

УДК 533.9

Р.Г.Левин (6 курс, каф. ФП) Н.В. Сахаров к.ф.-м.н., с.н.с. (ФТИ им.Иоффе)

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ РАВНОВЕСНЫХ МАГНИТНЫХ КОНФИГУРАЦИЙ В ТОКАМАКЕ С МАЛЫМ АСПЕКТНЫМ ОТНОШЕНИЕМ ГЛОБУС-М

Работа выполнена на сферическом токамаке — токамаке с малым аспектным отношением Глобус-М. Большой радиус $R=0.37\text{м}$, малый радиус $a=0.25\text{м}$, аспектное отношение $A=R/a=1.5$, ток по плазме $I_p=0.5\text{МА}$, тороидальное магнитное поле $B_t=0.6\text{Тл}$.

Электромагнитная система токамака Глобус-М спроектирована по классической схеме, когда все обмотки расположены вне вакуумной камеры. Основными задачами электромагнитной системы токамака Глобус-М являются: генерация тороидального и полоидального магнитных полей; генерация тока по плазме; управление равновесием плазмы; создания конфигураций магнитных полей, благоприятных для пробоя; создание конфигурации магнитного поля с X-точкой.

Магнитная система полоидального поля состоит из девяти пар обмоток. Данные обмотки разбиты на три функциональные группы — обмотки компенсации рассеянного поля соленоида (CC), “медленные” (PF) и “быстрые” (VFC, HFC) обмотки управления положением и формой плазменного шнура. При этом быстрые обмотки включены в систему обратных связей токамака. Магнитная система тороидального поля состоит из 16 одновитковых D-образных катушек, соединенных последовательно. Центральный соленоид установки Глобус-М выполнен в виде двухслойной катушки, общая высота составляет 1.3 м.

Вакуумная камера объемом 1.1 м^3 представляет собой цельносварную конструкцию из нержавеющей стали, оборудованную патрубками для диагностики ввода дополнительного нагрева плазмы. Конструкция сварена из внутреннего цилиндра толщиной 2 мм, двух полусфер толщиной 3 мм и толстого наружного кольца толщиной 14 мм.

Данная работа посвящена проблемам исследования равновесной плазмы в условиях принципиально новой геометрии — в условиях малого аспектного отношения. Произведено соответствие между измерениями, произведенными комплексом магнитной диагностики и средними плазменными параметрами.

Обеспечена измерительная схема для комплекса магнитной диагностики. Разработана и выполнена диагностика измерения тороидального потока плазмы магнитной петлей, расположенной в полоидальном направлении. В измерительную схему входит компенсация вакуумного тороидального поля, полоидального тока по камере, системы полоидального магнитного поля и центрального соленоида. Данная измерительная система позволяет измерять тороидальный плазменный поток с точностью, которая на 4...5 порядков меньше исходного сигнала.

Для реконструкции равновесия плазмы в токамаке в токамаке Глобус-М используется код EFIT [1]. Данный код обеспечивает возможность расчета равновесия в режимах с фиксированной границей и заданных токов, и реконструкции по измерениям комплекса магнитной диагностики. При обработке данных последней серии экспериментов для реконструкции равновесия использовались:

- I. 21 двухкомпонентный зонд для измерения полоидального магнитного поля
- II. Две магнитные петли для измерения полоидального потока
- III. Два пояса Роговского для измерения токов по плазме и вакуумной камере
- IV. Диамагнитная петля.

Последняя серия экспериментов происходила в новых условиях. В центральном соленоиде использовалась так называемая схема перемангничивания. Ток в соленоиде

поднимается до 60 кА, в момент максимума тока происходит пробой, а затем ток опускается до -40кА. При этом, для компенсации рассеянного поля соленоида используются обмотки СС и обмотка PF1. Как показали расчеты по коду EFIT, обмоток СС достаточно для получения пробоя газа, но возникают проблемы с подхватом тока по плазме (равновесием). Для управления равновесием запитывается обмотка PF1. Для управления плазмой по большому радиусу используются медленная обмотка PF3 и быстрая обмотка VFC. Для управления по вертикали используется быстрая обмотка HFC. Тороидальное поле на оси камеры $B_T=0.54$ Тл. Так же в разрядах использовались один или два импульса газонапуска. В качестве газа использовался водород. Данная схема эксперимента позволила поднять ток по плазме до уровня 270 кА, после выполненной боронизации ток плазмы до уровня 358 кА.

Реконструкция равновесия производилась в широком диапазоне плазменных параметров: ток по плазме $I_p=150...350$ кА, концентрация $n=(1...7)\cdot 10^{13}$ см⁻³. Данный диапазон позволяет решить целый комплекс задач:

1. Рекомендации по комплекту магнитной диагностики. Код EFIT построен на реконструкции распределения полоидального магнитного потока (решении уравнения Грэда-Шафранова). В связи с этим, для реконструкции равновесия наибольшее предпочтение имеют магнитные петли для измерения полоидального магнитного потока. Измерения же полоидального магнитного потока являются косвенными. Так же, одной из проблем при реконструкции равновесия является аппроксимация распределения тока по вакуумной камере. Магнитные петли имеют предпочтение в этой ситуации.

2. Ограничения по использованию кодов, базирующихся на представлении о равновесии плазмы. К таким ограничениям относятся ток по плазме, соотношение между током по плазме и вакуумной камере, энергосодержание плазмы, вытянутость плазмы, наличие МГД-неустойчивостей плазмы. Первые два критерия очень важны для цифрового управления формой внешней магнитной поверхностью плазменного шнура, которое будет использоваться на токамаке Глобус-М.

3. Реконструкция показала, что плазменный шнур имеет очень большую контактную поверхность с камерой, что приводит к загрязнению плазмы. Данный факт выражается в остановке роста тока по плазме при достаточно большом напряжении на тороидальном обходе токамака. Данная проблема может быть решена только с помощью управления формой внешней магнитной поверхностью плазмы.

В результате измерений были установлены и другие недостатки зондов измерения полоидального поля. Такими недостатками является чувствительность к акустическим колебаниям вакуумной камеры. Эти колебания приводят к изменению угла между измерительным и тороидальным направлением, что приводит к смещению компенсации тороидального поля.

В результате реконструкции равновесия плазмы в токамаке Глобус-М были получены временные диаграммы основных плазменных параметров, измеряемых магнитной диагностикой. К таким диаграммам относятся: профили давления, плотности тока и запаса устойчивости; геометрические характеристики границы плазмы (вытянутость, треугольность, большой и малый радиус), средние характеристики плазмы (внутренняя индуктивность i_i , продольное полоидальное бета $\beta_{p||}$, поперечное (диамагнитное) полоидальное бета $\beta_{p\perp}$, продольное и поперечное энергосодержание плазмы $W_{p||}$, $W_{p\perp}$). Таким образом, была произведена оценка энергетического времени жизни τ_E .

По измерениям, произведенным во время эксперимента, получены равновесные магнитные конфигурации. Реконструкция показала, что в установке Глобус-М плазма имеет вытянутость 1.1...2.0, треугольность 0.1...0.4, полоидальное бета в омическом режиме <0.3 , аспектное отношение 1.5...1.6, энергетическое время жизни $\tau_E=3$ мс, в камере присутствуют две X-точки. Расчетные магнитные поверхности сопоставлены с соответствующими плазменными фотографиями, что показало хорошую точность реконструкции магнитных поверхностей.

ЛИТЕРАТУРА:

1. L.L. Lao et al. Reconstruction of current profile parameters and plasma shapes in tokamaks // Nuclear Fusion, Vol 25, No.11(1985)