

04

Возможность определения смещения плазменного шнура в токамаке по измерениям профиля электрического потенциала на границе плазмы

© Г.И. Абдуллина, Л.Г. Аскинази, А.А. Белокуров, Н.А. Жубр,
В.А. Корнев, С.В. Лебедев, А.С. Тукачинский

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: leonid.askinazi@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 4 августа 2015 г.

Представлена методика определения положения плазменного шнура, основанная на определении положения крайней замкнутой магнитной поверхности по максимуму профиля электростатического потенциала, представляющая собой альтернативу измерениям с помощью магнитной диагностики. На токамаке ТУМАН-3М проведены эксперименты, в результате которых была продемонстрирована работоспособность предложенной методики, а также построена калибровочная зависимость для уточнения показаний магнитной диагностики, определяющей положение плазмы. Предложенная методика может применяться как на лимитерных, так и на диверторных токамаках для независимой проверки и уточнения показаний электромагнитной диагностики положения плазменного шнура.

Смещение плазменного шнура в камере токамака — одна из важнейших характеристик плазменного разряда. С одной стороны, от смещения напрямую зависят большой и малый радиус плазмы R и a , а значит и объем плазмы, и аспектное отношение R/a . С другой стороны, в лимитерном токамаке с круглым сечением смещение границы плазмы (крайней замкнутой магнитной поверхности — КЗМП, по английской терминологии Last Closed Flux Surface — LCFS) определяет положение точки контакта плазмы с материальными элементами. При неправильном измерении смещения шнура вдоль большого радиуса тора может сложиться ситуация, при которой положение КЗМП будет определяться контактом плазмы не с лимитером (обычно устанавливаемым на стороне слабого магнитного поля и имеющим поверхность, устойчивую к

потокам тепла и частиц), а с внутренней стенкой токамака, в результате чего может увеличиваться поступление примесей.

Описываемые в статье исследования проводились на лимитерном токамаке ТУМАН-3М [1]. В недавних экспериментах по инжекционному нагреву плазмы было обнаружено заметное влияние положения плазменного шнура на эффективность инжекции атомарного пучка, в частности на интенсивность нейтронного потока [2]. Это влияние обусловлено ростом электронной температуры при сдвиге шнура внутрь, что ведет к увеличению времени термализации быстрых ионов и росту популяции быстрых ионов в плазме. Как интенсивность потока 2.45 MeV $d-d$ -нейтронов (генерируемых в результате взаимодействия быстрых ионов с ионами плазмы), так и время спада нейтронного потока после отключения импульса нагрева достигают максимума, если шнур смещен на ~ 2.5 см внутрь относительно центра вакуумной камеры [2,3]. В численных расчетах обнаруживается зависимость эффективности захвата быстрых ионов при ионизации атомарного нагревного пучка от прицельного параметра, также изменяющегося при смещении плазменного шнура [4]. Этот эффект объясняется влиянием положения точки ионизации на форму дрейфовой траектории и, следовательно, на вероятность потери быстрого иона при движении вдоль первой дрейфовой орбиты.

Таким образом, имеется необходимость точного определения положения плазменного шнура в токамаке. Общепринятым для измерения положения и формы КЗМП в экспериментах на токамаках является метод, основанный на измерениях магнитного потока и его градиента снаружи от плазменного шнура (обычно снаружи вакуумной камеры) и вычислении на основе этих измерений положения и формы крайней замкнутой магнитной поверхности [5,6]. Положение и форма КЗМП в этом случае — результат расчета. Погрешности в работе данной диагностики могут быть связаны с влиянием токов, протекающих по стенкам разрядной камеры (особенно важным в компактных токамаках), дрейфом параметров электронных систем и др. Поэтому актуальным является поиск методов проверки и уточнения измерений смещения с использованием независимых прямых измерений.

В данной работе предложен дополнительный, по отношению к магнитным измерениям, метод непосредственного определения положения КЗМП по измерениям потенциала в периферийной плазме, а также представлены результаты его экспериментального исследования на

токамаке ТУМАН-3М. Радиальный профиль электрического потенциала на краю плазмы не монотонен и имеет максимум вблизи КЗМП. Это объясняется различным характером переноса заряженных частиц в области замкнутых магнитных поверхностей (т.е. внутри КЗМП) и в области разомкнутых магнитных поверхностей (снаружи от КЗМП). В первой области потери частиц (и тепла) из плазмы происходят в результате поперечного (диффузионного) переноса, растекание вещества и тепла вдоль силовых линий приводит лишь к выравниванию давления на магнитной поверхности. При этом для обеспечения равенства потоков положительных ионов и электронов в плазме генерируется отрицательное (направленное внутрь) радиальное электрическое поле E_r . В области тени лимитера (снаружи от КЗМП) картина переноса существенно меняется: интенсивные потери электронов вдоль силовых линий на поверхность лимитера приводят к генерации положительного E_r . Точка перемены знака электрического поля обычно расположена вблизи КЗМП. Отметим, что в случае токамака с дивертором качественно картина сохраняется: при переходе из области замкнутых магнитных поверхностей в SOL (Scrape-off layer, область диверторной плазмы) E_r меняет знак с отрицательного на положительный и точка перемены знака расположена вблизи магнитной сепаратрисы. Такое поведение наблюдалось в экспериментах по измерению E_r на периферии плазмы в диверторном токамаке ASDEX Upgrade, подтвержденных численным расчетом на основе неоклассической модели, где было обнаружено, в частности, что точка перемены знака E_r действительно находится вблизи КЗМП [7].

Таким образом, измеряя профиль радиального электрического поля $E_r(r)$ или профиль потенциала $\phi(r)$ и определяя положение точки, в которой $d\phi(r)/dr = 0$ или $E_r = 0$, можно определить положение КЗМП.

На токамаке ТУМАН-3М равновесие плазменного шнура по горизонтали обеспечивается с помощью управляющего вертикального магнитного поля, величина которого в реальном времени изменяется с помощью системы управления смещением с обратной связью на основе сигналов магнитных датчиков. Камера токамака имеет размеры $R_0 = 0.55$ м и $a = 0.25$ м и оборудована лимитером, установленным в области наружного обхода и имеющим глубину тени $L = 40$ мм (рис. 1). Система управления смещением шнура задает положение центра КЗМП R_{0p} по отношению к центру полоидального сечения камеры R_0 . Если $R_{0p} < R_0 - 0.5L$, плазменный шнур прижат к внутренней стенке

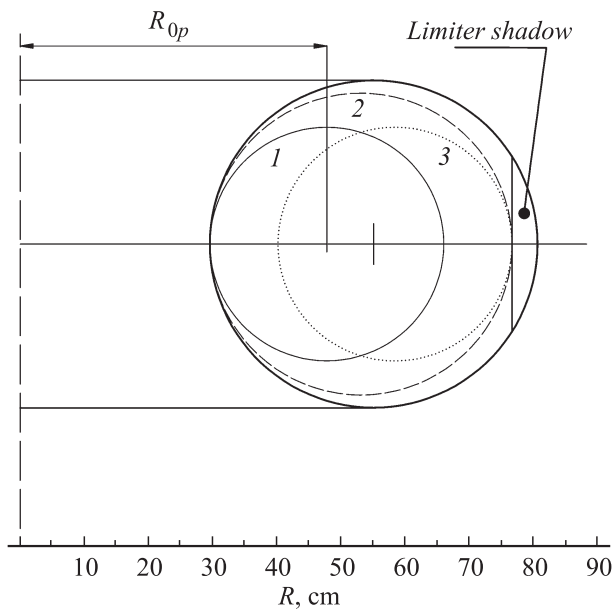


Рис. 1. Положение плазменного шнура в камере токамака ТУМАН-3М для трех типичных случаев (см. пояснения в тексте). Показана также тень лимитера.

камеры и не касается лимитера. При $R_{0p} > R_0 - 0.5L$ плазменный шнур отрывается от внутренней стенки камеры и начинает контактировать с лимитером. При выполнении условия $R_{0p} = R_0 - 0.5L$ достигается максимальное сечение плазменного шнура. Эти три характерные ситуации помечены на рис. 1 индексами 1, 3 и 2 соответственно. По мере увеличения смещения шнура по горизонтали сечение шнура сначала увеличивается (от положения 1 к положению 2), а потом уменьшается (от положения 2 к положению 3).

В описываемых экспериментах с помощью электростатического зонда измерялся профиль плавающего потенциала в периферийной плазме токамака ТУМАН-3М в области $-2 \text{ cm} < r - r_{\text{LCFS}} < 2 \text{ cm}$. При этом предполагалось, что на периферии профиль электронной температуры плоский, и поэтому $\text{grad } T_e$ не дает существенного вклада в величину электрического поля. В отдельных экспериментах проводилось измерение вольт-амперной характеристики зонда, что позволяло оценить

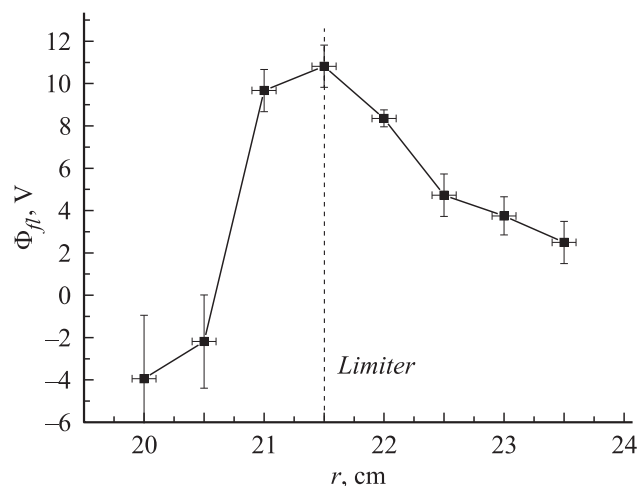


Рис. 2. Профиль плавающего потенциала при смещенном наружу плазменном шнуре (плазма ограничена лимитером).

поправку к радиальному электрическому полю, связанную с градиентом температуры.

Важно помнить, что контакт с плазмой, особенно внутри КЗМП, может приводить к испарению материала электродов и изоляции зона. В связи с этим необходимо использовать устойчивые к тепловым нагрузкам материалы. В эксперименте на токамаке ТУМАН-3М был использован молибденовый зонд с изоляцией из нитрида бора.

Также предложенная методика может оказаться малоэффективной в случае, если в периферийной плазме развиваются МГД-возмущения. При этом положение КЗМП смещается из-за вращения магнитных островов на периферии плазменного шнура, что может вносить неточность в измерения [8,9].

На рис. 2 представлен профиль плавающего потенциала в омическом разряде токамака ТУМАН-3М со шнуром, прижатым к лимитеру. Видно, что в этом случае максимум потенциала примерно совпадает с положением точки контакта плазмы с лимитером.

На рис. 3 построена зависимость значения положения КЗМП, определенного по максимуму плавающего потенциала зонда, $\Delta\Phi_{-fl}$ (черные квадраты), от смещения центра шнура, определенного по

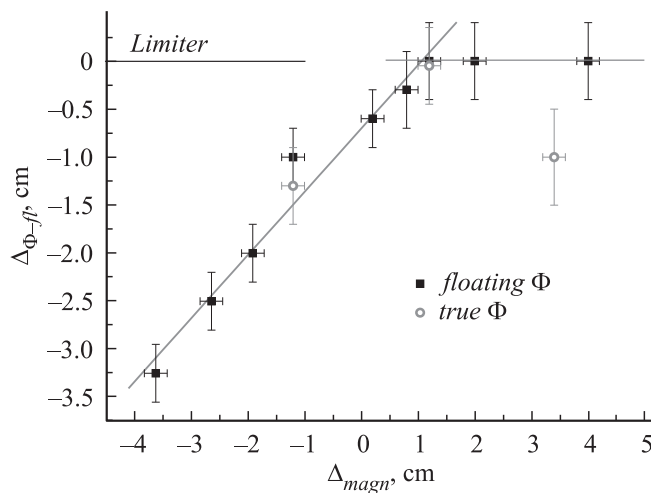


Рис. 3. Смещение КЗМП (измеренное зондом) в зависимости от положения центра плазмы (определяемого магнитной диагностикой).

данным магнитной диагностики Δ_{magn} . В части разрядов определялось положение максимума истинного потенциала, для чего снималась вольт-амперная характеристика зонда. Положение КЗМП, определенное таким способом, показано кружками. Можно выделить две характерные области этой зависимости. На участке $\Delta_{magn} < 1$ см наблюдается монотонно растущая, близкая к линейной зависимость $\Delta\Phi_{-fl}$ от Δ_{magn} , что, очевидно, соответствует конфигурации с прижатым к внутреннему обходу камеры плазменным шнуром. В области $\Delta_{magn} > 1$ см смещение $\Delta\Phi_{-fl}$ не зависит от Δ_{magn} или даже уменьшается (при учете слагаемого $\sim T_e$ в значении электрического потенциала). Эта ситуация соответствует касанию плазменного шнура лимитера. Точка перелома $\Delta_{magn} = 1$ см соответствует максимальному сечению плазменного шнура с одновременным касанием внутренней стенки камеры и лимитера (случай 2 на рис. 1). Падающая зависимость координаты $\Delta\Phi_{-fl}$ от смещения при $\Delta_{magn} > 1$ см неудивительна, если учесть, что электростатический зонд в описываемых экспериментах располагался не в экваториальной плоскости, а был смещен от нее на 45° вниз. Уменьшение сечения шнура при $\Delta_{magn} > 1$ см приводило при этом к удалению точки $d\phi(r)/dr = 0$

(т.е. координаты точки КЗМП, видимой зондом) от стенки камеры в глубь плазмы.

Используя результаты проведенных измерений, можно построить калибровочную зависимость истинного положения $\Delta_{\Phi-fl}$ от показаний магнитной диагностики Δ_{magn} : $\Delta_{\Phi-fl} = A\Delta_{magn} + B$, где $A = 0.36 \pm 0.01$, $B[\text{cm}] = -2.50 \pm 0.02$, и использовать ее в дальнейшем для определения положения КЗМП.

Таким образом, для определения положения КЗМП в токамаке предложена методика его измерения по положению максимума на профиле потенциала, определяемого при помощи лэнгмюровского зонда. На токамаке ТУМАН-3М проведены эксперименты, в результате которых была продемонстрирована работоспособность предложенной методики, а также построена калибровочная зависимость для уточнения показаний магнитной диагностики, определяющей положение плазмы. Предложенная методика может применяться как на лимитерных, так и на диверторных токамаках для независимой проверки и уточнения показаний электромагнитной диагностики положения плазменного шнура.

Список литературы

- [1] Воробьев Г.М. и др. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 105.
- [2] Корнев В.А. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 22. С. 64.
- [3] Kornev V.A. et al. // Proc. 25th Fusion Energy Conference (FEC2014), Saint Petersburg, Russia, 13–18 October 2014, EX/P6-58.
- [4] Вильджюнас М.И. и др. // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. В. 22. С. 80.
- [5] Equipe TFR // Nucl. Fusion. 1978. V. 18. P. 713.
- [6] Kuznetsov Yu.K. et al. // Nucl. Fusion. 1986. V. 26. P. 369.
- [7] Sauter P. et al. // Nucl. Fusion. 2012. V. 52. P. 012001.
- [8] Bulanin V.V. et al. // Plasma Phys. Control. Fusion. 2006. V. 48. P. 101.
- [9] Askinazi L.G. et al. // Proc. 32nd EPS Conf. on Plasma Physics (Tarragona, Spain). 2005. V. 29C. P. 5.071.