

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

А.Вон

ЗОЛОТУХИН АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

ФИЗИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ УДЕРЖАНИЯ ПЛАЗМЫ
В ТОРСАТРОНАХ С МАЛЫМ ЧИСЛОМ ПЕРИОДОВ МАГНИТНОГО ПОЛЯ

01.04.08 – физика и химия плазмы

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Харьков-1994

AB 29.450



00801552 (L)

дисертація являється рукописью.

Робота виконана в ННЦ "Харківський фізико-технічний інститут".

Научний керівник: доктор фізико-математических наук,
старший научний співробітник
Шішкін Александр Александрович.

Офіційні опоненти: доктор фізико-математических наук,
старший научний співробітник
Долгополов Валентин Викторович
(Національний научний центр
"Харківський фізико-технічний
інститут", г.Харків),
доктор фізико-математических наук,
старший научний співробітник
Ткаченко Виктор Иванович
(Харківський державний
університет, г.Харків).

Ведущая организация: Институт ядерных исследований
АН Украины (г.Киев)

Защита состоится "6" *мая* 1994 г. в 15⁰⁰ на

заседании специализированного совета Д 053.06.01 Харьковского
государственного университета (ЗІОІО8, г.Харків, пр.Курчатова
31, ауд.301).

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной
библиотеке ХГУ.

Автореферат разослан " " "
Ученый секретарь
специализированного совета
доктор физ.-мат. наук

1994 г.
ЛНБ ім. В. Стефаніка
АН України
Азаренков Н.А.

Л.М.А.С.

АВ - 29.750

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Экспериментальные стеллараторные исследования в последние годы вышли на рубеж плазменных параметров, при которых должны проявляться специфические стеллараторные особенности в удержании плазмы с параметрами, близкими к термоядерным. На стеллараторных установках сейчас оперируют с плазмой плотностью $n_e \approx 10^{13} + 3 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$, при температуре электронов $T_e \leq 3 \text{ кэВ}$, времени жизни энергии $\tau_E \leq 40 \text{ мс}$ при малом радиусе плазмы $a_p \approx 0.2 + 0.3 \text{ м}$, магнитном поле на оси $B_0 \leq 2.5 \text{ Т}$, большом радиусе $R = 1 + 2 \text{ м}$. В экспериментах получены значения параметра $\beta(0) = 4 + 5.8\% \left(\beta = \frac{8\pi n T}{B^2} \right)$, при которых существенно изменяются характеристики вакуумной конфигурации (угол вращательного преобразования, шир. свойства удельного объема). Достигнуты значения параметра столкновительности $\nu^* \approx 10^{-2} + 10^{-3}$, при котором наступают неклассические режимы переноса, в частности $D_1, \chi_1 \propto 1/\nu$, (здесь $\nu^* = \frac{\nu}{\nu_{Te}}$), т.е. с повышенным переносом по мере уменьшения частоты.

Сравнение экспериментальных результатов с предсказаниями теории в рамках одной установки стимулирует поиск способов изменения магнитной конфигурации, при которых менялись бы условия удержания высокотемпературной плазмы.

Фиксированная геометрия винтовых проводников в установках приводит к необходимости искать методы регулирования характеристик удержания с помощью изменения соотношения токов в обмотках винтового, вертикального и тороидального поля.

Вот почему исследование возможности изменения геометрии магнитного поля и влияния на удержание плазмы в рамках одной установки - торсатрона с малым числом периодов поля, к каким относится новая экспериментальная установка Ураган-2М, вступающая в строй в НИИ ХФИ, представляется актуальным.

Цель и задачи работы. Цель работ, составивших содержание диссертации, было:

- получить аналитическое выражение для ширины магнитного острова Δ_{MN} при конкретном резонансе $\iota = M/N$ (ι - угол вращательного преобразования) как функции соотношения токов в обмотках вертикального поля I_{p1}/I_h (I_{p1} - ток в ι -ой обмотке вертикального поля, I_h - ток в винтовой обмотке), чтобы найти "скры-

тые" дополнительные возможности борьбы с магнитными островами;

- ответить на вопрос, можно ли создать в тороидальном с малым числом m магнитную конфигурацию с заданными квадрупольными свойствами, как отразится квадрупольность на условиях равновесия и устойчивости плазмы; можно ли создать квадрупольную конфигурацию и в то же время реализовать условия пониженного переноса плазмы за счет подбора токов в обмотках тороидального поля;

- изучить, как влияют изменения магнитной конфигурации, которые отражаются в соответствующем изменении гармонического состава магнитного поля, на динамику примесных ионов.

Поставленные вопросы изучены на основе смешанного подхода: получение соответствующих аналитических выражений и последующая проверка выводов численными расчетами.

Научная новизна. В ходе выполнения работ диссертантом:

Получено аналитическое выражение, которое связывает амплитуду возмущения магнитного поля, входящую в формулу для ширины магнитного острова $\Delta_{MN} \propto [b_{MN} / (dI/dx^2)]^{1/2}$, где dI/dx^2 - шир, с соотношением токов I_{p1}/I_h . С помощью этого выражения получена система уравнений для нахождения токов I_{p1} ($i = 1, 2, 3, 4$), при которых амплитуды возмущений b_{MN} для ряда значений M и N стремятся к нулю (т.е. и $\Delta_{MN} \rightarrow 0$) (раздел 2.2.2). Численным интегрированием уравнений силовых линий магнитного поля подтверждено, что при найденных таким образом токах существенно подавляются магнитные острова при $i = 4/5$ и "передавливаются" острова при $i = 4/6$ (раздел 2.2.3). Этот результат показывает "работоспособность" развитого аналитического подхода.

Найдены аналитически соотношения токов I_{p1}/I_h , при которых реализуются квадрупольные конфигурации в тороидальном с малым m на примере Урагана-2М. Показано, что такие конфигурации имеют магнитные поверхности размером не меньше $22 + 24$ см; их можно комбинировать с усиленными или ослабленными гофрами магнитного поля; равновесие плазмы осуществляется при разных профилях угла вращательного преобразования $\iota(r)$ и удельного магнитного объема в конфигурациях с различными заданными квадрупольными свойствами (т.е. при вертикальной или горизонтальной вытянутости в среднем магнитных поверхностях).

Получены аналитические выражения для потока примесных ионов в рамках режима Пфирша-Шлютера с учетом основной винтовой гармоник и ближайших сателлитных гармоник (раздел 4.1.4), а

также при наличии магнитных островов (изолированного резонанса в магнитных поверхностях).

Научная и практическая значимость. Как итог проведенных исследований:

- развитый диссертантом аналитический подход практически позволяет найти соотношения токов в обмотках вертикального поля, при которых подавляются наиболее опасные резонансы в магнитных поверхностях в торсатроне с малым числом периодов поля;

- установлено, что в торсатронах с малым числом периодов поля возможна реализация квадрупольной магнитной конфигурации и возможно комбинирование квадрупольности конфигурации с пониженными или усиленными гофрами винтового поля;

- показано, что наличие резонансных возмущений, вызывающих неперекрывающиеся острова, не приводит к существенному изменению коэффициентов переноса примесей, а спутательные винтовые гармоники могут изменять коэффициенты переноса примесных ионов в 1.5-9 раз.

- показано, что влияние геометрии магнитного поля на перенос примесных ионов и равновесные токи можно наблюдать в экспериментах на торсатроне "Ураган-3М".

Основные результаты и положения, защищаемые автором.

1. Развита аналитическая методика с использованием закона Био-Савара, позволяющая описывать резонансные структуры (магнитные острова) и квадрупольные поля в торсатронах с малым числом периодов магнитного поля. Получена система уравнений для определения значений токов в обмотках вертикального поля торсатрона и найдены значения токов, при которых существенно уменьшаются магнитные острова при наиболее опасном резонансе $\iota = 4/5$ на периферии стандартной конфигурации "Урагана-2М" и вместо блуждающего хода силовой линии в окрестности резонанса ($\iota = 4/5$) возникает охватывающая его замкнутая магнитная поверхность.

2. На основе изложенного выше подхода найдены квадрупольные магнитные конфигурации, практически реализуемые в торсатроне с малым числом периодов поля за счет специального подбора токов в обмотках вертикального поля. Показано, что такие конфигурации существуют в сочетании с усиленными или ослабленными винтовыми гофрами, величина которых регулируется независимым подбором токов в обмотках тороидального поля.

3. Получено аналитическое выражение для потока примесей при учете в выражениях для магнитного поля и функции магнитных

поверхностей гармоник, ближайших к основной винтовой. Показано, что уменьшение геометрического фактора коэффициентов переноса примесей наблюдается в случае, когда Фурье-коэффициенты сателлитных гармоник в магнитном поле отрицательны по отношению к основной винтовой гармонике, т.е. при $\hat{\epsilon}_{1\pm 1}/\hat{\epsilon}_1 < 0$.

4. Показана возможность экспериментального наблюдения выше указанных эффектов в торсатроне с $l = 3$ - Ураган-3М. Сравнены магнитные конфигурации с приблизительно равными размерами крайней неразрушенной магнитной поверхности и одинаковыми профилями угла вращательного преобразования, но различающимися характером модуляции и гармоническим составом магнитного поля. Установлено, что имеет место относительное уменьшение равновесного тока и коэффициентов переноса примесных ионов в режиме Пфирша-Шлотера и плазмы в режиме малых частот соударений в случае вертикального поля $B_1/B_0 = -1.5\%$ (по сравнению с $B_1/B_0 = 0.5\%$) в 1.25 + 4 раз.

Достоверность результатов. Выводы, сделанные на основе приближенного аналитического подхода, подтверждены численными расчетами магнитных конфигураций, проведенными без упрощающих приближений, сделанных при выводе аналитических формул; физические выводы подтверждены в более поздних работах других авторов.

Полнота опубликования результатов диссертации. Результаты исследований по теме диссертации опубликованы в 10 печатных работах в ведущих отечественных и зарубежных изданиях. Их список приведен в конце автореферата. Основные результаты диссертационной работы неоднократно докладывались на научных семинарах ХФТИ, на Всесоюзной конференции по физике плазмы и УТС, Звенигород (1990), на I Украинской конференции по физике плазмы и УТС, Киев (1992), на Европейских конференциях по УТС и нагреву плазмы (Амстердам, 1990, Берлин, 1991), на Международной конференции МАГАТЭ (Вашингтон, 1990), на Международных совещаниях по стеллараторам (Харьков 1991, Гархинг 1993).

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, одного вспомогательного и трех разделов, содержащих основные результаты. Работа изложена на 126 страницах машинописного текста, содержит 30 рисунков, 7 таблиц и 70 наименований цитируемой литературы.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

ВВЕДЕНИЕ

В годы 1981-1985, предшествовавшие сооружению ныне действующих установок, когда определялись концепции этих установок, основное внимание уделялось регулированию удержания плазмы выбором параметров обмотки винтового поля (α_1 , R/a_n , m , где α_1 - I коэффициент модуляции в законе навивки винтовых проводников, a_n - малый радиус тора, на котором навиты проводники, m - число периодов магнитного поля), то после сооружения крупных современных стеллараторов ATF-1, Wendelstein-7 AS, SNS, Ураган-2М и начала работы на них акцент делается на такие методы регулировки, как параметры вертикального магнитного поля (соотношения дипольного и квадрупольного полей и т.д.).

В этой связи задачи, рассмотренные в диссертации, в значительной мере продиктованы потребностями экспериментальной программы на вступающей в строй в ХФТИ установке - торсатроне Ураган-2М. Новизна концепции установки Ураган-2М определяется тем, что винтовая обмотка имеет небольшое число периодов ($m = 4$). Это означает сравнительно небольшую неоднородность винтового магнитного поля, что должно приводить к пониженному переносу плазмы. С другой стороны, торсатрон с малым числом периодов поля ($m = 4$) порождает целый ряд вопросов, специфических для такой системы, и побуждает развивать соответствующие теоретические подходы.

I. Магнитная конфигурация торсатрона.

Как известно, существует несколько способов описания магнитного поля стелларатора и торсатрона: с помощью скалярного потенциала магнитного поля от винтовых токов в цилиндрических координатах [Морозов А.И., Соловьев Л.С. Вопросы теории плазмы, 1963, вып.2, с.3-91], в тороидальных координатах [Коврижных Л.М. ЖТФ, 1963, т.33, № 4, с.377-381], с использованием закона Био-Савара [Алексин В.Ф. ЖТФ, 1961, т.31, № II, с.1284-1288; Алексин В.Ф. Физика плазмы и пробл.упр.термоядер.синтеза, 1963, вып.3, с.216-224; Калужный В.Н., Немов В.В. Препринт ХФТИ АН УССР, ХФТИ 81-44, Харьков, 1981, 31 с]. В данной работе используется подход, основанный на применении закона Био-Савара. Поскольку при рассмотрении мы ограничимся описанием магнитного поля торсатрона, закон Био-Савара будем применять как для

описания поля от винтовых проводников, навитых на тороидальную поверхность, так и для кольцевых проводников, создающих компенсирующее вертикальное магнитное поле в торсатроне.

2. Регулирование резонансных структур (магнитных островов) в торсатронных конфигурациях.

2.1. Нарушение винтовой симметрии вызывает существенные изменения в магнитных полях и приводит к различным эффектам. К таким эффектам, в частности, относится возникновение цепочек магнитных островов на месте магнитных поверхностей с рациональными значениями угла вращательного преобразования $i = m/n$ (m, n - целые числа) [см. например, Соловьев Л.С., Шафранов В.Д. Вопросы теории плазмы, 1967, вып.5, с.3-208]. Магнитное поле, вызывающее расщепление выделенной рациональной магнитной поверхности на цепочку из n островов, содержит гармонику $n\psi - m\phi$, где ψ и ϕ - угловые переменные вдоль малого и большого обходов тора. Такое резонансное возмущение является следствием сложного взаимодействия различных гармоник по ψ и ϕ , содержащихся в спектре полей, создаваемых различными видами токовых обмоток (винтовыми, полоидальными и тороидальными), а также токами в плазме.

Суть используемого нами метода заключается в определении вкладов в возмущение магнитного поля с выделенной гармоникой, которые вносят различные токовые элементы. Среди таких элементов есть сравнительно легко поддающиеся регулировке, например, токи в полоидальных обмотках (их будем считать свободными параметрами) и трудно управляемые элементы, например, геометрия укладки винтового проводника, которые будем считать заданными. Наша задача - получить выражения, связывающие амплитуды возмущений для выделенных резонансов со свободными и заданными параметрами магнитной конфигурации. Обнаружению резонансов в конфигурации "Урагана-2М" и подавлению островов посвящен ряд работ [Н.Т.Беседин., Д.К.Кузнецов, И.М.Панкратов. ВАНТ. Сер.: Термоядерный синтез, 1987, т.3, с.18-20; Bykov V.E., Shishkin A.A., Kisslinger J., Rau F. Preprint of Max-Planck-Institut fur Plasmaphysik IPP 2/301, August 1989; V.E.Bykov, Ju.K.Kuznetsov, O.S.Pavlichenko et al. Extended Synopses of 13th Int. Conf. of Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research; Besedin N.T., Lesnyakov G.G., Pankratov I.M. XVIII Europ. Conf. on Contr. Fus. and Pl.Phys., Berlin, 1991, Topics B]. Тем не менее

поиск аналитического описания подавления магнитных островов сохраняет свою актуальность, поскольку в магнитной конфигурации реальной установки могут возникнуть дополнительные возмущающие факторы, связанные с неизбежными неточностями изготовления токовых элементов.

Как известно, для описания магнитных поверхностей с учетом островной структуры решается уравнение для Ψ в линеаризованном виде

$$\vec{B}^{(0)} \nabla \Psi^{(1)} = - \vec{B}^{(1)} \nabla \Psi^{(0)}, \quad (I)$$

где $\vec{B}^{(1)}$ - возмущающее магнитное поле, наложенное на основное поле $\vec{B}^{(0)}$ и приводящее к расщеплению магнитной поверхности, описываемой функцией $\Psi^{(0)}$, на изолированную цепочку островов. Вклады в возмущение магнитного поля вносят как винтовые, так и кольцевые обмотки.

При учете поля от кольцевых проводников правой части (I) можно придать вид

$$\begin{aligned} \vec{B}_p^{(1)} \nabla \Psi^{(0)} = & \sum_t \frac{0.4 I_t}{a_n^2} (-2) \varepsilon \left(\frac{r}{R} \right)^5 \frac{R_t}{R} \tilde{C}_{5,t} \sin(5\theta - 2m_n \varphi) + \\ & + \sum_t \frac{0.4 I_t}{a_n^2} (-2) \varepsilon \left(\frac{r}{R} \right)^6 \frac{R_t}{R} \tilde{C}_{6,t} \sin(6\theta - 2m_n \varphi) + \quad (2) \\ & \sum_t \frac{0.4 I_t}{a_n^2} (-2) \varepsilon \left(\frac{r}{R} \right)^7 \frac{R_t}{R} \tilde{C}_{7,t} \sin(7\theta - 2m_n \varphi). \end{aligned}$$

Коэффициенты $\tilde{C}_{k,1}$ зависят от параметров кольцевых обмоток (выражения (2.3) в тексте диссертации). Основной упор мы делаем на влияние кольцевых проводников на резонансные возмущения магнитной конфигурации, поскольку изменением токов в этих проводниках можно регулировать амплитуды возмущений, а, следовательно, и размер островных структур.

2.2. Минимизация возмущений магнитных поверхностей с $i = 4/7, 4/6, 4/5$ (магнитных островов) определяется как условие зануления амплитуд при гармониках $\sin(7\theta - 2m_n \varphi), \sin(6\theta - 2m_n \varphi), \sin(5\theta - 2m_n \varphi)$ в правой части уравнения (I). Система для нахождения регулирующих токов имеет вид

$$\sum_{k=1}^4 G_{t,k} I_k = 0, \quad (3)$$

где $G_{i,k} = \frac{R_k}{R} \tilde{C}_{i,k}$, $i = 5, 6, 7$. Величины $G_{i,k}$ различаются по величине и знаку. Следовательно, можно надеяться, что возможна минимизация возмущения для каждого выбранного резонанса.

Для проверки выводов и уточнения аналитического описания нами проведено численное интегрирование уравнений силовых линий магнитного поля. Показано, что

- на резонансной поверхности с $i = 4/6$ при переходе от неоптимизированного к оптимизированному варианту происходит перестройка островной структуры, так что узловые точки переходят в точки типа "центр" и наоборот; это означает "передавливание" данного возмущения;

- в отличие от неоптимизированного варианта, где резонансная поверхность с $i = 4/5$ разрушалась, оптимизированный вариант дает существенное уменьшение поперечных размеров островов с появлением внешней охватывающей магнитной поверхности.

3.0 возможности создания квадрупольной магнитной конфигурации в торсатронах с малым числом периодов поля.

Свойства равновесия плазмы в квадрупольной конфигурации.

Стремление получить магнитную конфигурацию с заданными квадрупольными свойствами в торсатроне связано с поиском дополнительных способов регулирования переноса и МГД-свойств удерживаемой плазмы.

Вопрос о возможности создания квадрупольной магнитной конфигурации в торсатронах с малым m (каким является "Ураган-2М") и о влиянии квадрупольности на равновесные свойства плазмы в такой системе оставался открытым.

3.1. Квадрупольная составляющая в компонентах магнитного поля торсатрона имеет вид

$$B_{qr} = B_q \bar{r} \sin 2\theta, \quad B_{q\theta} = B_q \bar{r} \cos 2\theta, \quad B_{q\phi} = 0, \quad (4)$$

где $B_q = B_{qn} + \sum_i B_{qi}$, B_{qn} создается током в винтовой обмотке,

B_{qi} - в i -ой обмотке вертикального поля.

Задавая различную величину отношения напряженностей квадрупольных полей от обмоток вертикального поля и обмоток винтового поля как параметр квадрупольности можно найти комбинации токов, при которых реализуются магнитные конфигурации с вертикальной или горизонтальной вытянутостью в среднем магнитных поверхностях.

Изменение квадрупольных свойств магнитной конфигурации в

торсастроне "Ураган-2М" может сочетаться с управлением величиной гофров магнитного поля. Такое управление может осуществляться путем рассогласования величин токов в соседних катушках тороидального поля (C.D.Beidler, J.Kisslinger, F.Rau, H.Wobig, A.A.Shishkin, VIII Stellarator Workshop, 1991, II-0-2, p.21). При этом форма и размеры магнитных поверхностей практически не меняются.

3.2. Свойства равновесия плазмы в приведенных выше квадрупольных конфигурациях изучались численно с помощью кода UMES. При этом использовалась модификация кода с закрепленной границей. Равновесные свойства конфигураций исследовались при изменении β в диапазоне $0 \leq \beta \leq 4\%$, где β - отношение газокINETического давления плазмы к магнитному.

Вычисления показали, что для торсастронов с малым числом периодов магнитного поля n квадрупольное поле оказывает сильное влияние на равновесные характеристики плазмы.

Из проведенного изучения следует, что:

- вакуумный профиль угла вращательного преобразования $\iota(r)$ меняются слабо для конфигураций QC (квазикруглые), VE (вертикально вытянутые) и HE (горизонтально вытянутые);

- однако с увеличением давления плазмы профиль ι изменяется в конфигурации VE совершенно иначе, чем в QC и HE. Профиль ι в конфигурации VE практически не имеет участков с отрицательным широм;

- в то же время, для конфигураций QC и HE рост β приводит к возникновению таких участков, и при β близком к 4% приблизительно на 80% радиуса плазмы угол вращательного преобразования имеет спадающий профиль;

- профиль магнитной ямы в конфигурации VE также имеет характерное отличие: отсутствуют участки с магнитным горбом.

4. Влияние магнитного поля торсастронов и резонансных магнитных возмущений на перенос примесных ионов.

4.1. Как известно [H.E.Mynick, T.K.Chu, A.H.Boozer. Phys. Rev. Lett., 1982, vol.48, No.5, p.322-325.], если в магнитном поле стеллараторной ловушки помимо основных тороидальной и винтовой гармоник с коэффициентами \mathcal{E}_t и \mathcal{E}_1 присутствуют также сателлитные гармоники с $\mathcal{E}_{1\pm 1}$, $\mathcal{E}_{1\pm 2}$..., то тороидальный дрейф заряженных частиц может усиливаться или ослабляться в зависимости от знака отношений $\mathcal{E}_{1\pm 1}/\mathcal{E}_1$, $\mathcal{E}_{1\pm 2}/\mathcal{E}_1$ Этот эффект проявляется в возможности регулирования равновесных

плазменных токов [А.А.Шихкин. ВАНТ. Серия: Термоядерный синтез 1987, вып.2, с.15-19.] и коэффициентов переноса в режиме тороидального дрейфа частиц, запертых на винтовых неоднородностях магнитного поля [Е.Д.Волков, В.А.Супруненко, А.А.Шихкин. Стелларатор.- Киев: Наукова думка, 1983, с.312.]. Аналогичного проявления подобного эффекта можно ожидать и при диффузии примесных ионов.

Поскольку целью данного раздела является обобщение геометрического фактора $\propto 1/l^2$, для описания переноса используется упрощенная система уравнений гидродинамики [например, P.H.Rutherford. Phys.Fluids, 1974, vol.17, No.9, p.1782-1784.]. Результаты экспериментов по инжекции примеси на торсатронах Heliotron-E, Ураган-3 и стеллараторе Wendelstein-VIIA указывают на то, что примесные ионы находятся в области сильностолкновительного режима (режим Пфирша-Шлутера): $\nu_{I1}/\nu_{PS} \approx 15+20$, где ν_{I1} - частота столкновений примесь-ион, $\nu_{PS} = \bar{V}_{TI} l / R$. Найденный поток примесных ионов, усредненный по магнитной поверхности, имеет вид:

$$\begin{aligned} \langle \Gamma_I \rangle = & - \frac{m_{I1} n_I}{e_I \tau_{I1} B_0^2} \left[\frac{1}{n_I e_I} \frac{\partial P_I}{\partial \bar{r}_0} - \frac{1}{n_I e_I} \frac{\partial P_I}{\partial \bar{r}_0} \right] \frac{1}{a} \times \\ & \times \left\{ 1 + \frac{2}{l(r_0)^2} - \frac{1}{l(r_0) m} A_1 + \frac{1}{m^2} A_2 - \right. \\ & - \frac{\hat{\epsilon}_{1-1}}{\epsilon_1} \bar{r}_0 \alpha \alpha \left[\frac{1}{l(r_0)} A_3 + \frac{1}{m} A_4 \right] + \\ & \left. + \frac{\hat{\epsilon}_{1+1}}{\epsilon_1} \bar{r}_0 \alpha \alpha \left[\frac{1}{l(r_0)} A_5 - \frac{1}{m} A_6 \right] \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

Коэффициенты $A_1 - A_6$ выражаются через показатель распределения давления по магнитным поверхностям n и "волновое" число l , характеризующее периодичность магнитного поля по малому обходу тора. Величина $\bar{r}_0 \alpha \alpha = \bar{r}_0 \sin \theta / (Rl)$, входящая в (5), - тангенс угла наклона силовой линии магнитного поля к образующей тора на магнитной поверхности со средним радиусом \bar{r}_0 . В (5) введены величины $\hat{\epsilon}_{1-1}$, $\hat{\epsilon}_{1+1}$ характеризуют Фурье-коэффициенты разложения $|\vec{B}|$ вдоль силовой линии на магнитной поверхности с радиусом \bar{r}_0 .

Анализ выражения (5) позволяет сделать следующие выводы:

- спутниковые гармоники позволяют регулировать коэффициент диффузии примесных ионов путем выбора соответствующих знаков у отношений $\hat{\epsilon}_{1+1}/\hat{\epsilon}_1$. Влияние спутников может быть достаточно сильным. В случае ATF-1 и Heliotron-E наблюдается уменьшение геометрического фактора D (напомним, что D - полный геометрический фактор, т.е. выражение, заключенное в фигурных скобках в (5)).

- уменьшение D имеет место в случае, когда $\hat{\epsilon}_{1+1}/\hat{\epsilon}_1 < 0$ и тем заметнее, чем больше $\hat{\epsilon}_{1+1}$. Этот эффект наблюдается для торсатронов ATF-1 и Heliotron-E.

- для торсатрона Ураган-3М происходит увеличение фактора D , поскольку амплитуды $\hat{\epsilon}_{1-1}$ и $\hat{\epsilon}_{1+1}$ имеют тот же знак, что и $\hat{\epsilon}_1$.

4.2. Известно, что возмущение магнитного поля, имеющее винтовую структуру (т.е. $\propto \cos(N\phi - M\psi)$) приводит к возникновению в выражениях для равновесного тока $J_{||}$, потока основной плазмы $\langle \pi v \rangle$ и т.д. знаменателя типа $N \iota(r) - M$. Следовательно, на рациональной магнитной поверхности (там, где $\iota(r_{NM}) = \frac{M}{N}$) равновесный ток и диффузионный поток обращаются в бесконечность.

Перенормируя потоковую функцию магнитных поверхностей [Соловьев Л.С., Шафранов В.Д. Вопросы теории плазмы, 1967, вып.5, с.3-208.], можно "сконструировать" новую функцию Φ^* такую, что $\partial \Phi^* / \partial r \Big|_{r=r_{res}} = 0$. Перенормированная функция описывает расщепление резонансной поверхности с образованием на ее месте изолированной цепочки магнитных островов. При этом выделенный резонанс не появляется в качестве знаменателя в выражениях для $J_{||}$ и потока основной плазмы. Выражение для диффузионного потока примесных ионов также свободно от резонансного знаменателя и выражение в фигурных скобках в формуле (5) имеет вид

$$1 + \frac{2}{\iota^2(r_{NM})} - O(\epsilon_1) \frac{A_1}{I_{2/3}^{(1)}} + O(b_N) \frac{A_N}{I_{2/3}^{(1)}} \quad (6)$$

Коэффициенты A_1 , A_N выражаются через амплитуды основного винтового поля ϵ_1 и возмущения b_N и интегралы от тригонометрических функций. Подытоживая, можно сказать

- используемая процедура перенормировки позволяет, в принципе, избавиться от любого числа выделенных изолированных резонансов в выражениях для $J_{||}$, $\langle \pi v \rangle$, $\langle \Gamma_I \rangle$.

4.3. Проанализированы некоторые возможности регулирования удерживающих свойств плазмы в рамках одной установки на примере

Заключение.

1. Развита аналитический подход с использованием закона Био-Савара, позволяющий описывать резонансные структуры (магнитные острова) с малыми "волновыми" числами и квадрупольные поля в торсатронах с малым числом периодов магнитного поля. Получены аналитические выражения, связывающие амплитуду возмущающего поля (резонансного, квадрупольного) с геометрическими характеристиками и значениями токов в обмотках винтового и вертикального поля. Получена система уравнений для определения значений токов в обмотках вертикального поля торсатрона и найдены значения токов, при которых существенно уменьшаются магнитные острова при наиболее опасном резонансе $\iota = 4/5$ на периферии стандартной конфигурации "Урагана-2М" и вместо блуждающего хода силовой линии в окрестности резонанса ($\iota=4/5$) возникает охватывающая его замкнутая магнитная поверхность.

2. На основе изложенного выше подхода найдены квадрупольные магнитные конфигурации, практически реализуемые в торсатроне с малым числом периодов поля за счет специального подбора токов в обмотках вертикального поля. Они характеризуются достаточно большим размером крайней неразрушенной магнитной поверхности ($\alpha_{p1} \geq 0.5 \alpha_h$) и углом вращательного преобразования в объеме удержания $\iota(r) \leq 0.5$. Показано, что такие конфигурации существуют в сочетании с усиленными или ослабленными винтовыми гофрами, величина которых регулируется независимым подбором токов в обмотках тороидального поля.

Для торсатронов с малым m варьирование квадрупольной составляющей магнитного поля, производимое изменением тока в катушках вертикального поля, является эффективным средством изменения равновесия плазмы:

- для конфигурации с вертикально вытянутыми поверхностями профиль вращательного преобразования не имеет участков с отрицательным широм при изменении давления в широких пределах ($\beta \leq 4\%$);

- при изменении давления в диапазоне $\beta \leq 4\%$ конфигурация с вертикально вытянутыми поверхностями не имеет участков с магнитным горбом в отличие от горизонтально вытянутых или круглых поверхностей;

- смещение магнитной оси под действием β слабо зависит от квадрупольности магнитной конфигурации.

3. Изучено влияние спектра гармоник магнитного поля, характерного для торсатронных систем, на свойства переноса примесных ионов. При использовании упрощенной системы уравнений магнитогидродинамики, получено аналитическое выражение для потока примесей при учете в выражениях для магнитного поля и функции магнитных поверхностей гармоник, ближайших к основной винтовой. Показано, что уменьшение геометрического фактора коэффициентов переноса примесей наблюдается в случае, когда Фурье-коэффициенты спутников гармоник отрицательны по отношению к основной винтовой гармонике, т.е. при $\hat{\epsilon}_{1\pm 1} / \hat{\epsilon}_1 < 0$.

На основе аналогичного подхода исследовано влияние резонансных возмущений, характерных для периферии магнитной конфигурации, на перенос примесных ионов. Получено выражение для потока примесных ионов, свободное от резонансного знаменателя $N(\tau) - M$. Показано, что геометрический фактор коэффициента диффузии примесных ионов наряду с общепринятым фактором $1 + 2/\nu^2(r_0)$ дополняется членами, пропорциональными амплитудам основного винтового поля $\hat{\epsilon}_1$ и винтового возмущения $\hat{\epsilon}_N$.

4. При использовании установленных выше зависимостей свойств переноса от геометрии магнитной конфигурации, изучена возможность экспериментального наблюдения этих эффектов в торсатроне с $l = 3$ - Ураган-3М. Сравнены магнитные конфигурации с приблизительно равными размерами крайней неразрушенной магнитной поверхности и одинаковыми профилями угла вращательного преобразования, но различающимися характером модуляции и гармоническим составом магнитного поля. Установлено, что

- имеет место относительное уменьшение геометрических факторов равновесного тока и коэффициентов переноса примесных ионов в режиме Пфирша-Шлутера и плазмы в режиме малых частот соударений в случае вертикального поля $B_1/B_0 = -1.5\%$ (по сравнению с $B_1/B_0 = 0.5\%$) в $1.5 + 9$ раз;

- при изменении вертикального поля от 0.5% до -1.5% градиент давления увеличивается в ≤ 1.4 раза;

- конечным эффектом от изменения вертикального магнитного поля ($0.5\% \rightarrow -1.5\%$) является уменьшение равновесных токов и потоков супербананового и примесных ионов в режиме Пфирша-Шлутера в $\approx 1.25 + 4$ раза.

Публикации с изложением основных результатов

I. Zolotukhin A.V., Shishkin A.A. Suppression of Magnetic Is-

- lands in Torsatron. - 8th Intern. Stellarator Workshop, Kharkov, 1991, IV-P-2. Collection of papers IAEA, Vienna, July, 1991, p.93-96.
2. Zolotukhin A.V., Shishkin A.A. Magnetic Island Suppression in Torsatron Configurations. Preprint KhPTI, KFTI 91-47, Kharkov, 1991.
3. Shishkin A.A., Watanabe K.Y., Yamazaki K., Motojima O., Grekov D.L., Smirnova M.S., Zolotukhin A.V.. Some Features of Particle Orbit Behavior in LHD Configurations.- Preprint National Institute for Fusion Science, NIFS-211, 1993.
4. Греков Д.Л., Золотухин А.В. Исследование квадрупольных магнитных конфигураций в торсатроне с малым числом периодов поля.- Письма в ЖТФ, 1993, т.19, вып.22, стр.69-73.
5. Beidler C.D., Besedin N.T., Bykov V.E., Carreras B.A., Dominguez N., Grekov D.L., Kisslinger J., Khodyachikh A.V., Kuznetsov Yu.K., Lesnyakov G.G., Lynch V.E., Pankratov I.M., Pavlichenko O.S., Peletminskaya V.G., Pustovitov V.D., Rau F., Shishkin A.A., Sidorenko I.N., Smirnova M.S., Tolliver J.S., Zolotukhin A.V.. Physios Studies for the Uragan-2M Torsatron.- 13th Intern. Conf. Plasma Physios and Contr.Nucl. Fusion Research, Washington, 1990, IAEA-CN-53/C-IV-6, vol.2, p.663-675.
6. Carreras B.A., Dominguez N., Lynch V.E., Beidler C.D., Kisslinger J., Rau F., Wobig H., Grekov D.L., Zolotukhin A.V., Pavlichenko O.S., Shishkin A.A. Plasma Stability, Equilibrium and Transport in Uragan-2M Torsatron.- 18th Europ.Conf. on Contr.Fus. and Plasma Physios, Berlin, 1991, vol.15C, part II, p.149-152.
7. Золотухин А.В., ШИШКИН А.А. О диффузии примесных ионов в стеллараторных ловушках. Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Термоядерный синтез, 1988. вып.3., с.49-52.
8. Золотухин А.В., ШИШКИН А.А. Резонансные явления в равновесных тока и переносе плазмы в стеллараторах.- Препринт ХФТИ АН УССР, ХФТИ 89-17, Москва-ЦНИИатоминформ-1989.
9. Bykov V.E., Volkov E.D., Zolotukhin A.V., Pavlichenko O.S., Khodyachikh A.V., Shishkin A.A. Some Aspects of Plasma Confinement in the Uragan-3M Torsatron.- Preprint KFTI 90-44 Kharkov, KFTI, 1990, 16 p.
10. Grekov D.L., Zolotukhin A.V., Shishkin A.A. Impurity Flux Reversal in 1=2 Torsatrons Using RF Heating.- 17th Europ.Conf. on Contr. Fusion and Plasma Heating, Amsterdam, 1990, vol.14 B, part II, p.529-532.

**ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України**

Подписано в печать 28.12.93. Формат 60x84/16. Офсетн. печать.
Усл.п.л. 1,2. Уч.-изд.л. 1,0. Тираж 80. Заказ № 6.

Харьков-108, ротاپронт ННЦ ХФТИ

461047

AB 29.450

AB 29.450