

Исследование диамагнитного эффекта в мультипольных ловушках-галатеех

© А.М. Бишаев,¹ А.И. Бугрова,¹ М.Б. Гавриков,² М.В. Козинцева,¹ А.С. Липатов,¹
В.В. Савельев,² А.С. Сигов,¹ П.Г. Смирнов,¹ И.А. Тарелкин,¹ П.П. Храмцов³

¹ Московский государственный технический университет радиотехники, электроники и автоматики,
119454 Москва, Россия
e-mail: bishaev@mirea.ru

² Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН,
125047 Москва, Россия

³ Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Белоруссии,
220072, Минск, Белоруссия

(Поступило в Редакцию 11 мая 2012 г.)

С помощью пояса Роговского измерена величина тороидального тока, возникающего после инъекции плазменного сгустка через магнитную корку мультипольной ловушки Тримикс-3М(СВЧ). Этот ток обусловлен диамагнетизмом плазмы. Получена связь величины диамагнитного тока с максимальной величиной давления плазмы, которое создается на сепаратрисе магнитного поля. Таким образом, показано, что магнитные измерения в мультипольной ловушке при известной величине концентрации позволяют определять величину температуры плазмы в ловушке и энергетическое время удержания.

Введение

Измерение изменений в магнитном поле ловушек для удержания плазмы, которые обусловлены появлением токов, вызванных диамагнетизмом плазмы (диамагнитным эффектом), является обязательной частью измерений на всех магнитных ловушках. В ловушке типа токамак [1] диамагнитный эффект измеряют датчиком магнитного потока, который охватывает тороидальный плазменный объем. Измеренное таким способом изменение величины тороидального магнитного потока позволяет определить давление в плазме и при известной величине концентрации сделать оценку величины температуры. В мультипольных магнитных ловушках-галатеех [2] тороидальное магнитное поле отсутствует, но для возникновения сил, удерживающих плазму, должен существовать тороидальный ток I_D , обусловленный диамагнетизмом плазмы. В проведенных исследованиях с помощью пояса Роговского (ПР) измерялся полный диамагнитный ток в плазме и найдена связь измеренного тока с величиной давления в плазменном объеме. Это позволяет, как и в установках токамак, по магнитным измерениям определить параметры плазмы в ловушке.

1. Описание установки

Исследование проводилось на ловушке Тримикс-3М(СВЧ), установленной на стенде Галатее-3 [3]. Мультипольные магнитные ловушки-галатееи [2] представляют систему магнитных катушек, часть из которых погружена в плазму (см. рис. 1). Такие катушки профессор А.И. Морозов предложил называть миксинами.

В ловушках-галатеех магнитные поверхности сложного поперечного сечения (см. рис. 1, *b*) ограничивают замкнутую торообразную область, в центре которой магнитное поле равно нулю. Внешние замкнутые магнитные силовые линии образуют внешнюю магнитную корку (стенку) ловушки. Диаметр ловушки — 0.8 м. Питание магнитных катушек ловушки, а также всех других силовых систем стенда — импульсное. Характерное магнитное поле в корке ловушки (барьерное поле B_b) может изменяться от 0.025 до 0.12 Т. Наполнение плазмой ловушки тоже осуществлялось импульсно [3,4]. Плазма создавалась в виде плазменных сгустков, которые формировались плазменной пушкой и направлялись с помощью плазмоведа в ловушку. Время заполнения ловушки плазмой и ее удержание составляет величину ~ 1 мс. Так как длина импульса тока в магнитных катушках ловушки намного больше этой величины, то магнитное поле ловушки в течение такого отрезка времени можно считать постоянным.

2. Параметры плазмы в ловушке Тримикс-3М(СВЧ)

Параметры поступающего в ловушку сгустка на стенде измерялись и рассчитывались по следующей методике. Энергия направленного движения ионов измерялась в каждом выстреле пушки с помощью двух магнитных зондов, расположенных в плазмоведе на фиксированном расстоянии друг от друга. По временному сдвигу между сигналами на зондах определялась скорость сгустка V и по известной формуле $E_p = m_p V^2 / 2$ рассчитывалась энергия направленного движения ионов водорода. В этой формуле m_p — масса протона. Плазменная пушка при

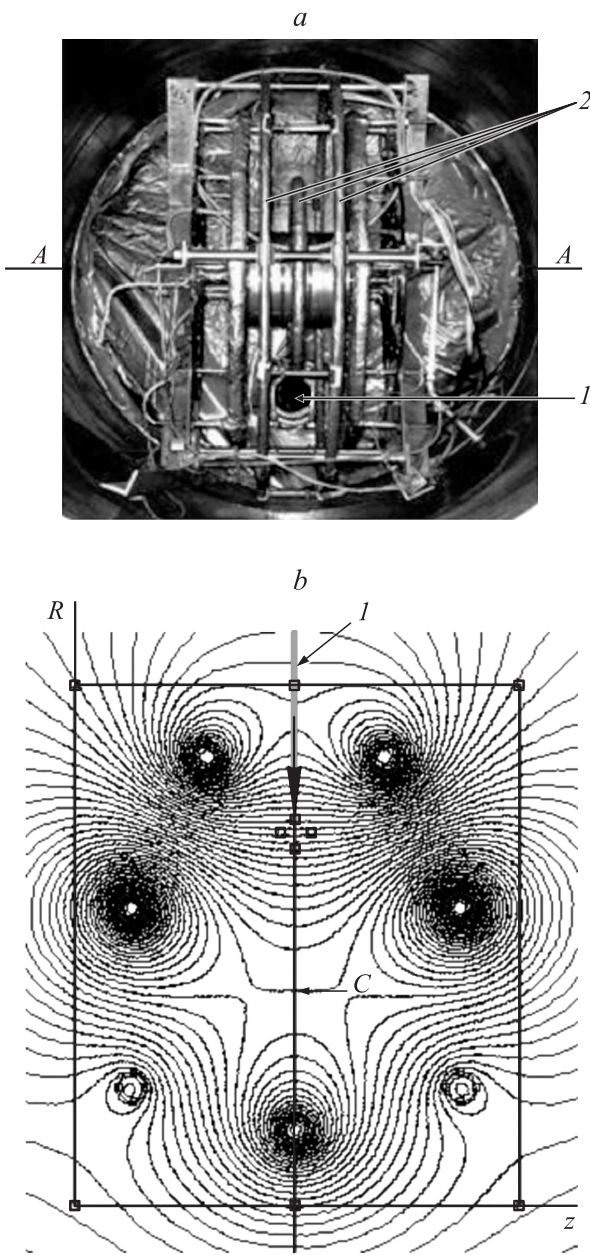


Рис. 1. *a* — фотография ловушки Тримикс-3М(СВЧ), установленной в вакуумной камере стенда: 1 — место инжекции, 2 — миксины; *b* — конфигурация магнитных силовых линий и линия инжекции 1 в ловушке Тримикс-3М(СВЧ) в сечении А-А.

подаче на нее импульсного напряжения 12 кВ и временного сдвига между подачей рабочего газа в пушку и напряжения 320 мкс генерировала сгустки, состоящие из быстрой головной части (*Q*-сгусток) и медленной части (*S*-сгусток). Приведенные на рис. 2 полученные в эксперименте зависимости E_p от величины магнитного поля ловушки являются результатом усреднения по 5–10 выстрелам пушки для каждого значения магнитного поля ловушки. Из этих данных видно, что E_p

остается постоянным и для *Q*-сгустка лежит в пределах 300–500 эВ, а для *S*-сгустка — в пределах 25–50 эВ. Как и следовало ожидать, скорость направленного движения протонов мало зависит от магнитного поля ловушки потому, что вдоль линии инжекции на всей длине плазмоведа магнитное поле не превышает $(0.005)T$, а в местах расположения магнитных зондов это поле близко к нулю. Энергия кинетического движения ионов E_p *S*-сгустка для поля ловушки 0.108 Т равна 40 эВ и для *Q*-сгустка — 400 эВ. Полученные экспериментальные результаты позволяют сделать оценку температуры плазмы, захваченной в ловушку, после завершения процесса термализации плазменного сгустка в ловушке. Термин „термализация сгустка“ означает процесс, в результате которого устанавливается равномерное распределение кинетической энергии движения протонов в сгустке по трем степеням свободы. Также предполагается, что ионы и электроны в сгустке имеют разную температуру. По данным [5] температура ионов в сгустке $T_p = 0.2E_p$, температура электронов $T_e = 10$ эВ, а число быстрых ионов в плазменном сгустке составляет 10%. Термализация сгустка рассматривается как адиабатический процесс. В результате получается, что плазма в ловушке состоит из трех групп частиц с разной температурой: 1) горячие ионы — $T_{ph} = 350$ эВ, 2) холодные ионы — $T_{pc} = 35$ эВ, 3) электроны — $T_e = 10$ эВ. С учетом того, что концентрация быстрых ионов в 10 раз меньше концентрации холодных, средняя величина температуры плазмы $T_p = 76$ эВ.

Для выбранного режима работы пушки и плазмоведа с помощью калориметра, установленного в точке *C* (см. рис. 1, *b*), определялось среднее значение полной энергии сгустка W , захваченного в ловушку. Результаты

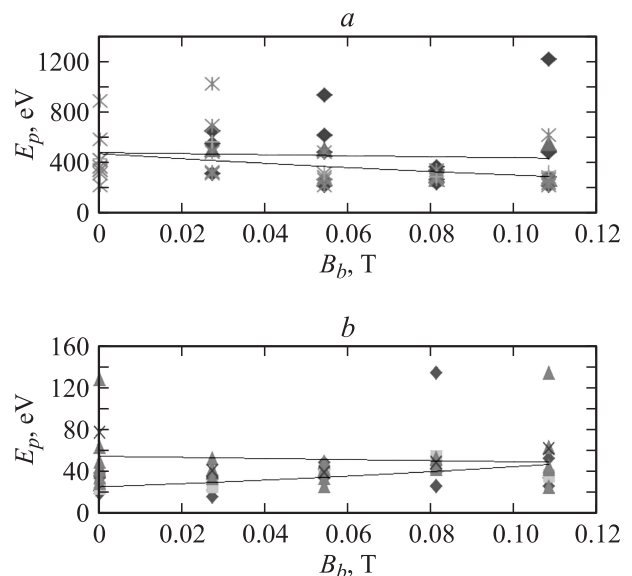


Рис. 2. Зависимости кинетической энергии протонов E_p в сгустке от величины барьерного магнитного поля ловушки, *a* — для *Q*-сгустка, *b* — для *S*-сгустка. Линиями показаны результаты различных серий экспериментов.

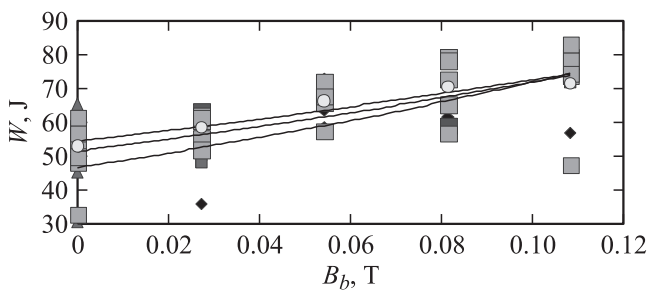


Рис. 3. Зависимости энергии плазменного сгустка W , захваченного в ловушку, от величины барьерного магнитного поля B_b .

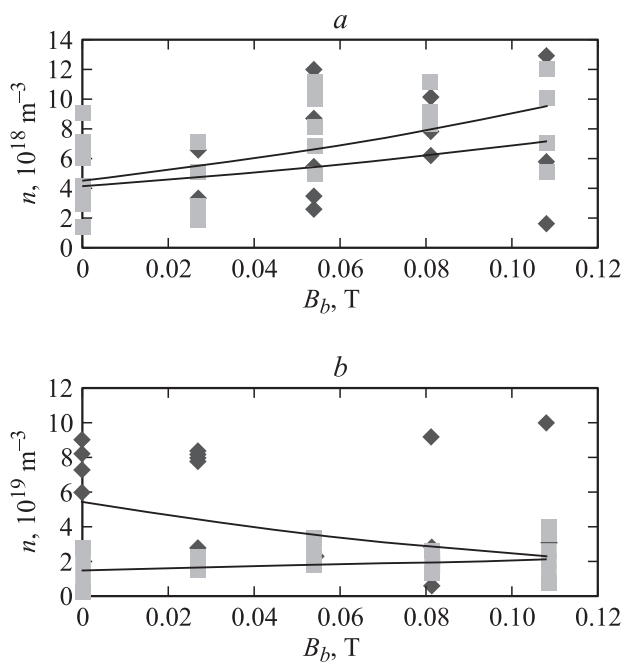


Рис. 4. Зависимости концентрации плазмы в ловушке непосредственно после инъекции сгустка от величины барьерного магнитного поля ловушки, *a* — для Q -сгустка, *b* — для S -сгустка.

этих измерений (см. рис. 3) позволяют делением W на энергию каждой частицы в сгустке определить полное число частиц, захваченных в ловушку, и максимальную величину концентрации плазмы в ловушке. При этих оценках и ниже принимается, что границы плазменного объема в ловушке Тримикс-3М(СВЧ) совпадают с таковыми в ловушке Тримикс-3М, которые были определены с помощью электрических зондов [3]. Так можно считать благодаря тому, что конфигурации магнитного поля для указанных ловушек имеют небольшие отличия лишь в области за пределами плазменного объема. Объем плазмы во всех оценках принимается равным $9 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3$. При расчете концентрации по величине W учитывалась энергия рекомбинации, которая тоже выделяется в калориметре. В результате для концентрации плазмы

получаем величину на уровне $2 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$ (см. рис. 4). Этот результат позволяет утверждать, что максимальное давление плазмы составляет величину $\sim 240 \text{ Pa}$. Приведенные данные дают представление о параметрах плазмы, достигнутых к данному моменту в ловушке Тримикс-3М(СВЧ). Однако их можно рассматривать лишь в качестве оценки порядка величины.

3. Измерение диамагнитного тока

Измерение диамагнитного тока в мультипольной магнитной ловушке Тримикс-3М описано в [6,7]. В данных экспериментах использовался ПР с параметрами: общее число витков ПР было равно 4354, длина составила 2.64 м, площадь поперечного сечения каждого витка катушки пояса равнялась $2 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$; омическое сопротивление $r = 6.4 \Omega$, сопротивление нагрузки $R = 50 \Omega$. ПР был намотан медным проводом, сечение которого равно 0.5 мм. Его индуктивность равна $180 \mu\text{H}$. Чувствительность ПР, найденная в результате его калибровки, составила $(4.0 \pm 0.3) \cdot 10^{-8} \text{ (V} \cdot \text{s)/A}$. Для измерения сигнала с пояса использовалась стандартная схема: пояс нагружался на сопротивление 50Ω . Напряжение с

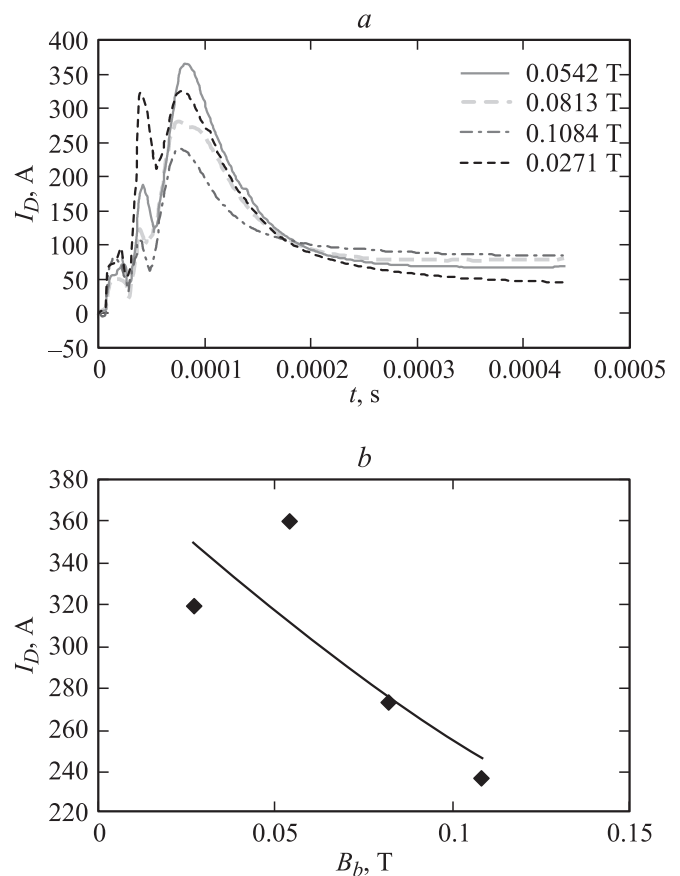


Рис. 5. *a* — зависимость величины диамагнитного тока в ловушке I_D от времени после момента срабатывания плазменной пушки по сигналам с ПР; *b* — зависимость максимального значения I_D от величины магнитного поля ловушки.

этого сопротивления подавалось на осциллограф. При длительности сигнала с пояса 1 ms индуктивное сопротивление равно $\omega L = 1.13\ \Omega$. Таким образом, выполняется соотношение $\omega L \ll r + R$, и сигнал, который записывается осциллографом, пропорционален производной от измеряемого тока по времени. Записанные сигналы с пояса интегрировались и определялась зависимость измеряемого тока I_D от времени. Пояс располагался в плоскости сечения ловушки, сдвинутой от места инъекции плазмы на 180° по азимуту. Конструктивно ПР охватывал только тороидальный плазменный объем ловушки и не охватывал ни одну из катушек магнитной ловушки. Таким образом, токи в магнитных катушках, величина которых могла в 1000 раз превышать измеряемый ток в плазме, не влияли на сигнал с пояса.

Были выполнены эксперименты по измерению зависимостей $I_D(t)$ для различных значений барьерного магнитного поля в ловушке Тримикс-3М(СВЧ). Приведенные на рис. 5 результаты таких измерений получены усреднением осциллограмм сигналов с ПР по 5–10 выстрелам пушки при одном и том же магнитном поле. Из полученных зависимостей видно, что рост тока I_D начинается через 5–7 μs после подачи напряжения на плазменную пушку. В течение следующих 65–80 μs I_D возрастает и достигает максимума. Затем I_D начинает уменьшаться. Такое поведение I_D указывает на то, что процесс наполнения ловушки плазмой заканчивается на 70-й–80-й μs , а отсутствие сигнала в первые 5–7 μs соответствует времени прохождения быстрой части сгустка через плазмод. Изменение направления магнитного поля ловушки приводит к изменению направления I_D . При любом направлении магнитного поля направление измеренного диамагнитного тока совпадает с направлением тока в миксинах. Данные, приведенные на рис. 5, *b*, показывают, что с увеличением магнитного поля ловушки максимальная величина I_D уменьшается.

4. Связь между величиной диамагнитного тока и параметрами плазмы в ловушке

Сила Ампера, возникающая при взаимодействии появившегося азимутального тока с полоидальным магнитным полем во внешней магнитной корке ловушки, удерживает плазму внутри ловушки и уравнивает давление плазмы. В настоящее время теоретическое исследование равновесных конфигураций магнитных ловушек проводится, как правило, на основе уравнения Грэда-Шафранова [8]. Результаты расчета равновесной конфигурации для ловушки Тримикс-3М(СВЧ), выполненного по аналогии с расчетами в [9] для квадруполя, приведены на рис. 6. Сравнение конфигурации вакуумного магнитного поля ловушки (рис. 1, *b*) и равновесного поля (рис. 6, *a*) показывает, что они практически совпадают. Это происходит из-за малости диамагнитных токов

по сравнению с токами, протекающими в магнитных катушках ловушки (в рассмотренном случае отношение токов меньше 1/40). В мультипольных плазменных ловушках магнитное поле полоидальное. Замкнутые в плоскости Z, R силовые линии образуют вложенные друг в друга тороидальные магнитные поверхности, на которых при равновесии давление постоянно [8]. Начальные условия для расчета выбирались из следующих соображений: ток в катушках ловушки 1500 А соответствует барьерному магнитному полю 0.108 Т; давление на сепаратрисе выбрано равным 100 Па и соответствует тому давлению, которое получилось по измеренной величине диамагнитного тока; задавался экспоненциальный профиль давления. Приведенное на рис. 6, *b* расчетное распределение диамагнитных токов показывает, что плазменный объем разбит на четыре области: 1 — область внешней магнитной корки с магнитными силовыми линиями, охватывающими все три миксины и замкнутыми вокруг всего плазменного объема, направление диамагнитного тока в этой области совпадает с направлением тока в миксинах; области 2–4 примыкают к миксинам, магнитные силовые линии в этих областях замыкаются вокруг каждой миксины, и диамагнитный ток в них течет в направлении, противоположном току в миксинах (см. рис. 6, *b*). В расчете принималось, что максимальное давление P_0 достигается на сепаратрисе. Эта линия является внутренней плазменной границей для всех указанных областей. Распределение давления в плазме (рис. 6, *c*) указывает на его довольно быстрый спад и отсутствие плазмы около миксин. Учитывая результаты приведенных расчетов и результаты измерения размеров плазменной области с помощью электрических зондов [3] на ловушке Тримикс-3М, была определена конфигурация плазменной области в ловушке Тримикс-3М (СВЧ), которая представлена на рис. 6, *d*. В отличие от расчетов за пределами указанных на этом рисунке границ плазмы экспериментально не наблюдалось. Таким образом, из рис. 6, *b* и 6, *d* следует, что измеряемый в экспериментах ток I_D равен:

$$I_D = I_{D1} - 2I_{D2} - I_{D4} = I_{D1} \left(1 - 2 \frac{I_{D2}}{I_{D1}} - \frac{I_{D4}}{I_{D1}} \right), \quad (1)$$

где $I_{D1}, I_{D2} = I_{D3}, I_{D4}$ — токи в различных областях плазменного объема. Для нахождения связи между измеренным диамагнитным током и давлением плазмы вычислим величину силы Ампера в плазменном объеме. На рис. 7 показана часть сечения плазменного объема плоскостью Z, R . Рассмотрим кусочек плазменного объема (заштрихован) длиной dl , заключенный между двумя магнитными поверхностями L_i и L_{i+1} . Пусть погонная плотность азимутального диамагнитного тока I_D на кусочке dl равна \mathbf{j}_i , и ток направлен за плоскость рисунка (\oplus). Магнитное поле \mathbf{B} направлено по касательной к силовой линии L_i . Тогда сила Ампера $d\mathbf{F}_A$ на отрезке dl перпендикулярна к \mathbf{B} и \mathbf{j}_i , направлена

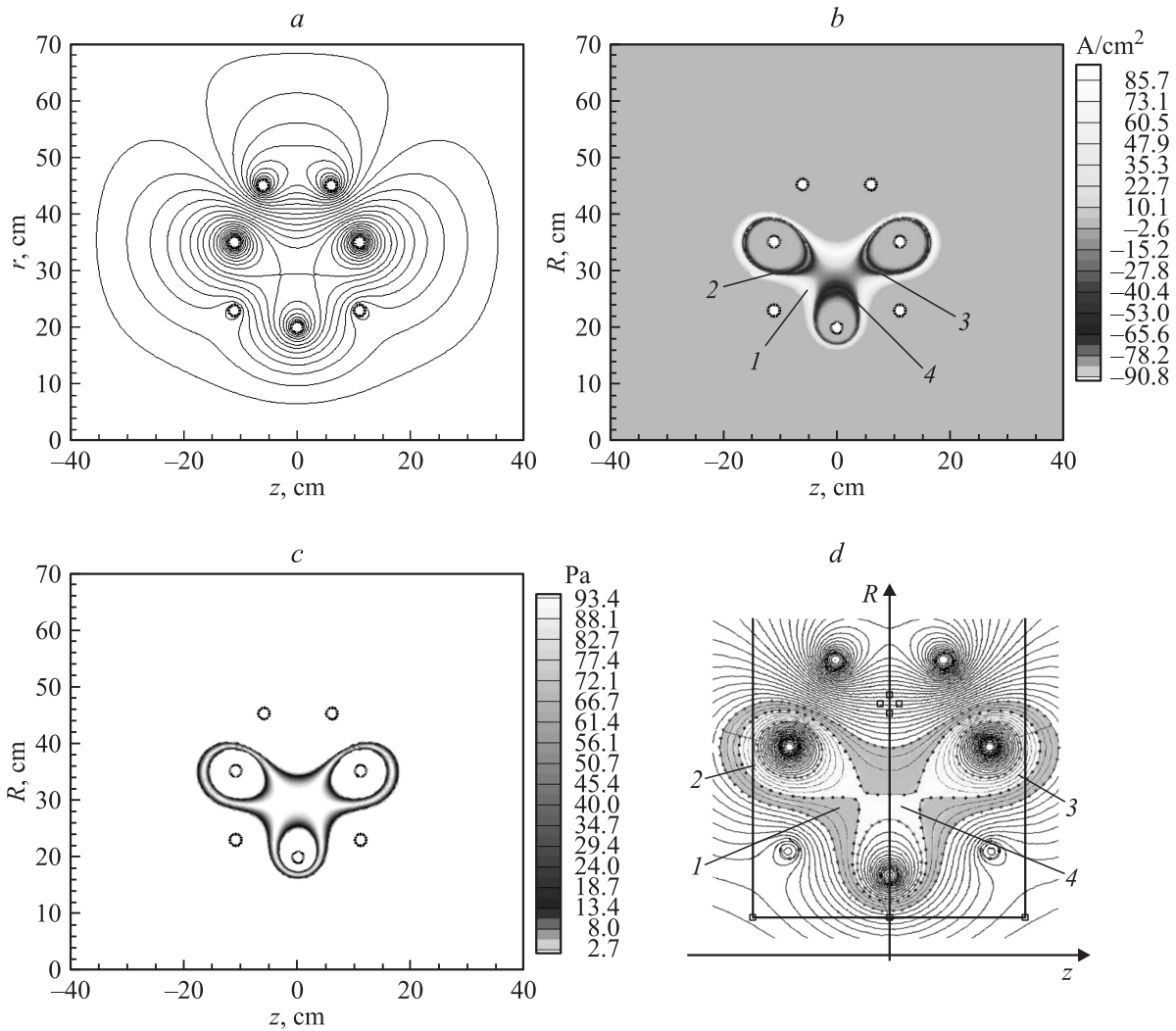


Рис. 6. Расчетная и экспериментальная конфигурации сечения плазменного объема плоскостью RZ: *a* — расчетная равновесная конфигурация магнитного поля; *b* — распределение плотности диамагнитного тока; *c* — равновесное распределение давления для ловушки Тримикс-3М(СВЧ) (расчет по уравнению Грэда–Шафранова); *d* — конфигурация сечения плазменного объема по зондовым измерениям.

внутри плазменного объема и равна $dF_A = 2\pi r j_i dlB$, где $2\pi r$ — длина окружности, на которой расположен отрезок dl ; $j_i dl$ — величина тока, протекающего через заштрихованную область между силовыми линиями L_i и L_{i+1} (рис. 7). Разность dP_i постоянных давлений на линиях L_i и L_{i+1}

$$dP_1 = P_i - P_{i+1} = -\frac{dF}{dS} = -\frac{2\pi r j_i dlB}{2\pi r dl} = -j_i B = \text{const.}$$

Тогда диамагнитный ток dJ_{Di} , протекающий между магнитными поверхностями, образованными силовыми линиями L_i и L_{i+1} , равен

$$dJ_{Di} = \oint_{L_i} j dl = -dP_i \oint_{L_i} \frac{dl}{B}. \quad (2)$$

Уравнение (2) было получено в [8] в общем случае, когда магнитная силовая линия не замыкается при обходе по азимуту магнитную поверхность. Полный диамагнитный ток, протекающий в одной из четырех указанных выше областей плазменного объема, равен сумме dJ_{Di} между магнитными поверхностями в этом объеме

$$I_{Di} = \sum dJ_{Di} = \sum_i (P_i - P_{i+1}) \oint_{L_i} \frac{dl}{B} = P_0 \sum_i \left(\frac{P_i}{P_0} - \frac{P_{i+1}}{P_0} \right) \oint_{L_i} \frac{dl}{B}, \quad (3)$$

где P_0 — давление на сепаратрисе. Аналогичную формулу можно написать для любой области плазменного объема. Так как сепаратриса разделяет все четыре обла-

сти плазменного объема, то из (3) следует, что

$$\frac{J_{D2,D3}}{J_{D1}} = \frac{\left[\sum_i \left(\frac{P_i}{P_0} - \frac{P_{i+1}}{P_0} \right) \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_{2,3}}{\left[\sum_i \left(\frac{P_i}{P_0} - \frac{P_{i+1}}{P_0} \right) \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_1};$$

$$\frac{J_{D4}}{J_{D1}} = \frac{\left[\sum_i \left(\frac{P_i}{P_0} - \frac{P_{i+1}}{P_0} \right) \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_4}{\left[\sum_i \left(\frac{P_i}{P_0} - \frac{P_{i+1}}{P_0} \right) \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_1}. \quad (4)$$

Таким образом, если известно распределение давления по силовым линиям (в расчете оно задается), то по величине измеренного диамагнитного тока можно оценить P_0 . Приблизненно (3) можно записать

$$I_{D1} = - \int_{D1} dP_1 \oint_{L1} \frac{dl}{B} = - \left\langle \oint_{L1} \frac{dl}{B} \right\rangle_{D1} \int_{P_0}^{P_{\min}} dP$$

$$= (P_0 - P_{\min}) \left\langle \oint_{L1} \frac{dl}{B} \right\rangle_{D1},$$

где P_{\min} — давление на внешней границе плазмы можно положить равным нулю, а величину в угловых скобках, означающих среднее значение по области D_1 , в предположении, что перепад давления между любыми магнитными поверхностями является постоянной величиной, можно представить как

$$\left\langle \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right\rangle_{D1} = \frac{1}{n} \left[\sum_{i=1}^{i=n} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_{D1},$$

где n — число силовых линий в рассматриваемой области. Тогда для величины диамагнитных токов, текущих в разных областях плазменного объема, получаются следующие выражения:

$$I_{D1} = P_0 \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_1, \quad (5)$$

$$I_{D2,D3} = P_0 \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{i=m} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_{2,3}, \quad (6)$$

$$I_{D4} = P_0 \left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^{i=k} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_4, \quad (7)$$

где n , m и k — число силовых линий в областях плазменного объема 1, 2 или 3 и 4. Из этих формул и (1)

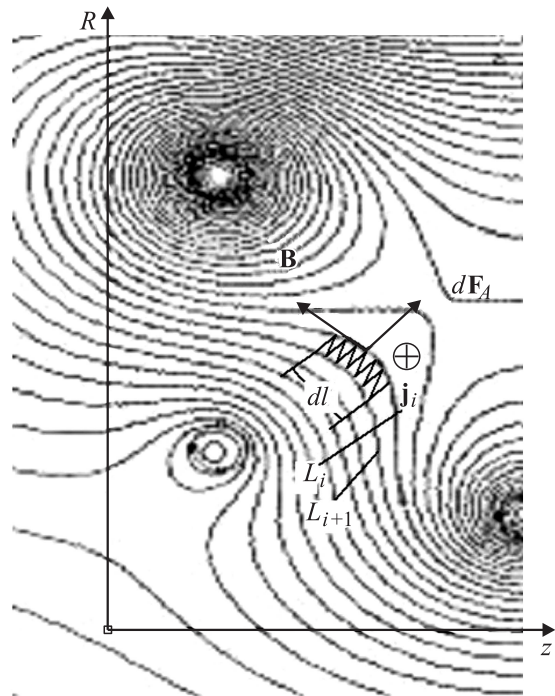


Рис. 7. Схема удержания плазмы силами Ампера.

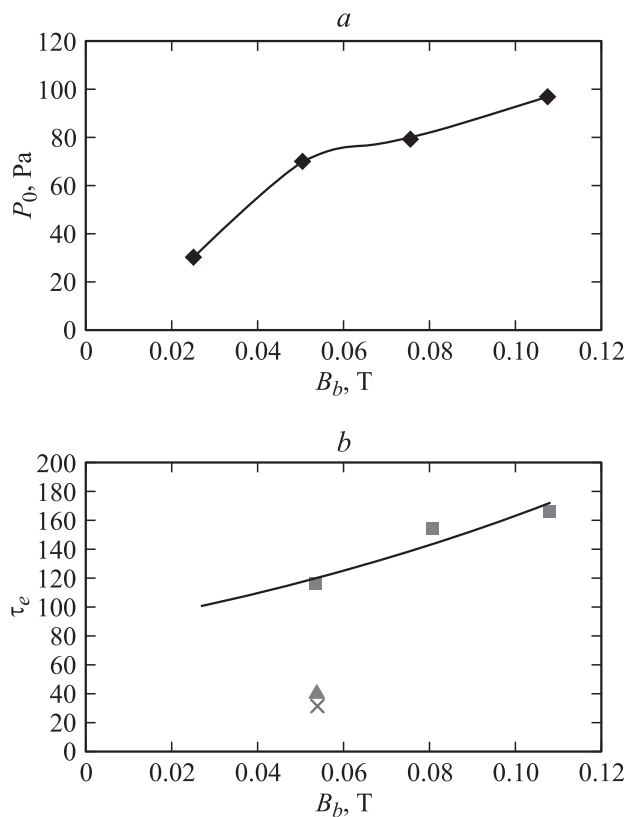


Рис. 8. Параметры плазмы в ловушке Тримикс-3М(СВЧ), полученные по величине диамагнитного тока: a — зависимость давления на сепаратисте от барьерного магнитного поля ловушки; b — зависимость времени удержания энергии от барьерного магнитного поля.

и (5)–(7) следует, что давление на сепаратрисе равно

$$P_0 = I_D / \left\{ \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_1 \left\{ 1 - \frac{2 \left[\frac{1}{m} \sum_{i=1}^{i=m} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_{2,3}}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_1} - \frac{\left[\frac{1}{k} \sum_{i=1}^{i=k} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_4}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{i=n} \oint_{L_i} \frac{dl}{B} \right]_1} \right\} = KI_D. \quad (8)$$

При расчете K по формуле (8) использовался расчет вакуумного магнитного поля по программе FEMM, которая позволила получить зависимость $B(l)$ вдоль линии L_i . Интегрирование проводилось с помощью программы ORIGIN 8. Расчет был выполнен для значения барьерного поля 0.108 Т. В результате расчета получилось, что $K = 0.388$ Па/А. Из (8) следует, что K пропорционален величине магнитного поля в ловушке и для других значений поля может быть определен по его величине, вычисленной для $B = 0.108$ Т.

По максимальному значению диамагнитного тока (см. рис. 5, *b*) и формуле (8) была рассчитана зависимость давления на сепаратрисе от величины магнитного поля, которая представлена на рис. 8, *a*. Видно, что давление, как и энергия захваченного в ловушку сгустка (см. рис. 3), растет с увеличением магнитного поля. Этот факт подтверждает пропорциональность измеряемого диамагнитного тока давлению плазмы в ловушке, а следовательно, и энергии, заключенной в плазменном объеме. Поэтому по изменению I_D во времени (см. рис. 5, *a*) было определено время удержания энергии в ловушке Тримикс-3М(СВЧ) в зависимости от величины магнитного поля (см. рис. 8, *b*). Оценка концентрации плазмы (см. рис. 4, *b*) и данные по давлению дают для магнитного поля $B = 0.108$ Т величину температуры плазмы на уровне $T = 30$ эВ, что в 2 раза меньше температуры, определенной по калориметрическим измерениям. Это расхождение, возможно, обусловлено неадиабатичностью процесса захвата плазменного сгустка в ловушку. Например, не учтена энергия, которая идет на создание магнитного поля диамагнитного тока.

Заключение

Приведенные в данной статье результаты указывают на возможность определения температуры плазмы в мультипольной ловушке с помощью измерения диамагнитного тока, возникающего в ловушке. При этом надо обязательно учитывать тот факт, что диамагнитный ток в различных областях плазменного объема течет в противоположных направлениях и результатом измерений является алгебраическая сумма этих токов.

Работа выполнена в рамках реализации ФЦП „Научные и научно-педагогические кадры инновационной

России“ на 2009–2013 г. по госконтракту и частично при финансовой поддержке РФФИ, грант № 12-01-00071.

Список литературы

- [1] Стрелков В.С. Физические основы методов диагностики плазмы в токамаке. М.: МИФИ, 2004.
- [2] Морозов А.И., Савельев В.В. // УФН. 1998. Т. 168. № 11. С. 1153–1194. Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Козинцева М.В., Липатов А.С., Васильев В.И., Струнников В.М. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 3. С.195–206.
- [3] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М., Козинцева М.В., Липатов А.С. // ЖТФ. 2007. Т. 77. Вып. 12. С. 15–20.
- [4] Бишаев А.М., Бугрова А.И., Козинцева М.В., Липатов А.С., Сигов А.С., Харчевников В.К. // Письма в ЖТФ. 2010. Т. 36. Вып. 10. С. 91–94.
- [5] Васильев В.И., Житлухин А.М., Струнников В.М., Хамидуллин Ф.Р. Радиационная плазмодинамика. Гл. 3. М.: Янус-К. 2008. С. 244–278.
- [6] Bishaev A.M., Bugrova A.I., Kozintseva M.V., Lipatov A.S., Savelyev V.V., Sigov A.S., Tarelkin I.A., Terekhov V.A., Desyatskov A.V. // Problems of Atomic Science and Technology. 2011y., N 1, Series: Plasma Physics (17), 2011. Vol 17. P. 20–22.
- [7] Бишаев А.М., Бугрова А.И., Гордеев И.С., Денисюк А.И., Козинцева М.В., Липатов А.С., Сигов А.С., Тарелкин И.А., Терехов В.А. // Материалы VII Российской конф. „Современные средства диагностики плазмы и их применение для контроля веществ и окружающей среды“. М.: 30 ноября–2 декабря 2010. С. 36–41.
- [8] Шафранов В.Д. Вопросы теории плазмы. М.: Госатомиздат, 1963. Вып. 2. С. 96–102.
- [9] Gavrikov M.V., Savelyev V.V. // J. Mathemat. Sci. 2009. Vol. 163. N 1. P. 1–47.