

04;12

Параметры плазмы в модернизированной ловушке Галатее «Тримикс-М»

© А.И. Морозов,¹ А.И. Бугрова,² А.М. Бишаев,² А.С. Липатов,² М.В. Козинцева²¹ Российский научный центр „Курчатовский институт“,
123182 Москва, Россия² Московский государственный институт радиотехники, электроники и автоматики (технический университет),
119454 Москва, Россия
e-mail: bugrova@mirea.ru

(Поступило в Редакцию 6 февраля 2007 г.)

Экспериментально исследованы параметры плазмы, удерживаемой в ловушке „Тримикс-М“, после увеличения энергии поступающего в ловушку сгустка водородной плазмы и увеличения магнитного барьера ловушки до значения $B_{\text{бар}} \sim 0.1$ Т. Были получены следующие характеристики плазмы в ловушке: концентрация $n \sim 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$, максимальное характерное регистрируемое время существования плазмы в ловушке $\tau_* \sim 800\text{--}900 \mu\text{s}$, энергия удерживаемой плазмы ~ 100 Дж, отношение плазменного давления к барьерному магнитному давлению $\beta_0 \sim 0.2$, температура электронов $T_e \sim 20$ эВ, температура ионов $T_i \sim 2T_e$. Максимальное время, за которое концентрация убывает в e раз, τ_p составило $300 \mu\text{s}$ при $B_{\text{бар}} = 0.1$ Т, что не противоречит представлению о классическом переносе.

PACS: 52.55.-s, 52.55.He

Введение

В предыдущих публикациях [1,2] описаны результаты исследования процесса захвата и удержания сгустка водородной плазмы в ловушке „Тримикс“ [3,4] с энергией сгустка, выходящего из плазмоведа, равной 2 Дж. Эти исследования показали, что если динамический напор в плазменном сгустке больше величины магнитного давления в первой магнитной корке вдоль линии инжекции сгустка в ловушку, то почти весь сгусток захватывается в ловушку. Термализация сгустка в ловушке происходит в области инжекции сгустка. Было получено, что тороидальный плазменный объем в ловушке имеет довольно резкую границу, совпадающую с одной из замкнутых магнитных поверхностей ловушки. В этих работах были получены следующие параметры плазмы в ловушке: концентрация $\sim 2 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-3}$, электронная температура ~ 5 эВ, время заполнения ловушки $\sim 100 \mu\text{s}$, время удержания (по спаду концентрации в e раз) $\sim 200 \mu\text{s}$. Это время соизмеримо со временем, рассчитанным в предположении классической диффузии плазмы. Энергия плазмы в ловушке была равна ~ 0.4 Дж, т.е. в пять раз меньше энергии сгустка, выходящего из плазмоведа. Также было показано, что плазма занимает явное большее сечение, чем площадь, находящаяся внутри границы Окавы, определяемой как минимум интеграла [5] (рис. 1)

$$\oint \frac{dl}{B} = \min.$$

Измерения показали, что площадь, охватываемая линией Окавы, равна $S_{\text{Окв}} = 4.1 \cdot 10^2 \text{ см}^2$, а плазма в плоскости (r, Z) занимает площадь $S_{\text{пл}} = 5 \cdot 10^2 \text{ см}^2$, поэтому объем, занимаемый плазмой, будет равен ~ 90 л. Граница плазмы обозначена буквой γ (рис. 1).

Для повышения параметров плазмы в ловушке требовалось увеличить энергию сгустка, входящего в ловушку, и величину магнитного барьера ловушки. Для этого была осуществлена модернизация установки „Галатее-3“, на которой был выполнен описанный в [1,2] цикл исследований.

Кратко результаты, полученные на модернизированной установке, приведены в нашей статье [6]. Подробное изложение материала приводится в данной работе.

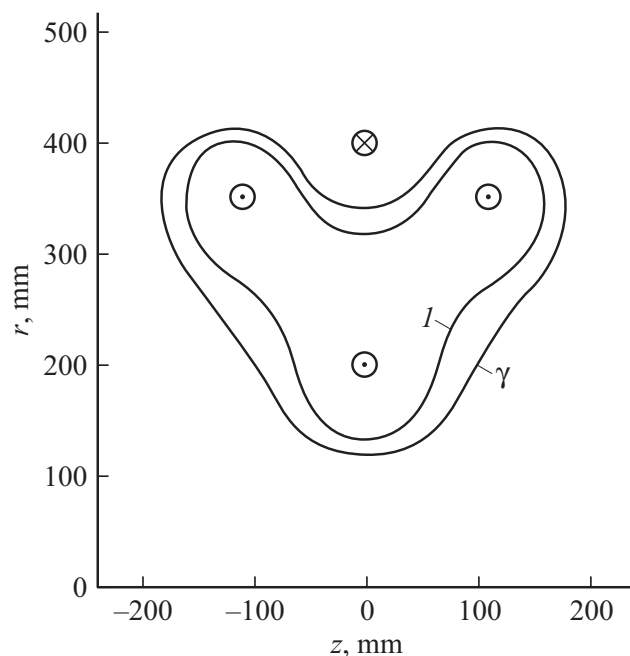


Рис. 1. Граница плазмы в ловушке „Тримикс“: I — линия „Окавы“, γ — линия, ограничивающая плазму.

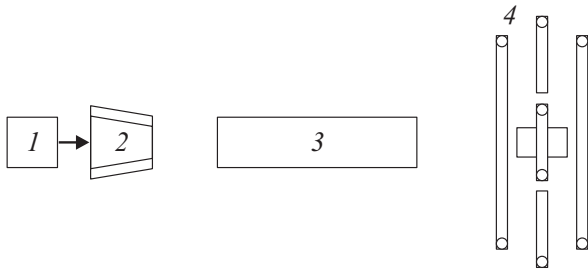


Рис. 2. Блок-схема установки „Галатей-3“: 1 — энергетический блок, 2 — пушка, 3 — плазмодук, 4 — ловушка „Тримикс“.

Модернизированная установка „Галатей-3М“

Измерение всех параметров плазмы проводилось на установке „Галатей-3“, состоящей из инжекционного комплекса и ловушки „Тримикс-М“ (рис. 2) [1]. Модернизации были подвергнуты энергетический блок (1) и магнитные катушки ловушки (4). Эта установка была названа „Галатей-3М“.

Модернизация энергетического блока

Для увеличения энергии, вкладываемой в сгусток, был модернизирован источник питания плазменной пушки. Емкость накопительной батареи была увеличена в 2.5 раза, что позволило при зарядном напряжении 17 кВ накапливать энергию 8.7 кДж. Длина кабелей, идущих к пушке, была сокращена до 2.2 м. Количество кабелей, соединяющих разрядник и пушку, увеличено в два раза и доведено до 75. Токоподводы между емкостями и разрядником были выполнены из медных шин. Сделанные изменения позволили уменьшить индуктивность источника питания пушки в 3.5 раза и сделать ее равной 31 нН, что сравнимо с индуктивностью пушки.

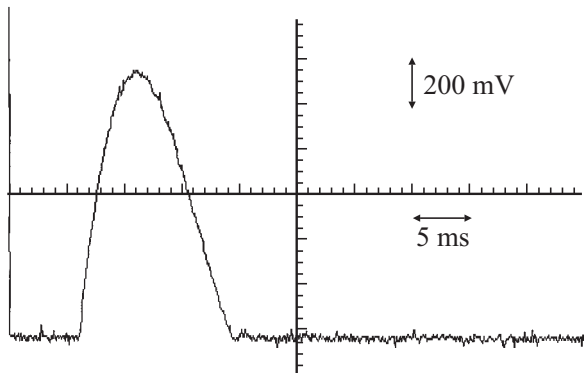


Рис. 3. Осциллограмма тока в магнитных катушках ловушки. Напряжение накопительной емкости — $U_0 = 500$ В, ток в максимуме — 480 А.

Модернизация магнитной системы ловушки (Галатей „Тримикс-М“)

Модернизация магнитной системы Галатей „Тримикс“ была проведена для увеличения значения барьерного магнитного поля до $B_{\text{bar}} \sim 0.1$ Т. Необходимость такой модернизации была обусловлена двумя взаимосвязанными причинами: первая — создание условий для удержания в ловушке плазмы с плотностью порядка и более 10^{13} см $^{-3}$ и энергией ионов на уровне 100 эВ, вторая — необходимость эффективного захвата в ловушку „быстрого“ сгустка, обеспечивающего получение указанных параметров. Ларморовский радиус ионов водорода при таких условиях составлял ~ 1 см, что в четыре раза меньше толщины магнитной корки ловушки.

Для увеличения барьерного поля были перемотаны все катушки ловушки. Каждая изготовленная катушка прошла электрические испытания на прочность изоляции на землю и межвитковой изоляции [7,8]. Импульс тока в соединенных последовательно катушках показан на осциллограмме рис. 3. В результате уменьшения индуктивности магнитной системы в четыре раза продолжительность импульса уменьшилась с 35 до 17 мс, тем не менее время в области максимального тока, когда он остается практически постоянным, составляет 2–3 мс, что вполне достаточно для проведения экспериментов с модернизированной системой магнитной ловушки Галатей „Тримикс-М“, так как это время много больше как длительности сгустка, инжектируемого пушкой, так и времени удержания плазмы в ловушке.

Транспортировка, захват и удержание плазменного сгустка

Параметры плазменного сгустка внутри плазмодода и на выходе из него

Все эксперименты проводились при зарядном напряжении на накопительной емкости источника питания пушки 17 кВ. Магнитное поле на оси плазмодода было равно 0.034 Т.

Диагностические методы, применяемые при измерении характеристик плазмы и используемые при проведении экспериментов, подробно описаны в [1].

С помощью измерения временного сдвига между сигналами от двух магнитных зондов, расположенных в центре плазмодода и на его выходе, была определена скорость распространения сгустка в плазмододе. Она оказалась равной $1.4 \cdot 10^5$ м/с, так что энергия протона ≈ 100 эВ. Длина сгустка — 0.8 м. Эксперименты показали, что имеются режимы работы пушки с быстрыми сгустками с энергией протонов ~ 500 эВ, но исследование этих режимов планируется в будущем.

Измерение энергии плазмы проводилось с помощью калориметра, устанавливаемого в различных точках вдоль линии инжекции плазмы в ловушку (рис. 4). Используемый калориметр представляет собой цилиндр

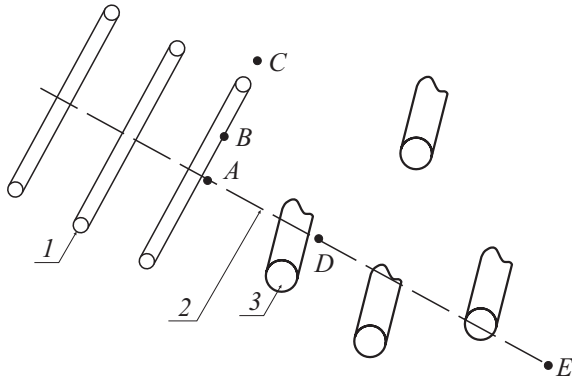


Рис. 4. Схема размещения калориметра: 1 — катушки плазмоведа, 2 — линия инъекции, 3 — катушки ловушки, A, B, C, D, E — точки расположения калориметра.

из медного листа толщиной 0.3 mm. Диаметр калориметра 47, длина — 100 mm. Чувствительность калориметра была равна $2.5 \cdot 10^{-2} \text{ J/cm}^2 \cdot \mu\text{V}$. Калориметр располагается в точках: A, B, C, D, E (рис. 4). Измерения в точках A, B и C, лежащих перед передней магнитной коркой ловушки в одной плоскости, перпендикулярной линии инъекции, позволили определить энергию плазменного сгустка W_0 на выходе плазмоведа. Она оказалась равной $\approx 200 \text{ J}$. Число частиц в сгустке, равное отношению W_0 к энергии протона, составило $1.2 \cdot 10^{19}$, а концентрация частиц на выходе из плазмоведа — порядка 10^{15} cm^{-3} . Таким образом, благодаря модернизации системы питания пушки параметры сгустка возросли: энергия сгустка увеличилась в 100 раз, а число частиц — почти в 10 раз. Показания калориметра, полученные в точке D, практически не отличались от показаний в точке A. Этот результат свидетельствует о том, что сгусток преодолевает переднюю магнитную корку (барьер ловушки) практически без потерь. Это связано с тем, что динамический напор в сгустке больше магнитного давления на входе ловушки.

Точка D располагалась за второй магнитной коркой ловушки (рис. 4). Измерения показали, что в этой точке калориметр дает практически нулевой сигнал. Поэтому можно считать, что весь сгусток, прошедший переднюю корку ловушки, захватывается ловушкой.

Время заполнения ловушки плазмой

Оценка времени заполнения плазмой ловушки проводилась с помощью измерения временного сдвига между сигналами на электрические зонды, стоящие на азимутах $\theta = 90^\circ$ и 180° в центре ловушки (рис. 5). Азимут $\theta = 0$ соответствует центру ввода сгустка в ловушку. Поверхность зондов ориентировалась параллельно азимутальной скорости. На рис. 6 изображены осциллограммы сигналов на эти зонды. Временной сдвиг по началу сигналов равен $\Delta t_1 = 13 \mu\text{s}$, по максимумам сигналов — $\Delta t_2 = 25 \mu\text{s}$.

Плазма, попадая в ловушку, тормозится задней магнитной коркой, термализуется и растекается по азимуту (рис. 5). Считается, что когда оба потока дойдут до азимута $\theta = 180^\circ$, то ловушка заполнилась. Таким образом, время заполнения ловушки

$$t_{\text{fil}} = 2(\Delta t_1 - \Delta t_2) = 26 - 50 \mu\text{s}.$$

Азимутальная скорость, с которой плазма заполняет ловушку, равна

$$V_{\text{fil}} = \frac{\pi r}{t_{\text{fil}}} = (2 - 3) \cdot 10^4 \text{ m/s}, \quad (1)$$

где r — средний азимутальный радиус ловушки, равный 0.28 m.

Измерение электронной температуры, концентрации, времени существования и постоянной времени удержания плазмы в ловушке

Типичные осциллограммы сигналов с электрического зонда и интерферометра приведены на рис. 7 и 8 соответственно. В действительности было сделано большое

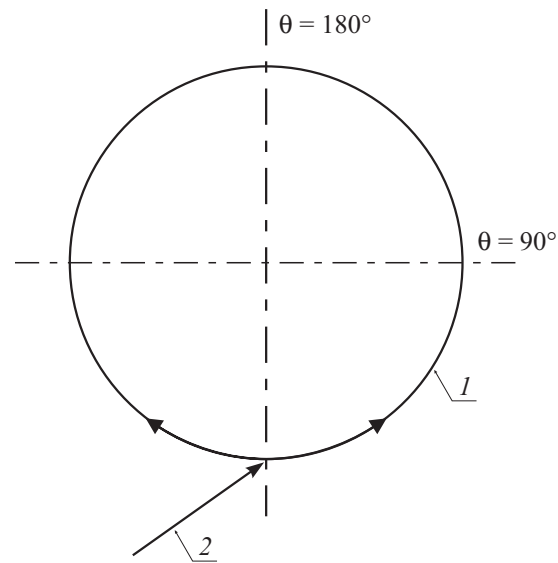


Рис. 5. Схема инъекции плазмы и ее растекания по азимуту: 1 — азимутальная ось ловушки, 2 — линия инъекции.

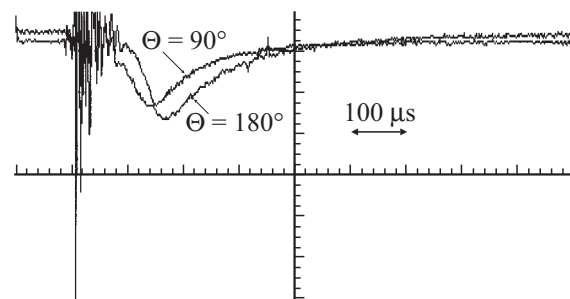


Рис. 6. Сигналы электронного тока на электрические зонды, разнесенные по азимуту.

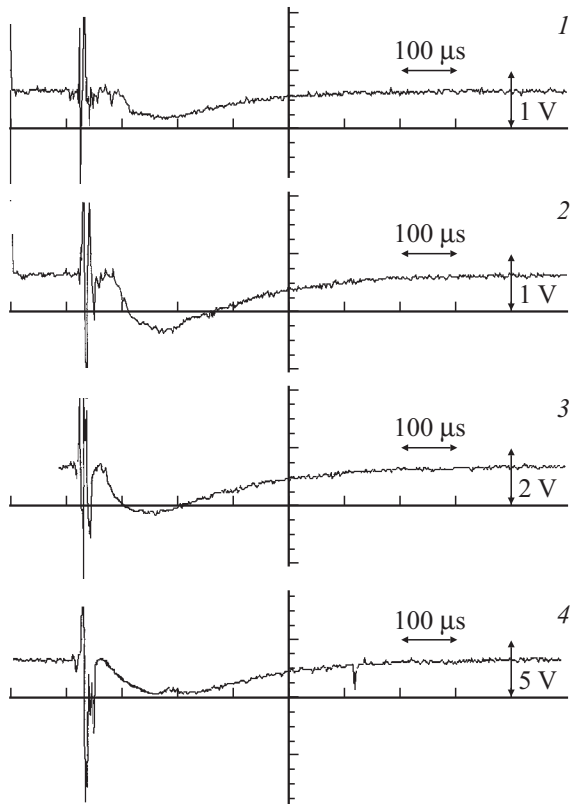


Рис. 7. Сигналы электронного тока с электрического зонда: 1 — $B_{\text{bar}} = 0.025$, 2 — 0.05, 3 — 0.075, 4 — 0.1 Т.

количество „выстрелов“ пушки и обработано множество осциллограмм с зондов и интерферограмм для различных B_{bar} . Приведенные ниже результаты соответствуют средним значениям параметров, полученных в разных „выстрелах“.

По положению максимума сигнала на осциллограммах зондов можно оценить время заполнения плазмой ловушки, оно составляет $t_{\text{fil}} \sim 50 \mu\text{s}$, что совпадает с оценкой этого времени, приведенной ранее. По вольт-амперным характеристикам зонда была определена электронная температура, а по формуле Бома — максимальная концентрация плазмы для различных величин барьерного магнитного поля B_{bar} .

На рис. 9 приведены зависимости электронной температуры (кривая 1) и максимальной концентрации (кривая 2), полученные из зондовых и интерферометрических измерений. Из рисунка видно, что электронная температура увеличивается по линейному закону от 17.5 до 21 eV при изменении B_{bar} от 0.025 до 0.1 Т. Максимальная концентрация немонотонно возрастает с ростом B_{bar} и достигает значения $n_{\text{max}} \approx 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ при $B_{\text{bar}} = 0.1$ Т.

Осциллограммы сигнала с имеющегося интерферометра указывают на то, что плотность плазмы вдоль СВЧ-луча с длиной волны 8.3 мм больше критической ($n_{\text{cr}} = 1.6 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$) [9,10], поэтому на осциллограммах наблюдается „стол“. После того как плотность

плазмы становится меньше критической, сигнал плавно убывает по экспоненте. В этом легко убедиться, построив зависимость натурального логарифма концентрации от времени для „хвостов“ сигналов с интерферометра. Расчеты показали, что эта зависимость хорошо аппроксимируется прямой. Продлив наблюдаемые кривые спада до времени $t = 50 \mu\text{s}$, когда, как указыва-

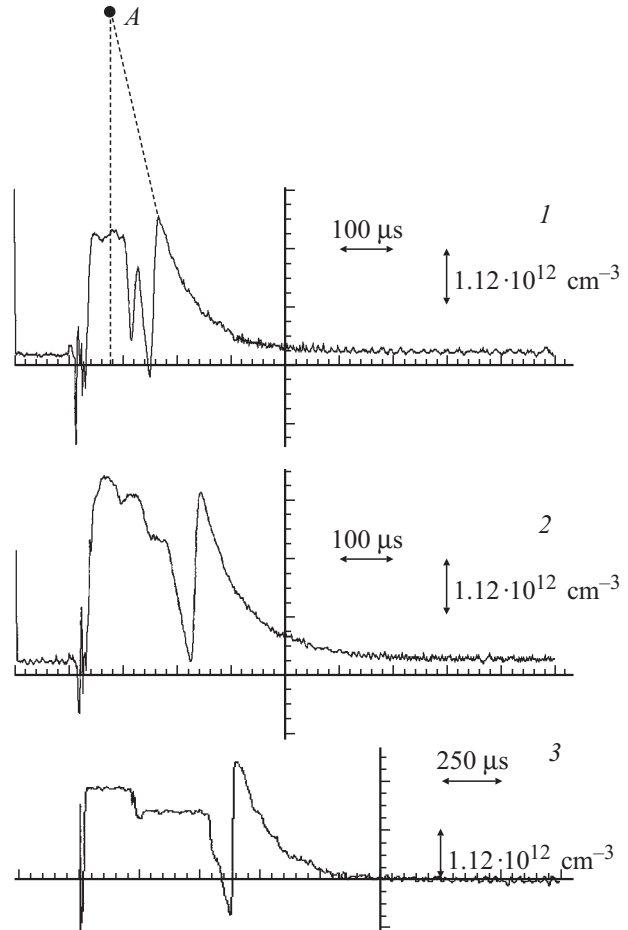


Рис. 8. Осциллограммы сигналов с интерферометра: 1 — $B_{\text{bar}} = 0.012$, 2 — 0.037, 3 — 0.1 Т.

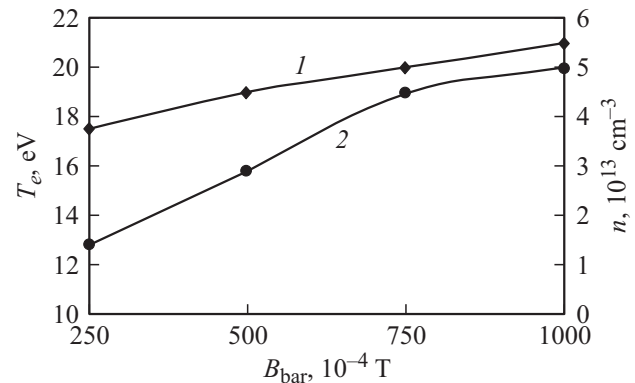


Рис. 9. Зависимость электронной температуры (1) и максимальной концентрации плазмы (2) от величины магнитного барьера.

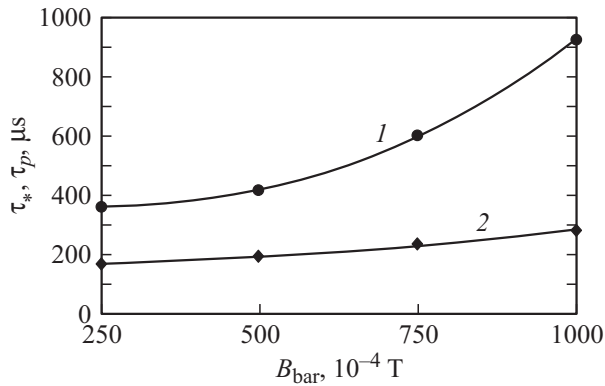


Рис. 10. Зависимость времени существования τ_* (1) и времени удержания плазмы τ_p (2) в ловушке от величины барьерного магнитного поля.

ют сигналы с зондов, плотность достигает максимума, можно определить эту плотность для разных B_{bar} . На рис. 8 (кривая 1) ордината точки А соответствует максимальной концентрации. Для $B_{\text{bar}} = 0.1 \text{ T}$ получаем $n_{\text{max}} = (3-5) \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Отметим, что резкие провалы кривых на „столах“ интерферограмм носят аппаратную природу.

Время существования и постоянная времени удержания плазмы в ловушке определялись с помощью СВЧ-радиоинтерферометра и электрических зондов. Рупоры интерферометра располагались на азимуте $\theta = 90^\circ$ по линии $r = 0.28 \text{ m}$ симметрично относительно $z = 0$. В качестве электрических зондов использовались торцевые зонды, собирающая поверхность которых была ориентирована так же, как и при измерении времени заполнения ловушки плазмой.

Осциллограммы с интерферометра, полученные для разных B_{bar} , позволяют определить зависимость времени существования плазмы в ловушке от величины барьерного магнитного поля. Это время τ_* определялось как время от начала заполнения до момента, когда сигнал на осциллограмме достигал некоторого условного значения, соответствующего концентрации, приблизительно в 20 раз меньшей максимальной. Полученный результат приведен на рис. 10 (кривая 1), где нанесены точки для различных серий экспериментов, а линия проведена при аппроксимации средних значений с помощью многочлена. Из рисунка видно, что время существования плазмы в ловушке растет с увеличением барьерного магнитного поля быстрее, чем по линейному закону, и достигает $\tau_* \sim 1 \text{ ms}$ при $B_{\text{bar}} = 0.1 \text{ T}$.

Постоянные распада τ_p плазмы в ловушке определялись временем, в течение которого концентрация частиц падает в e раз. Найденные в результате обработки зондовых сигналов величины τ_p при различных B_{bar} изображены на рис. 10 (кривая 2). Аналогичные данные были получены и в результате обработки интерферограмм.

Из этих данных следует, что $\tau_p \sim T_e^{3/2}$. Это соответствует классическим переносам:

$$\tau_p \sim \frac{\delta^2}{\beta_0} (T_e)^{3/2}. \quad (2)$$

Здесь δ — ширина магнитного барьера, β_0 — отношение плазменного давления к барьерному магнитному давлению. Сравнение значений τ_p , полученных на установке „Галатее-3“ и „Галатее-3М“, показывает, что, в отличие от концентрации n и электронной температуры T_e , величина τ_p возросла сравнительно мало. Скорее всего, это связано с изменением β_0 .

Энергия плазмы в ловушке. Некоторые оценки

Измерение энергии проводилось с помощью калориметра и датчиков Пельтье [1], которые помещались на азимуте $\theta = 90^\circ$. Эксперименты показали, что при увеличении магнитного поля энергосодержание плазмы растет (рис. 11). Среднее значение энергии плазмы в ловушке при $B_{\text{bar}} = 0.1 \text{ T}$ равно $W_1 = 110 \text{ J}$. С учетом интегрального характера измерений полученное значение W_1 находится в разумном соответствии со значением W_0 , приведенным ранее. Значение W_1 на два порядка больше, чем было получено ранее, до модернизации установки „Галатее-3“.

С помощью измеренных величин можно оценить некоторые параметры плазмы в ловушке.

Характерное число частиц с энергией ионов $\varepsilon_i = 100 \text{ eV}$, захваченных ловушкой при $B_{\text{bar}} = 0.1 \text{ T}$, равно

$$N = \frac{W_1}{\varepsilon_i} = 6 \cdot 10^{18}, \quad (3)$$

что составляет почти столько же частиц, сколько вышло из плазмоведа, концентрация плазмы в объеме $V = 90 \text{ l}$ при $B_{\text{bar}} = 0.1 \text{ T}$ равна

$$n = \frac{N}{V} = 7 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}. \quad (4)$$

Эта величина близка к тем значениям плотности, которые были получены с помощью зондов и интерферометра.

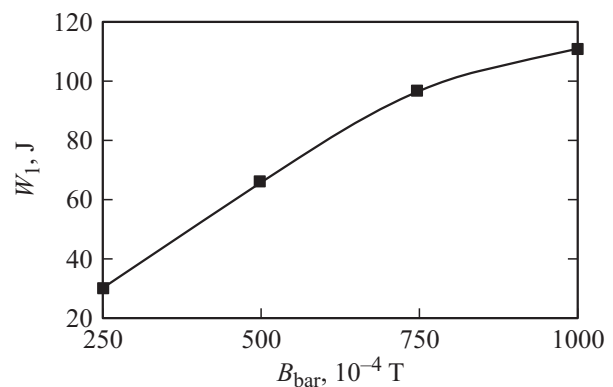


Рис. 11. Зависимость энергосодержания плазмы в ловушке от величины магнитного барьера.

Если $T_e + T_i = (2/3) \cdot \varepsilon_i$, для $\varepsilon_i = 100$ eV, при указанной плотности давление плазмы P_{pl} составит

$$P_{pl} = \frac{2}{3} n \varepsilon_i = 7.5 \cdot 10^2 \text{ Pa} = 7.5 \cdot 10^3 \text{ dyn/cm}^2. \quad (5)$$

Магнитное давление P_{mag} :

$$P_{mag} = \frac{B_{bar}^2}{2\mu_0} = 4 \cdot 10^3 \text{ Pa} = 4 \cdot 10^4 \text{ dyn/cm}^2, \quad (6)$$

$$\beta_0 = \frac{P_{pl}}{P_{mag}} \approx 0.19. \quad (7)$$

Подчеркнем, что β_0 — это формальное („эффективное“) значение, а не величина β в основном объеме плазмы в ловушке, где $\beta \gg 1$.

Энергосодержание плазмы W_l уменьшается с течением времени за счет диффузии частиц через боковую поверхность Окавы, потерь энергии на державки W_{hold} и миксины W_{mix} .

Измерения показали, что величины W_{hold} и W_{mix} равны 15 и 30 J соответственно.

Выводы

1. Проведенная модернизация источника питания плазменной пушки позволила значительно увеличить параметры плазменного сгустка, инжектируемого в ловушку, а увеличение магнитного поля самой ловушки позволило захватить в ловушку сгусток с энергией ионов 100 eV и концентрацией частиц $\sim 10^{15} \text{ cm}^{-3}$. Это, в свою очередь, привело к повышению параметров плазмы, удерживаемой в самой ловушке: температура электронов $T_e \sim 20$ eV, ионов $T_i \sim 40$ eV, концентрация $\sim 5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-3}$, энергосодержание плазмы ≥ 110 J. Рассчитанное эффективное значение β_0 составило ~ 0.2 , что подтверждает возможность работы ловушек „Галатей“ при β , близких к единице.

2. Максимальное время удержания частиц составило $\tau_p \sim 300 \mu\text{s}$ при $B_{bar} = 0.1$ Т. Регистрируемое время существования плазмы в ловушке (снижения концентрации в 20 раз) составило $\tau_* \sim 800\text{--}900 \mu\text{s}$ при барьерном магнитном поле $B_{bar} = 0.1$ Т. Оно приблизительно в 3 раза больше, чем τ_p . Сравнительно малое возрастание τ_p по сравнению со значениями τ_p , полученными на установке „Галатей-3“, по-видимому, связано с изменением β .

Авторы выражают благодарность сотрудникам МИРЭА А.С. Пушкину и И.А. Тарелкину за активную помощь в проведении экспериментов, а также сотрудникам ТРИНИТИ В.И. Васильеву и В.М. Струнникову за ценные советы и обсуждение результатов экспериментов.

Работа выполнена в рамках контракта с Росатомом № 1.05.19.05.547 от 1 апреля 2005 г.

Список литературы

- [1] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М. и др. // Физика плазмы. 2006. Т. 32. № 3. С. 195–206.
- [2] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 1. С. 65–70.
- [3] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М. и др. // Тез. докл. XXX Звенигородской конф. по физике плазмы и УТС. Звенигород. 2003. С. 70.
- [4] Morozov A.I., Bugrova A.I., Bishaev A.M. et al. // Proc. of the 30th Europ. Phys. Soc. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Physics. St. Petersburg, 2003. Paper-P 2.199.
- [5] Kerst D.W., Ohkawa T. // Nuovov Cimento. 1961. Vol. 22. P. 784.
- [6] Морозов А.И., Бугрова А.И., Бишаев А.М. и др. // Письма в ЖТФ. 2006. Т. 32. Вып. 21. С. 50–55.
- [7] Кнопфель Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля. М.: Мир, 1972.
- [8] Белоусов Н.И., Яковлева А.И., Саакян А.Е. Электрические кабели, провода и шнуры. М.: Энергия, 1979.
- [9] Hutchinson I.H. Principles of plasma diagnostics. Cambridge: Cambridge University Press, 1988. P. 18.
- [10] Лукьянов С.Ю. Горячая плазма и управляемый ядерный синтез. М.: Наука, 1975.