

Харьковский государственный университет

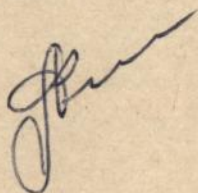
На правах рукописи

ФЕСЕНКО Анатолий Исаакович

УДК 533.9.082

**МЕТОД ВИРТУАЛЬНОГО КОЖУХА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
ГРАНИЦЫ ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ ПО ДАННЫМ  
МАГНИТНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

01.04.08 — физика и химия плазмы



Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Киев  
Институт кибернетики имени В. М. Глушкова АН Украины  
1994

48 29.323  
Работа выполнена в Институте кибернетики имени  
В. М. Глушкова АН Украины.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук  
КУЗНЕЦОВ Ю. К.,

Официальные оппоненты: член-корреспондент АН Украины,  
доктор физико-математических  
наук, профессор  
СТЕПАНОВ К. Н.,  
кандидат физико-математических  
наук СЕМЕНОВ И. Б.

Ведущая организация: Институт ядерных исследований  
АН Украины.

Защита состоится «08» 04 1994 г. в 15<sup>00</sup>  
часов на заседании специализированного совета Д 053.06.01  
при Харьковском государственном университете по адресу:  
310108 Харьков 108, проспект Курчатова, 31.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной  
библиотеке Харьковского государственного университета.

Автореферат рассмотрен 2 «чере» 1994 г.

ЛНБ України ім. В. Стефаника



00801464 (N)

Учений секретар  
спеціалізованого ради

*Азаренко*  
АЗАРЕНКОВ Н. А.

ЛНБ ім. В. Стефанька  
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы . В настоящее время наиболее значительные успехи в решении проблемы управляемого термоядерного синтеза достигнуты на установках тороидального магнитного удержания высокотемпературной плазмы типа токамак. Неотъемлемой и важной частью эксперимента на токамаках является наличие мощного диагностического комплекса, состоящего из многочисленных (около 50-ти) систем измерения параметров плазмы. Информация, поступающая по диагностическим каналам служит как для изучения физики протекающих процессов, так и для выбора оптимальных режимов работы токамаков. Особое место в измерительном комплексе занимает магнитная диагностика, в частности аппаратное и математическое обеспечение, предназначенное для определения положения и формы плазменного шнура в объеме вакуумной камеры. От качества реконструкции границы плазмы и вакуумной магнитной конфигурации существенно зависит точность и достоверность результатов работы значительного числа других диагностических систем, которые прямо или косвенно используют информацию о плазменной границе. К таким системам относятся, например, ВЧ и лазерная интерферометрия, рефлектометрия, рентгеновская томография, системы контроля и управления дивертором. Высокая точность определения границы плазмы необходима также для эффективной работы системы автоматической стабилизации положения и формы плазменного шнура в таких современных проектах, как ITER и CIT. Требования к точности реконструкции крайней магнитной поверхности на этих установках таковы, что применяемые в настоящее время методы (алгоритмы) не в состоянии обеспечить необходимое качество во всем диапазоне возможных в процессе разряда магнитных конфигураций. Особенно актуальна эта проблема для токамаков с адиабатическим

сжатием по большому радиусу (T-14, TFTR), в которых диапазон положений плазменного шнура особенно велик. Главной причиной ограничения применимости традиционных методов реконструкции границы плазмы заключается в том, что они в состоянии обеспечить требуемую точность только в относительно узком предварительно выбранном диапазоне магнитных конфигураций, вне которого качество определения крайней магнитной поверхности резко падает. Таким образом, весьма своевременным шагом была бы разработка более универсального метода, позволяющего восстанавливать границу плазмы на максимально широком множестве конфигураций без чрезмерно обременительного требования предварительной настройки алгоритма на тот или иной ожидаемый диапазон.

Этим обусловлена актуальность диссертации, которая посвящена разработке на основе принципа виртуального кожуха нового метода определения границы плазмы, лишенного, на наш взгляд, упомянутых выше недостатков применяемых в настоящее время алгоритмов.

#### Цель работы.

1. Разработка метода определения границы плазмы в токамаке - метода виртуального кожуха, - способного по данным магнитных измерений автоматически (без предварительной настройки) обеспечивать высокую, требуемую на современных токамаках (ITER, CIT, TFTR, T-14), точность в широком диапазоне квазистационарных плазменных конфигураций.

2. Численная реализация метода виртуального кожуха в виде компьютерной программы, практически пригодной для исследований на установках токамак.

3. Применение метода в вычислительных экспериментах для моделей токамаков ITER и T-14.

### Научная новизна.

1. Впервые для целей магнитной диагностики границы плазмы в токамаке применена модель виртуального кожуха, суть которой состоит в том, что носителем поверхностного тока, эквивалентного объемному току плазмы, является сама граница плазмы.

2. В отличие от известных линейных методик, использующих фиксированный носитель для моделирования тока плазмы, на с новой модели виртуального кожуха поставлена нелинейная краевая задача для однородного эллиптического уравнения с неизвестной (свободной) границей.

3. Разработан и успешно применен для решения вышеупомянутой краевой задачи со свободной границей метод, именуемый методом виртуального кожуха для определения границы плазмы в токамаке по данным внешних магнитных измерений.

4. Модель виртуального кожуха и основанный на этой модели метод виртуального кожуха впервые дали возможность восстанавливать границу плазмы с высокой точностью во всем диапазоне режимов токамака без предварительной настройки носителя под конфигурацию, близкую к восстанавливаемой.

5. В реальном эксперименте метод виртуального кожуха впервые дает возможность для самотестирования по критерию виртуального кожуха, т.е. по критерию полного экранирования магнитного поля внешних проводников в объеме плазмы поверхностным током на виртуальном носителе.

### Практическая ценность.

1. Разработана компьютерная программа R\_CODE (Reconstruction CODE), реализующая метод виртуального кожуха, пригодная для использования на любом современном токамаке с безжелезным индуктором

практически во всем диапазоне режимов, в том числе и для сильно отклоняющихся от запрограммированных (нештатные режимы).

2. Программа R\_CODE используется при проектировании и исследовании систем магнитной диагностики для установок ITER (ХФТИ, г. Харьков) и T-14 (ТРИНИТИ, г. Троицк).

3. В диссертации приведено подробное описание метода виртуального кожуха, достаточное для реализации аналогов программы R\_CODE на любом алгоритмическом языке на любой ЭВМ.

4. Метод позволяет в реальном эксперименте контролировать достоверность реконструкции границы плазменного шнура по критерию виртуального кожуха независимо от модельного численного тестирования.

На защиту выносятся следующие положения.

1. Метод виртуального кожуха для определения границы плазмы в токамаке по данным магнитных измерений, включающий в себя модель виртуального носителя, постановку краевой задачи со свободной границей, метод решения и численную реализацию.

2. Критерий практического контроля качества реконструкции границы плазмы - критерий виртуального кожуха.

Апробация работы. Результаты работы докладывались на Украинской конференции по УТС и плазменным процессам (Київ, 1992; Харьков, 1993), на Республиканском семинаре "Управление объектами с распределенными параметрами" (Київ, 1984, 1985, 1992, 1993), на Объединенном семинаре по вычислительной физике (Сухуми, 1985), на Всесоюзной конференции по физике управляемого термоядерного синтеза (Звенигород, 1984), на Всесоюзной конференции по диагностике высокотемпературной плазмы (Минск, 1990)

Публикации. По теме диссертации опубликовано 9 печатных работ.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, трёх глав, заключения и списка литературы (68 наименований). Она содержит 100 страниц, в том числе 22 рисунка, 2 таблицы и 6 страниц списка литературы.

#### СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ.

Во введении анализируется роль и место магнитной диагностики в общем диагностическом комплексе применительно к задаче определения границы плазмы на установках токамак. На основе этого анализа делается заключение о степени актуальности выбранной темы и формулируется основная цель исследования - разработка более универсального, чем существующие, алгоритма реконструкции крайней магнитной поверхности плазменного шнура, не использующего неформальную процедуру предварительного задания положения носителя. Освещены научная новизна и практическая ценность полученных результатов, а также описана структура диссертации.

В первой главе рассмотрены особенности и проблемы магнитной диагностики границы плазмы в современных токамаках с плазмой D-образного поперечного сечения и установках с адиабатическим скатием по большому радиусу. Перечислены основные математические постановки в терминах классических краевых задач математической физики. Сделан обзор существующих методов реконструкции границы плазмы. Отмечены положительные стороны и проведен критический анализ фактических ограничений для применяемых алгоритмов.

В разделе I.1 на примере токамака T-I4 с адиабатическим скатием по большому радиусу проведен анализ отрицательного влияния неравномерности и сильной асимметрии расположения магнитных датчиков на качество определения границы плазмы традиционными методами.

Особо отмечено, что большие перемещения шнура в процессе сжатия делают весьма проблематичным применение методов с фиксированным носителем тока, эквивалентного плазменному. В установках с D-образным профилем сечения аналогичные проблемы связаны с широким диапазоном конфигураций, свойственных различным стадиям разряда.

Раздел I.2 посвящен описанию математических постановок задачи магнитной диагностики в дифференциальной форме на основе уравнения Грэда-Шафранова с различными типами краевых условий. Показано, что задача реконструкции крайней магнитной поверхности относится к классу некорректных по Адамару задач математической физики. Приводятся доводы, стимулирующие пересмотр линейных математических постановок традиционных методов определения границы плазмы в сторону более общей нелинейной модели, при условии получения дополнительных преимуществ за счет возможности привлечения новой информации. Последняя исключительно важна, так как решение обратной задачи магнитной диагностики границы плазмы с применением вариационной схемы Тихонова А.Н. предполагает наличие физически интерпретируемого стабилизирующего члена в сглаживающем функционале регуляризирующего алгоритма.

В разделах I.3-I.5 кратко изложены три основных метода, наиболее часто применяемые в настоящее время для задачи реконструкции границы.

Раздел I.3 посвящен методу кольцевых токов. Отмечена простота его реализации и достаточно высокая точность, к сожалению, достигаемая только для конфигураций, на которые метод должен быть предварительно настроен. С точки зрения подходов, применяемых для решения обратных задач, метод кольцевых токов можно отнести к самому простому - методу подбора.

В I.4 проведен аналогичный I.3 анализ метода потенциала простого слоя. Данный метод так же, как и метод кольцевых токов использует вариационный подход при записи регуляризирующего алгоритма. Однако стабилизирующий функционал здесь, в отличие от I.3, поддается разумной интерпретации, что сразу отразилось на точности метода, его устойчивости к погрешностям во входных данных и более широком, в смысле возможных магнитных конфигураций, диапазоне применимости.

В I.5 рассмотрен метод разложения по гармоникам, широко применяемый для определения границы плазмы. Хотя этот метод и не использует понятия носителя эквивалентного тока, но предварительное задание положения начала координатной системы и выбор опорных функций требует априорного знания области возможного расположения плазменного шнура, что не всегда реально. Таким образом, данный метод наряду с методами, изложенными в разделах I.3 и I.4, использует неформальную процедуру предварительной настройки на восстанавливаемую конфигурацию, что является главным препятствием для его более эффективного применения в условиях требований современных проектов ITER и CIT.

Во второй главе, которую можно считать основной для понимания сути метода виртуального кожуха, последовательно приведено эвристическое изложение алгоритма, математическая континуальная постановка в виде системы нелинейных интегральных уравнений Фредгольма первого рода с ограничениями на подвижной границе, а также подробное описание конечномерной модели дискретизации задачи.

Раздел 2.1 посвящен описанию предлагаемой новой модели для решения задачи определения положения и формы плазмы в токамаке. Основным шагом, который делает метод виртуального кожуха радикально

отличным от известных методов, является отказ от фиксированного носителя эквивалентного тока и переход к носителю, совпадающему с самой искомой границей плазмы. Согласно принципу виртуального кожуха такая модель более адекватна по сравнению с моделями, использующими фиксированный носитель. Подвижный виртуальный носитель, вообще говоря, усложняет математическую постановку задачи и алгоритм её решения. Но выигрыш, который получается при этом, компенсирует возросшую сложность. Во-первых, метод полностью лишен главного недостатка предыдущих подходов, связанного с необходимостью предварительного неформального размещения носителя. Эта процедура здесь полностью формализована. Во-вторых, модель виртуального носителя позволяет, учитывая свойства виртуального кожуха, разумно выписать интерпретируемый стабилизирующий функционал для регуляризирующего алгоритма при использовании вариационной схемы Тихонова А.Н. с учетом требований гладкости распределения плотности поверхностного тока и его корреляции с кривизной контура носителя. В-третьих, для контроля достоверности результатов в описываемом методе может быть применен критерий виртуального кожуха, на основании которого магнитное поле внешних токов в объеме плазмы должно полностью компенсироваться полем тока на виртуальном кожухе. В известных методах отсутствует возможность такой независимой проверки. Но вполне допустимы случаи, когда неудачное размещение фиксированного носителя относительно фактического положения границы плазмы имитирует реконструкцию крайней магнитной поверхности, как следствие, с большой ошибкой, которую в реальном эксперименте невозможно обнаружить. Метод виртуального кожуха, таким образом, самостерируем. Однако, для достижения указанных преимуществ необходимо уметь решать обратную нелинейную задачу, некор-

ректную по Адамару, что в интегральном представлении осложняется ещё и сингулярностью ядра в малой окрестности точек поверхности носителя. Для решения этой задачи применялась специальная итерационная процедура с двухуровневой итеративной регуляризацией в пространстве функций поверхностной плотности тока и функций, описывающих контур сечения виртуального носителя.

В разделе 2.2 выписана континуальная постановка задачи определения положения и формы плазмы в интегральном представлении. Осуществлен переход от системы интегральных уравнений Фредгольма первого рода к вариационной задаче. Явно выписан стабилизатор, налагающий ограничения на гладкость распределения угловой плотности поверхностного тока и её производной. На примере зануления плотности тока в окрестности седловой точки сепаратрисы и скачка производной плотности тока в  $x$ -точке отмечена принципиальная разница вида стабилизатора для лимитерного и диверторного удержания.

Раздел 2.3 посвящен описанию численного алгоритма реализации метода виртуального кожуха. Первоначально выбирается конкретная дискретная модель и под неё переформулируется континуальная вариационная постановка, описанная в 2.2. Выписаны дискретные представления для интегралов с сингулярным ядром, которые не ухудшают аппроксимацию в непосредственной близости от носителя. Особое внимание уделено регуляризации в процедуре итеративной эволюции контура носителя, которая эквивалентна регулярным алгоритмам суммирования рядов Фурье и служит для фильтрации коротковолновой по углу малого азимута токамака помехи. Описан полуэмпирический подход вычисления величины параметра регуляризации в зависимости от уровня погрешности в данных.

В заключительной третьей главе приведены результаты вычислительного эксперимента, иллюстрирующие возможности алгоритма применительно к моделям токамаков ITER и T-14.

Раздел 3.1 посвящен краткому описанию прикладной программы R\_CODE, которая даёт возможность численно моделировать равновесные плазменные конфигурации и затем использовать имеющееся равновесие при формировании входных данных для задачи реконструкции границы плазмы. На рисунках приведены копии экрана компьютера с типичными результатами работы программы.

В разделе 3.2 представлены результаты численного моделирования, объясняющие алгоритм формирования контура носителя начального приближения. На рисунках поэтапно в двумерном и трёхмерном представлении показано, каким образом в методе виртуального кожуха формально решается проблема, которая в известных методах требовала неформального участия исследователя.

Раздел 3.3 содержит иллюстрации к процедуре итерационной смены носителей с последовательным приближением к почти идеальному виртуальному кожуху, что можно в трёхмерном представлении наблюдать на примере характерного плато функции магнитного потока в области, ограниченной крайней магнитной поверхностью.

В разделе 3.4 приведены примеры, иллюстрирующие работу метода при разном уровне шума и разных величинах параметра регуляризации.

#### ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. На основе принципа виртуального кожуха разработан метод реконструкции границы плазмы в установках токамак по данным внешних магнитных измерений - МЕТОД ВИРТУАЛЬНОГО КОЖУХА. Данный метод отличается от известных своей универсальностью. Он удовлетворяет

высоким требованиям проекта ITER, и не нуждается в предварительной настройке на магнитную конфигурацию, близкую к реконструируемой. Универсальность метода виртуального кожуха обусловлена тем, что задача реконструкции границы плазмы решается как краевая задача для эллиптического оператора со свободной границей, совпадающей с носителем эквивалентного тока.

2. На основе метода виртуального кожуха разработана компьютерная программа R\_CODE. Результаты были использованы в проекте ITER для обоснования выбора количества, типа и способа размещения датчиков магнитного поля.

3. Показано, что метод виртуального кожуха по своим возможностям вполне применим для систем автоматического управления формой и положением плазменного шнура в токамаках.

4. Предложено использование метода виртуального кожуха в качестве алгоритма, ориентированного на нештатные режимы в токамаках, т.е. на режимы, сильно отличающиеся от предварительно запрограммированных.

#### СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ РАБОТ

1. Система управления плазменными процессами в токамаке с пологим дивертором / В.Ф.Гициняк, В.Ф.Губарев, А.И.Фесенко и др. - Харьков; 1981. - 42 с. (Препр. ХФТИ; 81-4).
2. Дмитренко А.Г., Фесенко А.И. Об устойчивости продольного электрического тока в цилиндре вязкой жидкости в продольном магнитном поле // УФЖ. - 1983. - 28, № 8. - С. 1185-1191.
3. Дмитренко А.Г., Фесенко А.И. Спектр малых винтовых МГД-колебаний плазменного цилиндра в сильном продольном поле при учете вязкости // Физика плазмы. - 1984. - 10, № 6. - С.1204-1210.

4. Губарев В.Ф., Дмитренко А.Г., Фесенко А.И. Бифуркация равновесия плазменного цилиндра в стационарное винтовое течение с магнитными островами // Физика плазмы. - 1985. - 10, № 7. - С. 858-864.
5. Быстрый алгоритм восстановления параметров плазмы в токамаке по данным магнитных измерений. / В.Ф.Губарев, А.Г.Дмитренко, И.В.Кобржицкая, А.И.Фесенко // Распределенные и адаптивные системы управления. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН УССР, 1989. - С. 4-10.
6. Magnetic measurements for plasma control in ITER. Yu.K.Kuznetsov, A.O.Kaminskiy, V.P.Gubarev, A.G.Dmitrenko, I.V.Kobrzhit-ska, A.I.Fesenko // ITER-IL-PH-07-0-64 ITER Diagnostic Workshop, Garching, July 16-20, 1990. - P. 1-10.
7. Бондаренко С.П., Кузнецов Ю.К., А.И.Фесенко и др. Комплекс для магнитных измерений на токамаке Т-14.: Тез. докл. Всесоюз. совещ. по диагностике высокотемпературной плазмы. - Минск, 1990. - Изд-во БГУ, 1990. - С. 29-30.
8. Фесенко А.И. Обобщенный метод потенциала простого слоя в задачах диагностики плазмы токамака. // Системы управления техническими средствами. - Киев: Ин-т кибернетики им. В.М.Глушкова АН Украины, 1992. - С. 46-53.
9. Дмитренко А.Г., Кузнецов Ю.К., Фесенко А.И. Применение принципа виртуального кожуха для определения границы плазмы в токамаке по данным магнитных измерений // Физика плазмы.-1992.- 18, № 12.- С. 1515-1523.

Подп. в печ. 31.01.94. Формат 60×84/16. Бум. тип. № 2. Офс. печ. Усл. печ. л. 0,70. Усл. кр.-отт. 0,82. Уч.-изд. л. 1,0. Тираж 100 экз. Заказ 209.

Редакционно-издательский отдел с полиграфическим участком  
Института кибернетики имени В. М. Глушкова АН Украины  
252207 Киев 207, проспект Академика Глушкова, 40

AB 29.323