

УДК 533.9

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПЛАЗМЕННОГО ШНУРА В ТОКАМАКАХ ГЛОБУС-М И ТУМАН-3М ПО ИЗМЕРЕНИЯМ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА НА ГРАНИЦЕ ПЛАЗМЫ

© 2019 г. Л. Г. Аскинази^{а,*}, Г. И. Абдуллина^а, А. А. Белокуров^а, В. К. Гусев^а, Н. А. Жубр^а,
В. А. Корнев^а, С. В. Лебедев^а, М. И. Патров^а, Ю. В. Петров^а, Н. В. Сахаров^а,
В. А. Токарев^а, В. А. Тукачинский^а, Н. А. Хромов^а

^а Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: leonid.askinazi@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 19.04.2019 г.

После доработки 22.05.2019 г.

Принята к публикации 23.05.2019 г.

Описывается метод определения положения границы плазменного шнура, основанный на определении положения крайней замкнутой магнитной поверхности по максимуму профиля электростатического потенциала, измеряемого ленгмюровским зондом. Показано, что данный метод может использоваться как для абсолютной калибровки магнитной диагностики положения плазмы (ТУМАН-3М), так и самостоятельно (Глобус-М).

Ключевые слова: токамак, ленгмюровский зонд, крайняя замкнутая магнитная поверхность, электрический потенциал плазмы

DOI: 10.1134/S0367292119120023

1. ВВЕДЕНИЕ

Положение плазменного шнура в камере токамака — одна из важнейших характеристик разряда. С одной стороны, от смещения шнура по большому радиусу относительно геометрического центра камеры напрямую зависят большой и малый радиус плазмы R и a , а значит, объем плазмы и аспектное отношение R/a . С другой стороны, в лимитерном токамаке с круглым сечением (таким, например, является токамак ТУМАН-3М) смещение границы плазмы (крайней замкнутой магнитной поверхности — КЗМП, по английской терминологии Last Closed Flux Surface — LCFS) определяет положение точки контакта плазмы с элементами конструкции установки. 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 камеры токамака, в результате чего может увеличиваться поступление примесей в плазму. В диверторном токамаке, например, в Глобусе-М, контакт плазмы с конструктивными элементами установки должен происходить преимущественно в области дивертора, а для выпол-

нения этого требования необходим контроль положения КЗМП (в диверторных токамаках роль границы основной плазмы играет поверхность, проходящая через точку с нулевым поперечным магнитным полем, — сепаратриса). Вообще говоря, с физической точки зрения, равновесие плазменного шнура по горизонтали, а значит, и положение КЗМП, определяется балансом сил, действующих на плазменный шнур, и описывается уравнением Грэда—Шафранова [1]. Для поддержания равновесия в токамаках создается вертикальное магнитное поле, величина и временная динамика которого являются результатом работы сложной системы управления положением плазменного шнура, охваченной петлей обратной связи, вырабатывающей управляющее воздействие (возмущение вертикального магнитного поля) на основе сигналов магнитных датчиков положения шнура. Эффективность работы этой системы управления зависит от точности измерения положения шнура. Кроме этого, информация о положении КЗМП необходима для безошибочной работы кодов (например, EFIT [2]), восстанавливающих структуру магнитных поверхностей в токамаке.

Помимо места и степени взаимодействия плазмы с конструктивными элементами установки, положение КЗМП оказывает влияние на це-

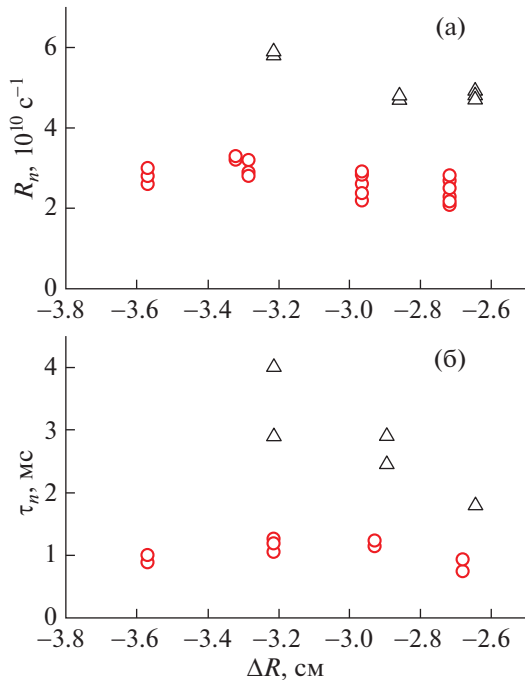


Рис. 1. Зависимость нейтронного потока при инъекции атомарного пучка в токамаке ТУМАН-3М R_n (а) и времени торможения быстрых ионов τ_n (б) от сдвига плазменного шнура по большому радиусу для двух сценариев: кружки – $B_t = 0.7 \text{ Тл}$, $I_p = 155 \text{ кА}$; треугольники – $B_t = 1 \text{ Тл}$, $I_p = 170 \text{ кА}$. $\Delta R = 0$ соответствует положению магнитной оси шнура в центре камеры токамака, $\Delta R < 0$ означает сдвиг в сторону сильного тороидального магнитного поля.

лый ряд других важных физических параметров эксперимента. Так, например, определяемые положением оси разряда геометрические параметры плазмы (ее большой R и малый a радиусы) влияют на такие важные характеристики, как удержание вещества и энергии [3]. В экспериментах по исследованию параметрических зависимостей интенсивности нейтронного излучения, генерируемого при взаимодействии быстрых ионов с ионами фоновой плазмы в режиме инъекционного нагрева на токамаке ТУМАН-3М [4], было обнаружено, что положение плазменного шнура оказывает влияние также и на удержание быстрых частиц. На рис. 1 показаны зависимости интенсивности нейтронного потока (величина которого пропорциональна числу реакций термоядерного синтеза в единицу времени) и эффективного времени торможения быстрых ионов, измеренные при инъекции атомарного пучка с энергией 19 кэВ в плазму с относительно низкими ($B_t = 0.7 \text{ Тл}$, $I_p = 155 \text{ кА}$) и высокими ($B_t = 1 \text{ Тл}$, $I_p = 170 \text{ кА}$) значениями тороидального магнитного поля и тока по плазме. Видно, что во втором случае время торможения быстрых ионов и ней-

тронный поток оказываются заметно больше и сильно зависят от положения плазменного шнура: при сдвиге наружу обе величины уменьшаются. Это свидетельствует о необходимости точного контроля положения шнура с целью оптимизации такого важнейшего параметра установки, как время торможения высокоэнергичных ионов (в том числе и продуктов ядерных реакций), которые предполагается использовать для нагрева плазмы до температур, необходимых для осуществления и поддержания реакции ядерного синтеза с положительным энергетическим выходом. Таким образом, оптимизация положения плазменного шнура необходима для получения максимальной величины нейтронного потока, то есть для достижения максимального числа актов ядерного синтеза в установке в единицу времени.

Влияние положения плазменного шнура на локализацию области удержания быстрых ионов обнаружено также в экспериментах по исследованию ионно-циклотронного излучения в режиме с инъекцией пучка нейтральных атомов [5]. На установке ТУМАН-3М было обнаружено, что изменение положения шнура приводит к изменению частоты ионно-циклотронного излучения, возникающего во время инъекции, рис. 2. Дальнейший анализ показал, что это излучение порождается быстрыми ионами, удерживаемыми в плазме, на орбитах, преимущественно локализованных вблизи магнитной оси разряда. Сдвиг оси разряда приводит к изменению области удержания быстрых ионов, что, в свою очередь, влияет на частоту ионно-циклотронной неустойчивости, развивающейся в плазме под воздействием быстрых частиц в области их локализации.

Итак, положение оси разряда и сепаратрисы являются важными параметрами разрядов в установках с магнитным удержанием плазмы. Эти параметры определяют взаимодействие плазмы с элементами конструкции установок, а следовательно, влияют как на долговечность и надежность работы этих элементов, так и на количество и состав примесей, поступающих в плазму. Положение плазмы, как было показано выше, влияет также на параметры удержания быстрых заряженных частиц в установке, что, в конечном итоге, определяет эффективность токамака-реактора и токамака-источника нейтронов.

2. ОПИСАНИЕ МЕТОДА И ЭКСПЕРИМЕНТОВ

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 (часто – снаружи вакуумной камеры) и вычислении на основе этих измерений положения и формы крайней замкнутой магнит-

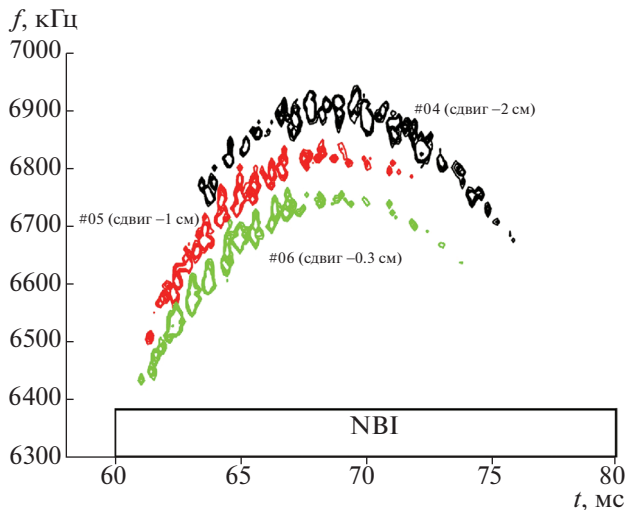


Рис. 2. Частота ионно-циклотронного излучения из плазмы токамака ТУМАН-3М во время инжекционного нагрева (NBI) для трех положений плазменного шнура. При наибольшем сдвиге шнура внутрь ($\Delta R = -2$ см) частота ИЦИ максимальна. Изменение частоты ионно-циклотронного излучения во времени вызвано непостоянством магнитного поля.

ной поверхности [6, 7]. Положение и форма КЗМП в этом случае — результат расчета. Погрешности в работе данной диагностики могут быть связаны с влиянием токов, протекающих по элементам конструкции разрядной камеры (что особенно важно в компактных токамаках), нестабильностью параметров электронных систем и т.п. Поэтому актуальным является поиск способов проверки и уточнения измерений положения границы плазмы с использованием независимых прямых методов.

В данной работе предложен дополнительный, по отношению к магнитным измерениям, метод непосредственного определения положения КЗМП по измерениям электрического потенциала в периферийной плазме, а также представлены результаты его экспериментального исследования на токамаках ТУМАН-3М [8] и Глобус-М [9]. В режимах с не слишком низкими плотностью и температурой плазмы, потенциал в центре шнура обычно отрицательный [10, 11]. Радиальный профиль электрического потенциала на краю плазмы немонотонен 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 из плазмы происходят в результате поперечного (диффузионного) переноса, растекание вещества и тепла вдоль силовых линий приводит лишь к выравниванию давления на магнитной поверхно-

сти. При этом для обеспечения равенства потоков положительных ионов и электронов в плазме генерируется отрицательное (направленное внутрь) радиальное электрическое поле E_r . В области разомкнутых магнитных поверхностей снаружи от КЗМП (в тени лимитера) картина переноса существенно меняется: интенсивные потери электронов вдоль силовых линий на поверхности 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) поле 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 $E_r = -d\phi(r)/dr = 0$, можно определить положение КЗМП. Строго говоря, точка $E_r = 0$ не точно соответствует КЗМП, разница может составлять несколько миллиметров [12], однако для токамака не слишком малых размеров эта точность представляется приемлемой.

Описываемые в статье исследования проводились на лимитерном токамаке ТУМАН-3М и на диверторном токамаке Глобус-М. В экспериментах по инжекционному нагреву плазмы на токамаке ТУМАН-3М было обнаружено существенное влияние положения плазменного шнура на эффективность инжекции атомарного пучка, в частности, на интенсивность нейтронного потока [13]. Это влияние обусловлено ростом электронной температуры при сдвиге шнура внутрь, что ведет к увеличению времени термализации быстрых ионов и росту их популяции в плазме. Как интенсивность потока 2.45 МэВ d-d нейтронов (генерируемых в результате взаимодействия быстрых ионов с ионами плазмы), так и время спада нейтронного потока после отключения инжектируемого пучка достигают максимума, если шнур смещен на ~ 2.5 см внутрь относительно центра вакуумной камеры [4]. В численных расчетах обнаруживается зависимость эффективности захвата быстрых ионов при ионизации атомарного нагревного пучка от прицельного параметра, также изменяющегося при смещении плазменного шнура [14]. Этот эффект объясняется влиянием положения точки ионизации на

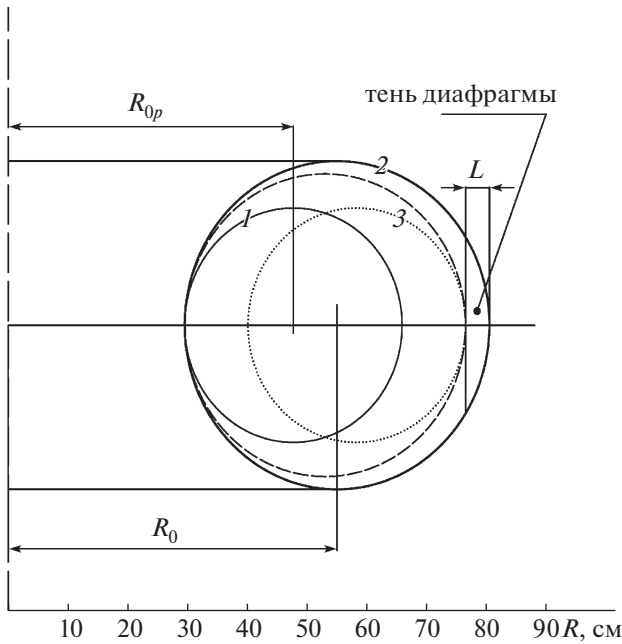


Рис. 3. Положение плазменного шнура в камере токамака ТУМАН-3М (большой радиус камеры $R_0 = 0.557$ м) для трех типичных случаев: 1 – касание шнура внутренней стенки, 2 – шнур максимального сечения, 3 – касание шнура лимитера. Показана также тень лимитера; ее глубина $L = 0.04$ м.

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. 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, установленных снаружи камеры. Камера токамака имеет размеры $R_0 = 0.557$ м и $a_0 = 0.256$ м и оборудована лимитером, установленным со стороны слабого магнитного поля и имеющим глубину тени $L = 40$ мм, см. рис. 3. 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 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 максимальная площадь сечения плазменного шнура. Эти три характерные ситуации помечены на рис. 3 индексами 1,

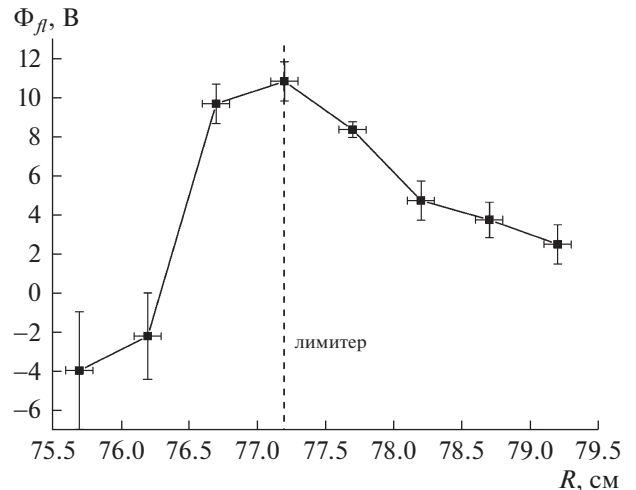


Рис. 4. Профиль плавающего потенциала при смещенном наружу плазменном шнуре (плазма ограничена лимитером, случай 3 рис. 2) в токамаке ТУМАН-3М.

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 [15] измерялся радиальный профиль плавающего потенциала электростатического зонда в периферийной плазме токамака ТУМАН-3М в области $-2 \text{ см} < r - r_{LCFS} < 2 \text{ см}$; при этом предполагалось, что на периферии электронная температура мала и слабо меняется в пространстве, и поэтому ∇T_e не дает существенного вклада в величину электрического поля. В отдельных экспериментах проводилось измерение вольт-амперной характеристики зонда, что позволяло оценить поправку к радиальному электрическому полю, связанную с градиентом температуры. Для уменьшения вероятности разрушения зонда и загрязнения плазмы при изготовлении зонда использовались теплоустойчивые материалы: молибден (электроды) и нитрид бора (изоляторы).

На рис. 4 представлен профиль плавающего потенциала в омическом разряде токамака ТУМАН-3М со шнуром, прижатым к лимитеру. Видно, что в этом случае положение максимума потенциала примерно совпадает с координатой точки контакта плазмы с лимитером.

На рис. 5 построена зависимость смещения КЗМП, определенного по максимуму плавающего потенциала зонда, $\Delta_{\Phi-fl}$ (черные квадраты), от смещения центра шнура, определенного по данным магнитной диагностики Δ_{magn} . В части разрядов определялось положение максимума потен-

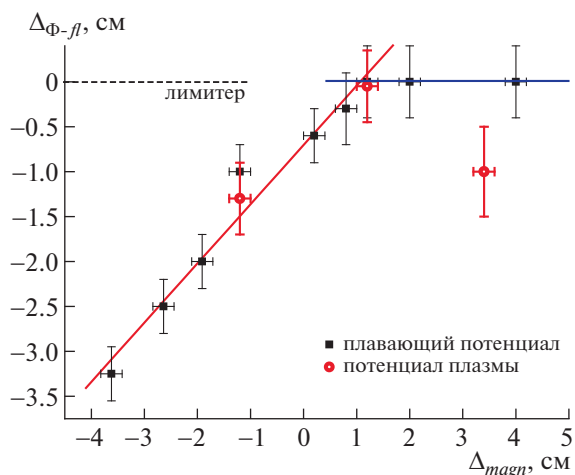


Рис. 5. Смещение КЗМП в токамаке ТУМАН-3М (измеренное зондом) в зависимости от положения центра плазмы (определяемого магнитной диагностикой).

циала плазмы, для чего снималась вольт-амперная характеристика зонда. Положение КЗМП, определенное таким способом, показано красными 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 плазменным шнуром лимитера. Точка перелома $\Delta_{magn} = 1$ см соответствует максимальному сечению плазменного шнура с одновременным касанием внутренней стенки камеры и лимитера (случай 2 на рис. 3). Спадающая зависимость координаты $\Delta_{\Phi-fl}$ от смещения при $\Delta_{magn} > 1$ см не удивительна, если учесть, что отрезок малого радиуса, вдоль которого в описываемых экспериментах перемещался электростатический зонд, располагался не в экваториальной плоскости, а был повернут от нее на 45° против часовой стрелки. 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 вглубь плазмы.

С учетом результатов проведенных измерений была построена калибровочная кривая зависимости истинного положения шнура $\Delta_{\Phi-fl}$ от показаний магнитной диагностики Δ_{magn} : $\Delta_{\Phi-fl} = A \cdot \Delta_{magn} + B$, где $A = 0.67 \pm 0.06$, $B[\text{см}] = -0.67 \pm 0.12$. Эта калибровка в настоящее время используется для уточнения данных магнитной диагностики о положении плазменного шнура в токамаке

ТУМАН-3М в разрядах, в которых использование электростатического зонда для этой цели затруднено (например, при мощном инжекционном нагреве).

Глобус-М является компактным сферическим токамаком с большим радиусом 0.36 м, малым радиусом 0.24 м и открытым дивертором. В большинстве исследуемых разрядов расстояние между центральной колонной и сепаратрисой не превышает 3 см, что предъявляет повышенные требования к системе управления и точности реконструкции магнитной конфигурации по данным внешних магнитных измерений. Зависимость эффективности нейтральной инжекции от положения шнура по большому радиусу на токамаке Глобус-М исследовалась в работе [16], где также было обнаружено значительное (около 30%) увеличение ионной температуры и нейтронного выхода при оптимальном зазоре плазма — стенка на стороне слабого магнитного поля. Первоначально измерения в пристеночной плазме проводились с помощью двух тройных ленгмюровских зондов, смещенных относительно друг друга на фиксированное расстояние 10 мм по большому радиусу. Зонды располагались в экваториальной плоскости и могли передвигаться как единое целое на расстояние до 60 мм между разрядами токамака [17]. Для иллюстрации предлагаемого метода на рис. 6 представлены сглаженные осциллограммы плавающего потенциала этих зондов и сигнала ΔR_{pl} , пропорционального смещению геометрического центра КЗМП относительно центра полоидального сечения камеры. Данный сигнал формируется в системе управления положением плазменного шнура, отрицательные значения соответствуют сдвигу внутрь, т.е. в сторону сильного поля. Координаты электродов зондов вдоль большого радиуса R_{pr} составляли 582 (далее — зонд 1) и 592 мм (далее — зонд 2). Видно, что после 152 мс и до конца разряда шнур сдвигается внутрь, и на всех сигналах видны колебания с частотой 300 Гц, вызванные пульсациями вертикального поля, управляющего положением шнура. На данных осциллограммах представляется целесообразным выделить три интервала времени. Интервал 152–159 мс — здесь колебания потенциала на более близком к оси разряда зонде 1 находятся в противофазе с сигналом ΔR_{pl} , колебания же на зонде 2 неразличимы, т.е. можно предположить, что зонд 1 находится в области отрицательного электрического поля, зонд 2 — в области, где поле приблизительно равно нулю. В интервале 159–171 мс плавающие потенциалы зондов совершают колебания в противофазе, т.е. из-за удаления КЗМП от зондов зонд 2 переместился в область положительного поля. И наконец, в третьем интервале 171–179 мс уже зонд 1 попадает в область с нулевым полем, и пульсации на сигнале с него пропадают. Наибо-

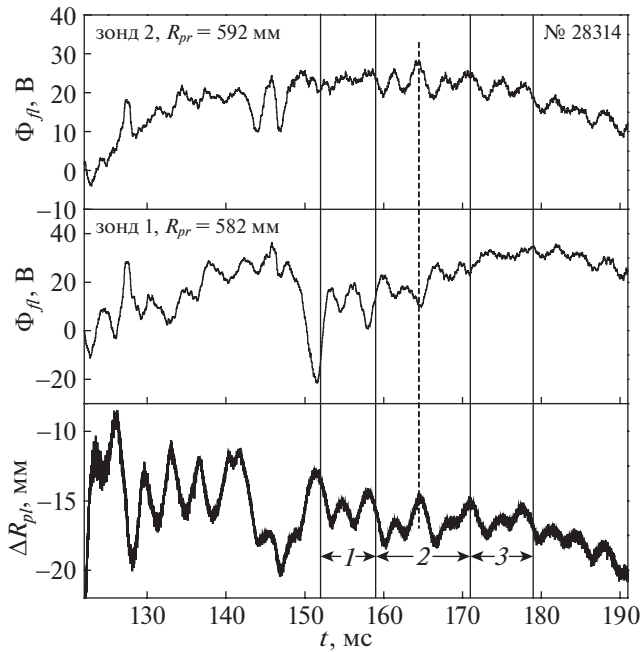


Рис. 6. Осциллограммы плавающего потенциала двух ленгмюровских зондов и сигнала ΔR_{pl} , пропорционального смещению геометрического центра КЗМП относительно центра полоидального сечения камеры на токамаке Глобус-М. Тороидальное магнитное поле $B_t = 0.4$ Тл, ток плазмы $I_p = 180$ кА, среднехордовая электронная плотность $\bar{n}_e = 2.6 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. В интервале 159–171 мс (отмечен цифрой 2) сепаратриса находится между зондами, что приводит к противофазным колебаниям их потенциалов.

лее четко регистрируется второй интервал, где, судя по всему, максимум профиля плавающего потенциала и, следовательно, сепаратриса находится между зондами. Реконструкция магнитной конфигурации кодом EFIT на токамаке Глобус-М проводится с шагом 1 мс, что связано с усреднением данных магнитной диагностики в течение 3 мс. Данное обстоятельство не дает возможности получить временное разрешение колебаний положения шнура с частотой 300 Гц. Тем не менее, во втором интервале реконструкция дает положение усредненной координаты сепаратрисы в диапазоне от 585 до 583 мм, что хорошо согласуется с данными зондовых измерений.

В последнюю экспериментальную кампанию на токамаке была произведена установка нового многотырькового ленгмюровского зонда [18], который располагался в экваториальной плоскости на внешнем обводе тора и перемещался с помощью линейного магнитного манипулятора между разрядами. Конструкция зонда и примененные материалы (графитовые электроды и изоляторы из нитрида бора) позволяют ему выдерживать значительные тепловые нагрузки, что дает

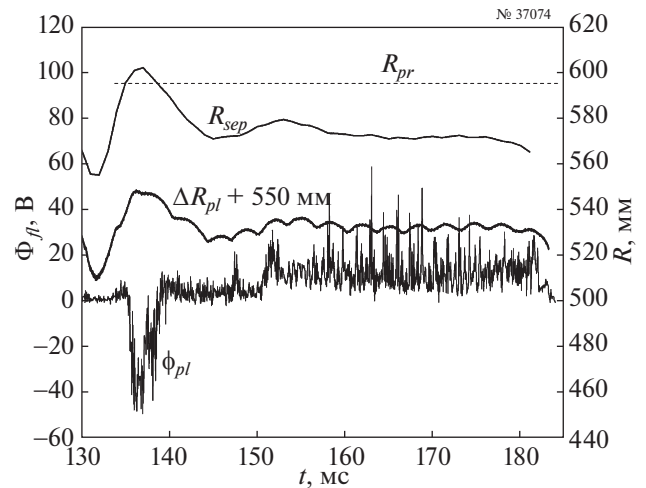


Рис. 7. Осциллограммы плавающего потенциала ленгмюровского зонда Φ_{pl} , радиальной координаты сепаратрисы в экваториальной плоскости R_{sep} и сигнала ΔR_{pl} на токамаке Глобус-М. Тороидальное магнитное поле $B_t = 0.4$ Тл, ток плазмы $I_p = 170$ кА, среднехордовая плотность $\bar{n}_e = 1.3 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Положение зонда отмечено пунктирной линией. В промежутке времени, когда зонд попадает внутрь КЗМП, наблюдается резкое уменьшение его потенциала.

возможность проводить измерения достаточно глубоко внутри КЗМП.

Следует отметить, что для диверторных токамаков отрицательное электрическое поле внутри сепаратрисы в непосредственной близости от нее, как правило, достигает нескольких кВ/м [19]. Это приводит к тому, что при передвижении зонда к центру камеры при пересечении сепаратрисы его плавающий потенциал резко уменьшается и становится отрицательным. Данное обстоятельство является удобным и довольно точным индикатором того, что зонд находится внутри КЗМП [20]. На рис. 7 приведены осциллограммы плавающего потенциала, радиальной координаты сепаратрисы в экваториальной плоскости, полученной с помощью кода EFIT, и сигнала ΔR_{pl} для разряда № 37074, положение зонда отмечено пунктирной линией. Пики после 150 мс объясняются тем, что после включения нейтральной инжекции происходит переход в режим улучшенного удержания и появляются краевые неустойчивости (ELM, Edge Localized Modes). В начале разряда шнур на несколько миллисекунд сдвигается наружу, и зонд попадает в область замкнутых магнитных линий, при этом его потенциал уменьшается до -35 В. Затем шнур смещается внутрь и стабилизируется в этом положении. На основании приведенных осциллограмм можно построить профиль усредненного плавающего потенциала, если пренебречь изменениями параметров плазмы в этот пе-

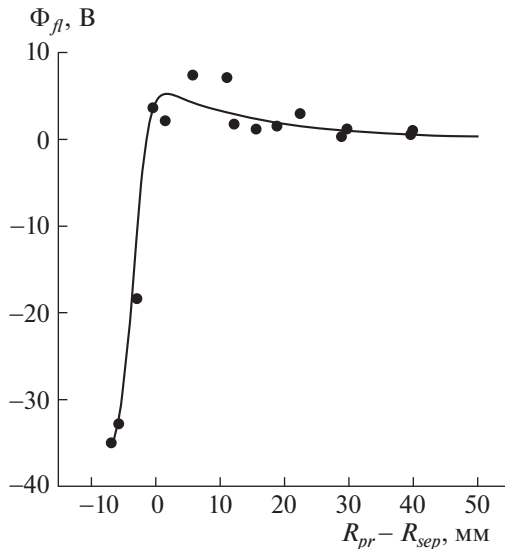


Рис. 8. Зависимость плавающего потенциала ленгмюровского зонда от расстояния между сепаратрисой и зондом в токамаке Глобус-М (разряд № 37074). Каждая точка соответствует отдельной реконструкции EFIT, которые проводились с временным шагом 1 мс.

риод, то есть предположить, что потенциал меняется в основном из-за изменения взаимного положения сепаратрисы и зонда. На рис. 8 показан результат такой обработки данных в интервале 130–145 мс, время усреднения потенциала составляло 1 мс. Стоит отметить, что полученный таким образом профиль качественно похож на профили, полученные на сферическом токамаке MAST с помощью прыгающего зонда в работе [21]. Несмотря на значительный разброс точек, из рисунка видно, что резкое уменьшение плавающего потенциала происходит, когда положение зонда и сепаратрисы совпадают с точностью до нескольких миллиметров. На основании представленных данных можно заключить, что на токамаке Глобус-М наблюдается достаточно хорошее соответствие определения КЗМП с помощью магнитной диагностики и кода EFIT и с помощью предлагаемой методики.

3. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, для определения положения КЗМП в токамаке предложен метод его измерения по положению максимума на профиле потенциала, определяемого при помощи ленгмюровского зонда. На токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М проведены эксперименты, в результате которых продемонстрирована работоспособность предложенной методики. Для токамака ТУМАН-3М была построена калибровочная зависимость для уточнения показаний магнитной диагностики, определяющей положение плазмы. Предло-

женный метод может применяться как на лимитерных, так и на диверторных токамаках для независимой проверки и уточнения показаний электромагнитной диагностики положения плазменного шнура.

Исследование влияния положения плазменного шнура на удержание быстрых ионов и характеристики ионно-циклотронного излучения при инжекционном нагреве на токамаке ТУМАН-3М выполнено при поддержке Российского научного фонда (грант № 16-12-10285-П). Остальные эксперименты на токамаках ТУМАН-3М и Глобус-М выполнены в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шафранов В.Д. // ЖЭТФ. 1957. Т. 33. С. 710.
2. Lao L.L., John H.St., Stambaugh R.D., Kellman A.G., Pfeiffer W. // Nucl. Fusion. 1985. V. 25. P. 1611.
3. Doyle E.J. (Chair Transport Physics), Houlberg W.A. (Chair Confinement Database and Modelling), Kamada Y. (Chair Pedestal and Edge), Mukhovatov V. (co-Chair Transport Physics), Osborne T.H. (co-Chair Pedestal and Edge), Polevoi A. (co-Chair Confinement Database and Modelling), Bateman G., Connor J.W., Cordey J.G. (retired), Fujita T., Garbet X., Hahm T.S., Horton L.D., Hubbard A.E., Imbeaux F., Jenko F., Kinsey J.E., Kishimoto Y., Li J., Luce T.C., Martin Y., Ossipenko M., Parail V., Peeters A., Rhodes T.L., Rice J.E., Roach C.M., Rozhansky V., Rytter F., Saibene G., Sartori R., Sips A.C.C., Snipes J.A., Sugihara M., Synakowski E.J., Takenaga H., Takizuka T., Thomsen K., Wade M.R., Wilson H.R., ITPA Transport Physics Topical Group, ITPA Confinement Database and Modelling Topical Group and ITPA Pedestal and Edge Topical Group // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. S18. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/6/S02>
4. Kornev V.A., Askinazi L.G., Chernyshev F.V., Krikunov S.V., Lebedev S.V., Melnik A.D., Razumenko D.V., Rozhdestvensky V.V., Tukachinsky A.S., Vid'junas M.I., Zhubr N.A. // Proc. 25th Fusion Energy Conf. (FEC2014), Saint-Petersburg, Russia. EX/P6-58.
5. Askinazi L.G., Belokurov A.A., Gin D.B., Kornev V.A., Lebedev S.V., Shevelev A.E., Tukachinsky A.S., Zhubr N.A. // Nucl. Fusion. 2018. V. 58. 082003. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aac10e>
6. Equipe TFR // Nucl. Fusion. 1978. V. 18. P. 647.
7. Kuznetsov Yu. K., Pyatov V.N., Yasin I.V., Golant V.E., Gryaznevich M.P., Lebedev S.V., Sakharov N.V., Shakhovets K.G. // Nucl. Fusion. 1986. V. 26. P. 369. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/26/3/011>
8. Воробьев Г.М., Голант В.Е., Горностаев С.В., Григорьев А.В., Грязневич М.П., Евтушенко Т.П., Ипатов В.А., Кисляков А.И., Лебедев С.В., Липин Б.М., Литуновский Р.Н., Миняев О.А., Рождественский В.В., Сахаров Н.В., Теплов П.П., Федоров А.А., Шаховец К.Г., Шемелинин С.Г. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 105.
9. Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З., Дьяченко В.В., Ирзак М.А., Минаев В.Б., Мухин Е.Е., Новохац-

- кий А.Н., Подушникова К.А., Раздобарин Г.Т., Сахаров Н.В., Трегубова Е.Н., Узлов В.С., Шербинин О.Н., Беляков В.А., Кавин А.А., Косцов Ю.А., Кузьмин Е.Г., Сойкин В.Ф., Кузнецов Е.А., Ягнов В.А. // ЖТФ. 1999. Т. 69. Вып. 9. С. 58.
10. *Bugarya V.I., Gorshkov A.V., Grashin S.A., Ivanov I.V., Krupin V.A., Mel'nikov A.V., Razumova K.A., Sokolov Yu.A., Trukhin V.M., Chankin A.V., Yushmanov P.N., Krupnik L.I., Nedzel'skij I.S.* // Nucl. Fusion. 1985. V. 25. P. 1707.
 11. *Melnikov A.V.* Electric potential in toroidal plasmas. Springer Nature Switzerland AG, 2018.
 12. *Lashkul S.I., Altukhov A.B., Bulanin V.V., Dyachenko V.V., Esipov L.A., Gurchenko A.D., Gusakov E.Z., Kantor M.Yu., Kouprienko D.V., Petrov A.V., Shatalin S.V., Stepanov A.Yu., Vekshina E.O., Yashin A.Yu.* // Proc. 7th Int. Workshop "Strong Microwaves: Sources and Applications" / Ed. by A.G. Litvak. Nizhny Novgorod: Institute of Applied Physics. 2009. V. 1. 2. P. 312.
 13. *Корнев В.А., Чернышев Ф.В., Мельник А.Д., Аскинази Л.Г., Вагнер Ф., Вильджюнас М.И., Жубр Н.А., Крикунов С.В., Лебедев С.В., Разуменко Д.В., Тукачинский А.С.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 22. С. 64.
 14. *Вильджюнас М.И., Корнев В.А., Аскинази Л.Г., Лебедев С.В., Тукачинский А.С.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 22. С. 80.
 15. *Абдуллина Г.И., Аскинази Л.Г., Белокуров А.А., Жубр Н.А., Корнев В.А., Лебедев С.В., Тукачинский А.С.* // Письма в ЖТФ. 2016. Т. 42. Вып. 4. С. 23.
 16. *Бахарев Н.Н., Гусев В.К., Ибляминова А.Д., Корнев В.А., Курские Г.С., Мельник А.Д., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Толстяков С.Ю., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шёголев П.Б., Вагнер Ф.* // Письма в ЖТФ. 2013. Т. 39. Вып. 24. С. 22.
 17. *Хромов Н.А., Гусев В.К., Петров Ю.В., Сахаров Н.В.* // Тезисы докл. XXXVIII Междунар. (Звенигородской) конф. по физике плазмы и УТС. М.: ЗАО "ПЛАЗМАИОФАН", 2011. С. 94.
 18. *Tokarev V.A., Gusev V.K., Khromov N.A., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Varfalomeev V.I.* // J. Phys.: Conf. Ser. 1094. 012003.
 19. *Sauter P., Pütterich T., Ryter F., Viezzer E., Wolfrum E., Conway G.D., Fischer R., Kurzan B., McDermott R.M., Rathgeber S.K. and the ASDEX Upgrade Team* // Nucl. Fusion. 2012. V. 52. P. 012001.
 20. *Watkins J.G., Moyer R.A., Cuthbertson J.W., Buchenauer D.A., Carlstrom T.N., Hill D.N., Ulrickson M.* Препринт GA-A22362, 1996.
 21. *Tamain P., Kirk A., Nardon E., Dudson B., Hnat B. and the MAST team* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2010. V. 52. 075017.