сплошная линия).

Измерения времени жизни, выполненные с различными ВЧ-спектрами, показали, что существует область частот, в которой эффект увеличения τ за счет возбуждаемых электрических полей оказывается наибольшим. Этот факт иллюстрируется рис.10, где величины τ/τ_0 , измеренные для разных частотных интервалов и постоянном ВЧ-напряжении на элементах ($\bar{U} \approx 50$ мВ), представлены в виде зависимости от средней частоты \bar{f} , определяемой как $\bar{f} = 1/2 (f_1 + f_2)$, где f_1 и f_2 - граничные частоты, указанные на спектре этого же рисунка.

По горизонтальной оси рис.10 отмечен расчетный диапазон баунс-частот Δf_B , найденный с учетом реального распределения плотности плазмы и вычисленных значений $\epsilon_n(r)$ для трехзаходного стелларатора "Сатурн". Как видно, расчетные значения интервала частот колебаний локализованных электронов примерно в 2 раза ниже интервала тех частот, для которых действительно имеет место достижение максимума τ/τ_0 на рис.10.

Важно отметить, что эффект увеличения времени удержания наблюдался только при возбуждении в плазме электрических полей с широким частотным спектром ($\Delta f \sim 2$ МГц). Если к возбуждающим элементам прикладывалось гармоническое ВЧ-напряжение из того же спектрального диапазона, то с точностью до ошибок измерений, как видно из рис.9, (пунктир) увеличение времени жизни плазмы отсутствовало. Лишь достаточно большое напряжение вызывало некоторое (-10%) уменьшение τ .

Существенно также, что увеличение τ при возбуждении электрических полей с шумовым спектром имело место только при низких частотах столкновений, когда частота ν_{eff} составляла $\sim \frac{1}{10}$ от левой границы пла- то диффузионной кривой. С увеличением ν_{eff} на порядок величины, т.е.

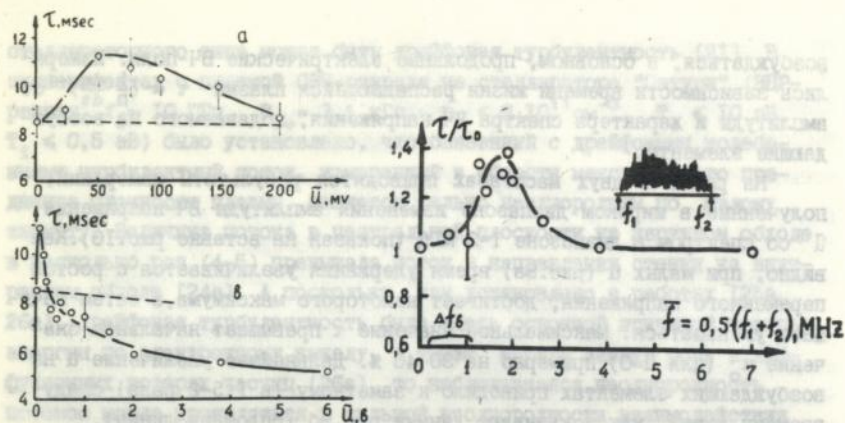


Рис.9. Зависимость времени удержания τ от величины ВЧ-напряжения \bar{U} на возбуждающих элементах; а - малые напряжения, б - большие напряжения. Пунктир - результаты с подачей монохроматического напряжения (на частотах 0,8; 1,5 и 8 МГц)

Рис.10. Изменение величины τ/τ_0 от средней частоты $\bar{f} = 1/2(f_1 + f_2)$; Δf_0 - расчетный диапазон частот отражения локально запертых электронов

при переходе по режиму диффузии непосредственно на участок плато диффузионной кривой, подобного возрастания не наблюдалось. Но при больших напряжениях ($\bar{U} \approx 4$ В) происходило увеличение τ , обусловленное ионизацией атомов гелия который напускался до давления $1,7 \cdot 10^{-5}$ Тор с целью увеличения ν_{eff} и перехода по частоте столкновений в режим плато.

5.3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ВЫБИВАНИЮ НА ОДНОЗАХОДНОМ ТОРСАТРОНЕ "ВИНТ-20" С БОЛЬШОЙ ГОФРИРОВКОЙ МАГНИТНОГО ПОЛЯ (29а)

Магнитная система установки "Винт-20" состояла из однозаходной спирали ($R_0 = 32$ см, $r_0 = 7$ см, $m = 13$) и двух кольцевых катушек для компенсации вертикальной составляющей магнитного поля, создаваемой винтовым проводником. Благодаря такой конструкции магнитное поле в объеме удержания обладало сильной неоднородностью: на крайней расчетной неразрушенной магнитной поверхности $B_{max}/B_{min} \approx 10$. По-существу, наружную область магнитной конфигурации в этой установке можно рассматривать как соединенные между собой 13 отдельных пробкотронов.

При изучении удержания редкой инжектированной плазмы здесь было обнаружено существенное возрастание τ по мере уменьшения частоты столкновений, так что показатель этого изменения γ (в формуле, описывающей экспериментальную зависимость, $\tau \propto \nu_{eff}^{-\gamma}$) достигал величины 0,4 (в отличие от результатов аналогичных измерений на установке "Сатурн" с низкой величиной гофрировки, где $\gamma \approx 0,1$). А относительные изменения τ в исследованном диапазоне частот столкновений достигали почти одного порядка величины ($\tau_{max}/\tau_{min} \approx 7$ [20a]).

Оценки диапазона баунс-частот, полученные на основе зондовых измерений плотности плазмы и радиальных профилей рассчитанных величин винтовой неоднородности магнитного поля дали значения 6-8 МГц (по сравнению с 0,4-1,3 МГц для стелларатора "Сатурн").

При проведении экспериментов на этой установке использовалась схема расположения возбуждающих электродов (6 пар), показанная на

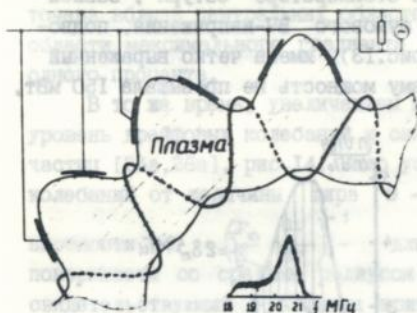


Рис.10. Схема экспериментов по выбиванию запертых частиц на однозаходном торсатроне "Винт-20". На вставке показан спектр возбуждаемых В4-колебаний

рис.10. Там же на вкладке приведен типичный спектр ВЧ напряжения, нижняя граница которого могла перемещаться от 0 до ~27 МГц при сохранении почти неизменной формы спектра. Плазма создавалась с помощью ЭЦР на частоте $f = 2,45$ ГГц ($\nu_{рез} \approx 860$ Гс). Примерно в середине разрядного импульса (длительностью около 2 с) на время $\Delta t - I_c$ включался ВЧ-генератор, соединенный с возбуждающими элементами. Зондовые измерения показали, что уровень возбуждаемых в плазме ВЧ-колебаний с широким спектром возрастал линейно с числом пар подключаемых элементов от одной до четырех, а затем наступало насыщение. Все приведенные ниже результаты были получены при использовании пяти пар работавших ВЧ-элементов. Форма спектра возбуждаемых в плазме колебаний достаточно хорошо совпадала со спектром ВЧ-напряжения, подаваемого на возбуждающие электроды.

В момент подачи ВЧ-напряжения на возбуждающие элементы имело

рис.11. Там же на вкладке приведен типичный спектр ВЧ напряжения, нижняя граница которого могла перемещаться от 0 до ~27 МГц при сохранении почти неизменной формы спектра. Плазма создавалась с помощью ЭЦР на частоте $f = 2,45$ ГГц ($\nu_{рез} \approx 860$ Гс). Примерно в середине разрядного импульса (длительностью около 2 с) на время $\Delta t - I_c$ включался ВЧ-генератор, соединенный с возбуждающими элементами. Зондовые измерения показали, что уровень возбуждаемых в плазме ВЧ-колебаний с широким спектром возрастал линейно с числом пар подключаемых элементов от одной до четырех, а затем наступало насыщение.

место увеличение плотности плазмы в объеме удержания, регистрируемое электрическими зондами. Мерой эффекта воздействия шумового электрического поля являлась величина отношения $\left(\frac{(nv)_{ВЧ}}{(nv)_0} \right)$ ионных токов насыщения, которая для наиболее благоприятных условий (по плотности плазмы, амплитуде ВЧ-напряжения и положения его спектра) достигала 4-5. Наблюдаемый эффект (т.е. рост $(nv)_{ВЧ}$ по отношению к $(nv)_0$) быстро уменьшался с увеличением начальной плотности плазмы, рис.12, и при перемещении возбуждаемого спектра по шкале частот.

Такой большой эффект ($\leq 400\%$) воздействия шумового электрического поля на плазму ЗЦР-разряда объясняется, по-видимому, улучшением удержания плазмы при снижении потерь, обусловленных выдрейфовыванием поперек удерживающего магнитного поля локально запертых электронов. Согласно зондовых измерений, рост T_e при включении шумового ВЧ-поля не превышал 20% ($T_{eВЧ} / T_{e0} \approx 1,2$), что находится в соответствии с низкой начальной степенью ионизации плазмы ($\leq 10\%$).

Так же как в экспериментах на стеллараторе "Сатурн", зависимость $(nv)_{ВЧ} / (nv)_0$ от амплитуды шумового ВЧ-напряжения, подводимого к возбуждающим элементам (рис.13), имела четко выраженный максимум. При этом вводимая в плазму мощность не превышала 150 мВт.

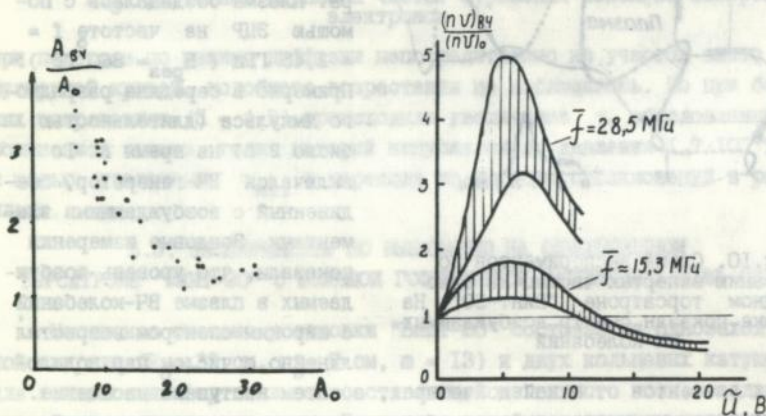


Рис.12. Относительное изменение плотности плазмы при возбуждении переменных электрических полей с широким спектром в зависимости от начальной плотности плазмы

Рис.13. Относительное изменение плотности плазмы в зависимости от амплитуды ВЧ-напряжения, подаваемого на возбуждающие элементы для двух частотных диапазонов

т.е. составляла не более 10% от мощности, непосредственно затрачиваемой на поддержание плазмы СВЧ-разряда, как следует из зондовых измерений ($n_e = 10^9 + 10^{10} \text{ см}^{-3}$, $T_e \approx 5 \text{ эВ}$, $T_i < T_e$, $\tau_E \approx 0,1 \text{ мс}$).

5.4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО СТАБИЛИЗАЦИИ ДРЕЙФОВЫХ КОЛЕБАНИЙ ИЗМЕНЕНИЕМ МАГНИТНОЙ КОНФИГУРАЦИИ

Конструкция магнитной системы установки позволяла осуществлять почти независимо регулирование в определенных пределах $\overline{\min B}$ и шира. Однако, увеличение $\overline{\min B}$ до максимального значения вызвало заметное снижение низкочастотных флуктуаций в центральной области объема удержания и практически не изменяло их уровень на градиенте плотности [30а]. Причина этого прояснилась после того, как были проведены расчеты радиальных распределений $\overline{\min B}$ внутри КЗМП. Оказалось, что в крутом стеллараторе с широм, каковым являлся стелларатор "Сатурн", основная величина $\overline{\min B}$ (вплоть до 10 %) сосредоточена вблизи центральных областей объема удержания, тогда как в области максимального градиента n_e величина $\overline{\min B}$ не превышала одного процента.

В то же время, увеличением шира удавалось существенно снижать уровень дрейфовых колебаний и связанный с ними турбулентный поток частиц [24а, 26а], рис. 14. Было установлено, что зависимости уровня колебаний от величины шира $\theta - \frac{a}{L_s}$ (где a - размер градиента плотности, $L_s = \left(\frac{r_0}{R} \frac{dl}{dr}\right)^{-1}$ - длина шира на крайней магнитной поверхности со средним радиусом r_0) имеют характерный излом, свидетельствующий о наличии критического значения шира, $\theta_{кр}$. В области $\theta < \theta_{кр}$ влияние шира на амплитуду дрейфовых колебаний, δ , почти отсутствовало, тогда как при $\theta > \theta_{кр}$ наблюдался сильный спад δ , примерно пропорциональный $\theta^{-3/2}$. При этом, соответственно, возрастал вклад в общие плазменные потери той части потерь, которая обусловлена неоклассической диффузией поперек магнитного поля. При максимально достижимой величине шира $\theta_{max} \leq 0,1$ происходило качественное изменение характера диффузии по сравнению с режимом удержания при низких значениях шира ($\theta < 0,05$), и проявлялись [26а] особенности удержания плазмы, предсказываемые теорией неоклассической диффузии для области "плато" [18]. В частности, появилась линейная зависимость произведения $\tau_n \cdot T_e^{3/2}$ от величины $r_0^2 \cdot l(r_0)$. И что является важным с точки зрения взаимодействия плазмы с поверхностью, - существенно уменьшалось различие в величинах турбулент-

ных потоков (на уровне максимального градиента n_e) в направлении наружной и внутренней частей тороидальной камеры (от $\approx 3,5$ до $\approx 1,5$ для данных на рис.14).

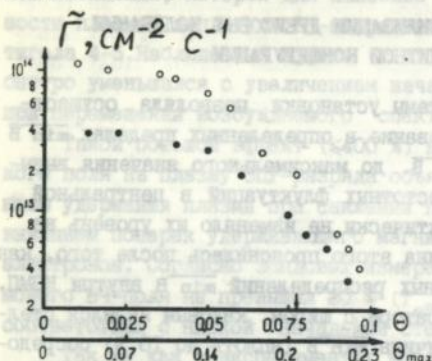


Рис.14. Зависимость величин турбулентных потоков от широты для двух значений углов вдоль малого азимута: ○ - $\theta=0$, ● - $\theta = \frac{\pi}{2}$

В условиях перехода к режиму сильного подавления дрейфовой неустойчивости широты (т.е. при $\theta \geq \theta_{кр}$) была обнаружена [26а,27а] зависимость критической величины широты от массы иона, $\theta_{кр} \propto M_i^{-1/4}$, позже полученная теоретически в работе [23].

5.5. ВЧ-СТАБИЛИЗАЦИЯ ДРЕЙФОВЫХ КОЛЕБАНИЙ

Для изучения возможности ВЧ-стабилизации дрейфовой неустойчивости использовалась система возбуждения ВЧ-полей в плазме, подобная той, которая применялась для изменения функции распределения запертых частиц. Для частот в диапазоне частоты нижнего гибридного резонанса (НГР) такая система обеспечивала возбуждение, главным образом, медленных волн, когда продольная составляющая электрического поля существенно превышает остальные. Диапазон НГР был выбран потому, что в то время этот частотный диапазон представлял большой интерес с точки зрения его использования для нагрева плазмы [24].

Для условий экспериментов с СВЧ-плазмой на стеллараторе "Сатурн" ($n_e = 10^{10} + 5 \cdot 10^{11} \text{ см}^{-3}$, $T_e \leq 10 \text{ эВ}$, $T_i \leq 0,5 \text{ эВ}$) частота НГР была близка к ω_{p1} . Возбуждение ВЧ-колебаний в плазме осуществлялось с помощью генератора мощностью несколько ватт на частоте $f_{ВЧ} = 32 \text{ МГц}$. Амплитуда ВЧ-полей в плазме измерялась специальным коаксиальным зондом, а НЧ-колебания плотности плазмы и электрического поля, обусловленные развитием дрейфовой неустойчивости, измеряли комбинированным электрическим зондом, распо-

лагавшимся вблизи максимума градиента плотности.

Непосредственные измерения уровня флуктуаций плотности и потенциала плазмы при различных уровнях возбуждаемых ВЧ-колебаний показали, что стабилизация, действительно, имеет место [33а]. При сравнительно низкой величине ВЧ-напряжения на возбуждающих элементах стабилизация имела резонансный характер, т.е. особенно сильно проявлялась, когда плотность плазмы вблизи максимального градиента совпадала с плотностью, соответствующей частоте НР: $\omega_{p1} \approx 2\pi \nu_{ВЧ}$. С увеличением напряжения на ВЧ-элементах стабилизация имела место и для $n_e > n_{e, рез}$, так что конечная амплитуда дрейфовых колебаний с ВЧ-стабилизацией, $A_{ВЧ}$, понижалась до ~25 % от первоначальной амплитуды, A_0 , без подачи стабилизирующего напряжения.

Резонансная зависимость эффекта ВЧ-стабилизации проявлялась и при добавлении к рабочему газу небольших количеств Ar, что приводило к увеличению $n_{e, рез}$. В соответствии с зависимостью ω_{p1} от средней массы иона имел место сдвиг плотности плазмы, при котором наблюдался резонанс подавления дрейфовых колебаний, в сторону увеличения n_e , так что $\Delta n_{e, рез} \propto \frac{n_0 \Delta r}{\bar{n}_{H_2} + \bar{n}_{Ar}}$.

5.6. ВЫВОДЫ

1. В модельных экспериментах в режиме редких столкновений обнаружено возрастание диффузионных потерь плазмы при уменьшении эффективной частоты столкновений, обусловленное наличием локально запертых частиц. Величина эффекта оказалась более значительной в установке с большей винтовой неоднородностью магнитного поля.

2. Приведенные в разделах 2 и 3 результаты свидетельствуют о том, что при удержании в стеллараторной конфигурации плазмы с низкой частотой столкновений с помощью внешнего воздействия можно довольно эффективно влиять на количество локально запертых частиц. Те запертые частицы, которые при возбуждении в плазме продольных электрических ВЧ-полей переводятся в пролетные, таким путем "загоняются" внутрь основного плазменного потока, формируемого открытыми силовыми линиями. Локализация мест выхода этого потока на материальные поверхности сравнительно легко может быть определена экспериментально или расчетным путем, благодаря этому принципиально возможным становится осуществление полного контроля за условиями взаимодействия здесь плазмы с поверхностью (например, закрыванием

нужных участков поверхности материалами с низким Z , подобно тому, как лимитеры практически всех сколько-нибудь крупных токамаков делаются из углеграфитов).

3. Показано также (разделы 4 и 5), что в режиме "плато" с помощью внешнего воздействия (ВЧ-стабилизация) или изменением параметров магнитной конфигурации можно в значительной степени регулировать неоднородность распределения той части основного плазменного потока на стенку, которая обусловлена дрейфовой турбулентностью плазмы. В некоторых случаях на стеллараторе "Сатурн" в экспериментах с плазмой СВЧ-разряда удавалось получать примерно равномерное распределение плотности потоков на стенку вакуумной камеры вблизи всех трех ребер магнитной поверхности (см. раздел 3.2).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в ходе выполнения работ по теме настоящей диссертации впервые были получены новые экспериментальные результаты, представляющие интерес с точки зрения удержания плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью в замкнутых магнитных ловушках. Наиболее важными из этих результатов, выносимыми на защиту, являются следующие.

1. Впервые на установках стеллараторного типа измерены распределения диверторных потоков в местах их попадания на стенку вакуумной камеры. Обнаружено увеличение неоднородности распределения потоков по малому азимуту (больше на наружном обходе) с уменьшением радиуса вписанной в камеру крайней магнитной поверхности. Выявлена корреляция участков максимальной эрозии стенок тороидальных частей "классического" стелларатора с положением областей выхода на стенку диверторных плазменных потоков. Установлено, что основным механизмом эрозии поверхности в результате непосредственного плазменного воздействия является дугообразование. Измерены скорости пересадки материала, выброшенного в результате эрозии под воздействием плазмы, и получены оценки скорости эрозии этих участков для стеллараторов "Сириус" и "Ураган-2".

2. Показано (на примере установки "Ураган-3") принципиальное преимущество торсатрона с естественным дивертором в отношении поступления примесей в удерживаемую плазму перед "классическим" стелларатором. Благодаря удалению участков выхода плазменных (диверторных) потоков на все поверхности (за исключением ВЧ-антенн) из пря-

мой видимости объема удержания вероятность поступления в плазму металлических примесей здесь существенно снижается; в этих условиях ведущую роль в поступлении примесей металла стала играть ВЧ-антенна из нержавеющей стали, часть поверхности которой пересекается диверторными потоками. Последнее обстоятельство явилось веским доводом в пользу покрытия поверхности антенны пленкой нитрида титана, что обеспечило примерно 20-кратное снижение потока атомов металла с ее поверхности. Однако, и в случае применения антенн с TiN покрытием, как показали измерения с помощью собирающих зондов, вклад обеих антенн в загрязнение плазмы примесями металлов остается сравнимым с вкладом всех обращенных к плазме поверхностей коробов винтовой обмотки, изготовленных из нержавеющей стали, несмотря на то, что площадь участков поверхности антенн, подвергаемых воздействию диверторных потоков, примерно в 200 раз меньше.

3. Установлено, что во время импульса ВЧ-нагрева периферийная плазма приобретает квазистационарный положительный потенциал ≤ 200 В, что должно приводить к повышенной эрозии тех заземленных поверхностей, на которые поступают диверторные потоки (а также участков поверхности ВЧ-антенн, пересекаемых диверторными потоками), в результате процессов дугообразования и распыления ионами водорода и многозарядными ионами легких примесей (углерод, кислород).

4. В торсатроне с дивертором "Ураган-3" при использовании ВЧ-антенн с TiN покрытием основным механизмом поступления металлических примесей в плазму является распыление, а источниками распыленного вещества - поверхности коробов В0 и TiN покрытие ВЧ-антенн. В связи с этим возможными путями дальнейшего снижения поступления в плазму металлических примесей могут быть следующие:

- применение TiN-покрытия на всех обращенных к плазме поверхностях корпусов винтовой обмотки (что приведет к примерно трехкратному снижению потока металлических атомов);
- усовершенствование техники нанесения TiN-покрытия с тем, чтобы его коэффициент распыления был бы ниже, чем у нержавеющей стали не в 3 раза [8,7а], а в 5-6 раз;
- использование широко применяемых на многих установках методов карбонизации или боронизации поверхностей, обращенных к плазме [24].

5. В модельных экспериментах по удержанию плазмы с низкой частотой столкновений качественно подтверждены положения неоклассической теории для стеллараторных систем относительно роли локально запертых частиц в плазменных потерях в установках с существенно различными ве-

личинами винтовой неоднородности магнитного поля.

6. Для стеллараторной конфигурации показана возможность уменьшения потерь запертых частиц с помощью возбуждения в плазме переменных продольных электрических полей с широким частотным спектром, перекрывающим спектр баунс-частот значительной доли запертых частиц (в проведенных экспериментах - электронов). Необходимая для получения заметного эффекта уменьшения потерь плазмы ВЧ-мощность оказывается существенно более низкой, чем та, что затрачивается на поддержание квазипостоянного разряда в магнитной ловушке.

7. Впервые на одной и той же установке исследованы различные способы стабилизации дрейфовой неустойчивости: увеличением ширины или величины средней магнитной ямы, а также с помощью ВЧ-колебаний, возбуждаемых в плазме (диапазон частот вблизи частоты нижнего гибридного резонанса). Обнаружено значение критической величины ширины, разделяющей области со слабым и сильным стабилизирующим эффектом на уровень дрейфовых колебаний. При максимально достигнутых значениях ширины в модельных экспериментах на стеллараторе "Сатурн" удалось получить величину коэффициента диффузии поперек магнитного поля, близкую к значению, предсказываемому на основе неоклассической теории.

Л и т е р а т у р а (а)

- 1а. Войцены В.С., Солодовченко С.И., Терешин В.И. Диагностика пристеночной плазмы и взаимодействия плазмы с поверхностью в термоядерных установках.- Препринт ХФТИ, Харьков, 1984.
- 2а. Vojtsenya V.S., Voloshko A.Yu., Lats'ko E.M., et al. Azimuthal distribution of divertor plasma fluxes in an 1-3 stellarator and torsatron. - Nucl.Fusion, vol.19 (1979) 1241-1244.
- 3а. Blank A.B., Vojtsenya V.S., Volkov E.D. et al. Plasma-wall interaction study in Kharkov stellarators.- Proc. 9th Europ. Conf on Controlled Fusion and Plasma Physics, Oxford 1979, vol.2, p.BP-32.
- 4а. Войцены В.С., Волков Е.Д., Грибанов Ю.А. и др. Эрозия внутренних поверхностей вакуумных камер стеллараторов "Ураган-2" и "Сириус".- ЖТФ, т.50 (1980) 415-417.
- 5а. Войцены В.С., Волков Е.Д., Грибанов Ю.А. и др. О взаимодействии плазмы с поверхностью в магнитных ловушках стеллараторного типа.- ВАНТ, серия Термоядерный синтез, в.2(6), М.- ИАЭ-1980, с.50-56.

- 6a. Burchenko P.Ya., Vojtsenya V.S., Volkov E.D. et al.
Discharge chamber wall erosion and mass transfer in the
Uragan-2 stellarator.- J.Nucl.Mater., vol.136 (1985) 258-262.
- 7a. Vasil'ev V.V., Vojtsenya V.S., Volkov E.D. et al., Reduction
of the metal impurity flux to the Uragan-3 torsatron plasma
by the use of RF TiN-coated antennas.- J.Nucl.Mater., vol.162-
-164 (1989) 787-790.
- 8a. Васильев В.В., Войценья В.С., Павличенко О.С., Терешин В.И.,
"Дивертор торсатрона", - Авт.свидет. № IO80650 по заявке
№ 3265827 от 27.03.81.
- 9a. Bakaeв V.V., Bondarenko S.P., Bronnikov V.V. et al.
Currentless plasma production and heating in the torsatron
Uragan-3 by RF waves.- Proc. 10th IAEA Conf. on Plasma Phys.
and Controlled Nuclear Fusion Res. (London 1984), Vienna
1985, vol.2, p.397-407.
- IOa. Besedin N.T., Chechkin V.V., Fomin I.P. et al.
Characteristics of ICR-produced peripheral plasma in the
Uragan-3M torsatron.- Preprint KFTI 91-26, Kharkov-1991.
- IIa. Bereznyj V.L., Bondarenko S.P., Vasil'ev M.P., Vojtsenya V.S.
et al. Behaviour of impurities during RF heating in the
Uragan-3 torsatron.- Plasma Physics and Controlled Nuclear
Fusion Research (Nice 1988), Vienna 1989, vol.2, p.599-609.
- I2a. Войценья В.С., Дикий А.Г., Коновалов В.Г. и др. Потоки металли-
ческих примесей с антенны при ВЧ создании и нагреве плазмы
в торсатроне "Ураган-3".- Физ. Пл., т.14, (1988) 656-662.
- I3a. Полякова Г.Н., Войценья В.С., Летучий А.Н., Ямницкий В.А.,
Вайсфельд А.М. Оптические методы измерения энергетических
распределений частиц, образованных при взаимодействии плазмы
с поверхностью в термоядерных установках.- Препринт ХФТИ
84-II, Москва, ЦНИИатоминформ, 1984, 30 с.
- I4a. Vasil'ev V.V., Vojtsenya V.S., Grigor'eva L.I. et al. On some
properties of the metallic impurity influx during RF plasma
generation and heating in the Uragan-3 torsatron.-
J.Nucl.Mater., vol.176-177 (1990) 1083-1088.
- I5a. Chechkin V.V., Grigor'eva L.I., Nazarov N.I et al. Edge plasma
potential and associated ion fluxes to the surface during ICRF
plasma production and heating in the Uragan-3 torsatron.-
Fusion Engineering and Design, vol.12 (1990) 171-178.
- I6a. Васильев В.В., Войценья В.С., Машкаров Ю.Г., Сарана В.Д. Иссле-

- дование металлических примесей в плазменных конденсатах установки У-3 методами обратного рассеяния и рентгенофлуоресцентного анализа.- В сб. Микроанализ на ионных пучках (Материалы 2^й Всесоюзной конф., Харьков 1988), с.276-280.
- 17а. Васильев В.В., Войцены В.С., Сарана В.Д. и др. Изучение источников поступления металлических примесей в плазму торсатрона У-3 по данным интегральных характеристик осадка на собирающих зондах.- Физ.Плазмы, т.16 (1990) 531-540.
- 18а. Хижковский В.П., Войцены В.С., Россошанская В.Л., Титова Н.П. Подложки для исследования элементного состава плазменных конденсатов методом РФА.- Межвузовский сборник "Источники и ускорители плазмы", Харьков, ХАИ, 1986, с.124-131.
- 19а. Vojtsenya V.S., Voloshko A.Yu., Solodovchenko S.I., Suprunenko V.A., Tolok V.T. Confinement of a low collision frequency plasma in the "Saturn-1" torsatron.- Proc. 3^d Int. Symp. on Toroidal Plasma Confinement, Garching 1973, paper D10.
- 20а. Georgievskii A.V., Letuchii A.N., Manzyuk N.A. et.al. Investigation of plasma confinement in $\ell=1$ torsatron "Vint-20".- Proc. 3^d Int. Symp. on Toroidal Plasma Confinement, Garching 1973, p.D11.
- 21а. Войцены В.С., Волошко А.Ю., Солодовченко С.И. и др. Удержание плазмы с низкой частотой столкновений в стеллараторах с широким Proc.-5th IAEA Conf.on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion, (Токуо 1974), Vienna 1975 vol.2, p.63-73.
- 22а. Войцены В.С., Волошко А.Ю., Солодовченко С.И., Штань А.Ф. Диффузия плазмы в стеллараторе в области низких частот столкновений.- УФЖ, т.24 (1979), с.14-21.
- 23а. Войцены В.С., Волошко А.Ю., Солодовченко С.И., Штань А.Ф. О диффузии бесстолкновительной плазмы в крутом трехзаходном стеллараторе "Сатурн",- ЖТФ, т.46 (1976), с.180-183.
- 24а. Vojtsenya V.S., Voloshko A.Yu., Zalkind V.M. et.al. The effect of shear on turbulent diffusion in a microwave discharge plasma in a toroidal stellarator.- Nucl.Fusion, vol.17 (1977) 651-658.
- 25а. Войцены В.С., Волошко А.Ю., Кравчин Б.В. и др. Экспериментальные исследования электронной теплопроводности бестоковой СВЧ-плазмы в стеллараторе "Сатурн".- Письма в ЖТФ, т.4 (1978) 294-297.
- 26а. Vojtsenya V.S., Voloshko A.Yu., Kravchin B.V. et al.. Effect of drift modes on currentfree plasma transport processes in a stellarator.- Nucl.Fusion, vol.19 (1979) 1039-1046.
- 27а. Vojtsenya V.S., Voloshko A.Yu., Solodovchenko S.I., Shtan' A.P.

Effect of fluctuating electric fields on superbanana diffusion of plasma in a stellarator.-Phys. Letts., vol.61A, (1977) 173-174.

- 28а. Войценыя В.С., Волошко А.Д., Солодовченко С.И. и др. Влияние переменных электрических полей на диффузию бесстолкновительной плазмы в стеллараторе "Сатурн", - Физ.Пла., т.3 (1977) II87-II92.
- 29а. Vojtsenya V.S., Voloshko A.Yu., Solodovchenko S.I., Shtan A.F. Effect of alternating electric field on diffusion of weakly collisional plasma in l=1 Vint-20 torsatron.- Nucl. Fusion, vol.21 (1981) 817-822.
- 30а. Войценыя В.С., Волошко А.Д., Солодовченко С.И. и др. Влияние параметров магнитных поверхностей на низкочастотные флуктуации плазмы.- Препринт ХФТИ 74-36, Харьков 1974, с.70-75.
- 31а. Войценыя В.С., Волошко А.Д., Солодовченко С.И., Штань А.Ф. Влияние ионной вязкости на стабилизацию широм дрейфово-диссипативной неустойчивости.- Письма в ЖТФ, т.26 (1977) 333-336.
- 32а. Vakaĵ A.S., Vojtsenya V.S., Voloshko A.Yu. et al. Drift-wave turbulence and its effect on the ion transport in toroidal traps.- Proc.8th IAEA Conf.on Plasma Phys.Controlled Nuclear Fusion, (Brussels 1980), Vienna 1981, vol.1, p.607-616.
- 33а. Войценыя В.С., Волошко А.Д., Солодовченко С.И., Штань А.Ф. Стабилизация дрейфовой неустойчивости плазмы в стеллараторе переменным электрическим полем вблизи частоты нижнегибридного резонанса.- Письма в ЖТФ, т.28 (1978) 365-368.

Л и т е р а т у р а

1. Расинович М.С., Экспериментальные исследования на стеллараторах. В сб. Итоги науки и техники, сер.Физика плазмы, т.2, с.6-79, М.1981.
2. Mizuuchi T., Motojima O., Besshow S. et al.- Experimental studies of the separatrix plasma in Heliotron-E.- J.Nucl.Mater., vol.121 (1984) 3-9.
3. Hothker K., Bieger W., Hartwig H. et al. Plasma-induced arcs in an RF-discharge.- J.Nucl.Mater., vol.93/94 (1980) 785-790.
4. Sethuraman S.K., Barrault M.R., Study of the motion of vacuum arcs in high magnetic field.- Ibid, p. 791-798.
5. Tuma D.T., Chen C.L., Davis D.K. Erosion products from the cathode spot region of a copper vacuum arc. J.Appl.Phys., vol.49 (1978) 3821-3831.

6. Симонов В.А., Швилкин Б.И., Кутуков Г.П. Получение чистой высокотемпературной плазмы в квазистационарных системах. Процессы, приводящие к поступлению примеси в плазму.- Nucl.Fus. Suppl., 1962, Pt.1, p.313-324.
7. Таблица I.12 в книге В.С.Войцены, С.К.Гужова, В.И.Титов. Воздействие низкотемпературной плазмы и электромагнитного излучения на материалы, М., Энергоатомиздат, 1991.
8. Назаров Н.И., Плюснин В.В., Ранник Т.Ю. и др. Оптимизация условий ВЧ-нагрева плазмы в тороиде "Ураган-3", - Физ.Пл., т.15 (1989) 1027-1034.
9. Базаева А.В., Быков В.Е., Георгиевский А.В. и др. Исследование конфигурации магнитного поля полоидального дивертора и магнитных поверхностей тороида "Ураган-3".- Промежуточный отчет по НИР № 78107, Харьков 1978, 60 с.
10. Matsunami N., Yamamura Y., Itikawa Y. et al., Energy dependence of the yields of ion - induced sputtering of mono-atomic solids.- ADNDT, vol.31 (1984) 1-80.
11. Войцены В.С. О роли примесных ионов в поступлении примесей в плазму термоядерных установок,- Физ.Пл., т.15 (1989) 12-23.
12. Полякова Г.Н., Ранник А.И. Извлечение распределений по скоростям возбужденных частиц из доплеровского уширения спектральных линий.- Препринт ХФТИ 81-1, Харьков 1981.
13. Мельников В.В., Смирнов Д.М. Измерение сечений возбуждения спектральных линий атома хрома электронным ударом.- Опт.и Спектроск., т.52 (1982), 605-608.
14. Vojtsenya V.S., Gribanov Yu.A., Dikij N.P. et al., Study of erosion of TiN coating in a hydrogen discharge with oscillating electrons.- J.Nucl.Mater., 176-177 (1990) 886-889.
15. Gruen D.M., Krauss A.R., Pellin M.J. Effect of monolayer coverages on substrate sputtering yields.- Rad.Eff., vol.89 (1985) 113-128.
16. Aladino F., Batistoni P., Mancuso S. Charged particle injection and fusion product escape in separatrix stellarators.- Proc. 18th Eur. Conf. Contr. Fus. Plasma Phys., Berlin 1991, Pt 2, p.117-120.
17. Smirnova M.S., Shishkin A.A. Influence of helical magnetic field satellite harmonics and of the radial electric field on charge particle motion in toratron.- Nucl. Fus., vol.32 (1992) 1139-1146.

18. Галеев А.А., Сагдеев Р.З. Неоклассическая теория диффузии.- В кн. Вопросы теории плазмы. М., 1978, вып.7, с.205-271.
19. Kovrizhnykh L.M. Neoclassical theory of transport processes in toroidal magnetic confinement systems, with emphasis on non-axisymmetric configuration (Review Paper).- Nucl. Fusion, vol.24, (1984), 821-936.
20. Dobrovolny M., Orefice A., Pozzoli R. Trapped-particle scattering by electrostatic turbulence in toroidal plasmas.- Nucl. Fusion, vol.13 (1973) 485-495.
21. Демирханов Р.А., Стотланд М.А., Хиль Ш.В. О превращении запертых заряженных частиц в пролетные под влиянием высокочастотного электрического поля.- ЖТФ, т.42 (1972) 1419-1422.
22. Кадомцев Б.Б., Погуце О.П., в кн.: Вопросы теории плазмы, Атомиздат, М., вып.5, 1967, с.209.
23. Chen Liu, Guzdar P.N., White R.B. et al. Theory of universal eigenmodes in a sheared magnetic field.- Phys. Rev. Letts., vol.41 (1978) 649-653.
24. Porkolab M. Parametric processes in magnetically confined CTR plasmas.- Nucl. Fusion, vol.18 (1978) 367-413.
25. Войцения В.С., Об использовании возобновляемых покрытий в термоядерных установках.- Физ. Плазмы, т.17 (1991) 229-248.

ПРИЛОЖЕНИЕ

Таблица I

ПАРАМЕТРЫ УСТАНОВОК,

на которых получены результаты, явившиеся основой диссертации

Установка	Большой радиус R_0 , см	Средн. радиус КЗМП G , см	Средний угол вращательного преобразован. $\iota(\alpha)$, рад.	Шир. волины КЗМП, $\theta(\alpha)$	Неоднородн. магнитного поля
Винт-20 (однозаходный торсатрон, 13 периодов)	31	6 - 10	$\approx \pi$	$\leq 0,6$	$\epsilon_t = 0,22$ $\epsilon_n = 0,6$ $\epsilon_t = 0,18$ $\epsilon_n = 0,4$
Сатурн (трехзаходн., 8 периодов) стеллаторн. режим	36	4 - 6,5	$\leq \pi$	$\leq 0,25$	$\epsilon_t \leq 0,15$
торсатронный режим	36	4	π	0,2	$\epsilon_n \approx 0,05$
Сириус (трехзаходн. стеллатор-рейстрек)	60	2,6	$\pi/2$	0,02	$\epsilon_t \approx 0,045$ $\epsilon_n \approx 0,05$
Ураган-2 (трехзаходн. стеллатор-рейстрек)	110	$\leq 6,8$	$\leq 1,5 \pi$	0,1	$\epsilon_t \approx 0,06$ $\epsilon_n \approx 0,15$
Ураган-3 (трехзаходн. торсатрон, 9 периодов)	100	8-II	$2/3 \pi$	0,1	$\epsilon_t = 0,12$ $\epsilon_n = 0,08$

Таблица 2

ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЛАЗМЫ
в установках стеллараторного типа
в ходе получения результатов, явившихся основой диссертации

Установка, способ созд. плазмы	$n_e(0), \text{см}^{-3}$	$T_e(0), \text{эВ}$	$T_1(0), \text{эВ}$	Режим по столкнов.	Примечание
Винт-20 (инжекция)	$< 10^{10}$	~ 5	10 - 20	бесстолкн.	Эксперименты по удержанию разреженной плазмы.
Винт-20 (ЭЦР-разряд)	$\leq 10^{11}$	~ 10	< 1	"плато"	Эксп. по выбиванию запертых частиц.
Сатурн (инжекция)	$< 10^{10}$	~ 5	10 - 40	бесстолкн. "плато"	Эксп. по удержанию плазмы и по выбиванию запертых частиц.
Сатурн (ЭЦР-разряд)	$\approx 10^{11}$	~ 10	< 1	"плато"	Эксп. по стабилизации дрейфовых колебаний. Измерен. распр. диверторных потоков на стенку.
Сириус (омическ. разряд)	$10^{12} - 10^{14}$	100-500	≤ 100	"Пифирш-Шлютер", "плато"	Средняя вероятн. дугообразования в местах выхода плазмы на стенку локализация мест наиболее сильной эрозии.
Ураган-2 (омическ. и ВЧ-разряды)	10^{13}	100-300	≤ 300	"плато"	Распред. диверт. потоков на стенк вакуумн. камеры, основные источн. механизмы генерации примесей, перенос примесей
Ураган-3 (ИЦР-разряд)	$10^{12} - 2 \cdot 10^{13}$	100-300	100-500	"плато"	Пространственное распределение диверторных потоков потенциал плазмы источники, поток и механизмы генерации примесей.

КАРАКТЕРИСТИКА ПЛАСТА

Лист № 1

В УСТАНОВЛЕННЫХ ГРАНИЦАХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ В КОДЕ ПОДРОБНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ РАБОТЫ, РАССМОТРЕНЫ ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ КАЧЕСТВА РАБОТЫ И РАБОТЫ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ РАБОТЫ

Порядковый номер	Наименование	Единица измерения	Значение	Значение	Значение	Значение	Значение	Значение	Значение
1	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
2	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
3	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
4	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
5	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
6	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
7	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
8	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
9	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10
10	Время на выполнение работ	ч.ч.	10	10	10	10	10	10	10

Подписано в печать 11.12.92. Формат 60x84/16. Offset.печать. Л.п.л. 3,5. Ч.-изд.л. 2,6. Тираж 120. Заказ № 718.

470257

Ab 26.686

AB 26.686