

МГД УСТОЙЧИВОЕ УДЕРЖАНИЕ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЛАЗМЫ

*В.Н.Бочаров, Н.А.Завадский, А.В.Киселев, С.Г.Константинов,
А.М.Кудрявцев, О.К.Мыскин, В.М.Панасюк, Ф.А.Цельник*

В эксперименте на установке СВИПП получена МГД устойчивая плазма с плотностью 10^{13} см⁻³ и энергией вращения 250 эВ/ион.

По существующим представлениям вращающаяся плазма в аксиально-симметричной открытой ловушке может быть устойчива, если плотность n растет с радиусом^{1, 2}. Условие центробежной стабилизации $\frac{dn}{dr} > 0$ совместимо с требованием энергоизоляции, если профили плотности $n(r)$ и скорости вращения $V(r)$ таковы, что $\frac{\partial}{\partial r}(nV^2) < 0$, а на границе $nV^2 = 0$. Согласно³ МГД устойчивые профили подобного вида существуют, и их реализация составляет задачу эксперимента, который ведется на установке СВИПП ("стабилизация вращения и профилем плотности"). Ее схема приведена на рис. 1.

Для формирования нужного профиля плотности на внешней границе ($r = 13$ см) генерируется оболочка из плотной плазмы⁴, поддерживающая профиль с $\frac{dn}{dr} > 0$ на краю области, где $V \neq 0$, и образующая переходной слой между вращающейся плазмой и лайнером: на внешней границе оболочки $\frac{dn}{dr} < 0$, но зато $V = 0$ ¹.

Вращение плазмы в области удержания обусловлено продольными потоками частиц – электрическим контактом с торцевыми электродами. Каждый электрод состоит из десяти металлических колец, разделенных изоляторами. В обсуждаемых режимах на электроды подавался относительно лайнера потенциал $\varphi_0 = 10$ кВ (по 1 кВ на зазор); магнитное поле в центре $H = 8$ кЭ; пробочное отношение – 3. Оказалось, что после включения инжектора оболочки (φ_0 и H устанавливаются заранее) ловушка заполняется плазмой за время

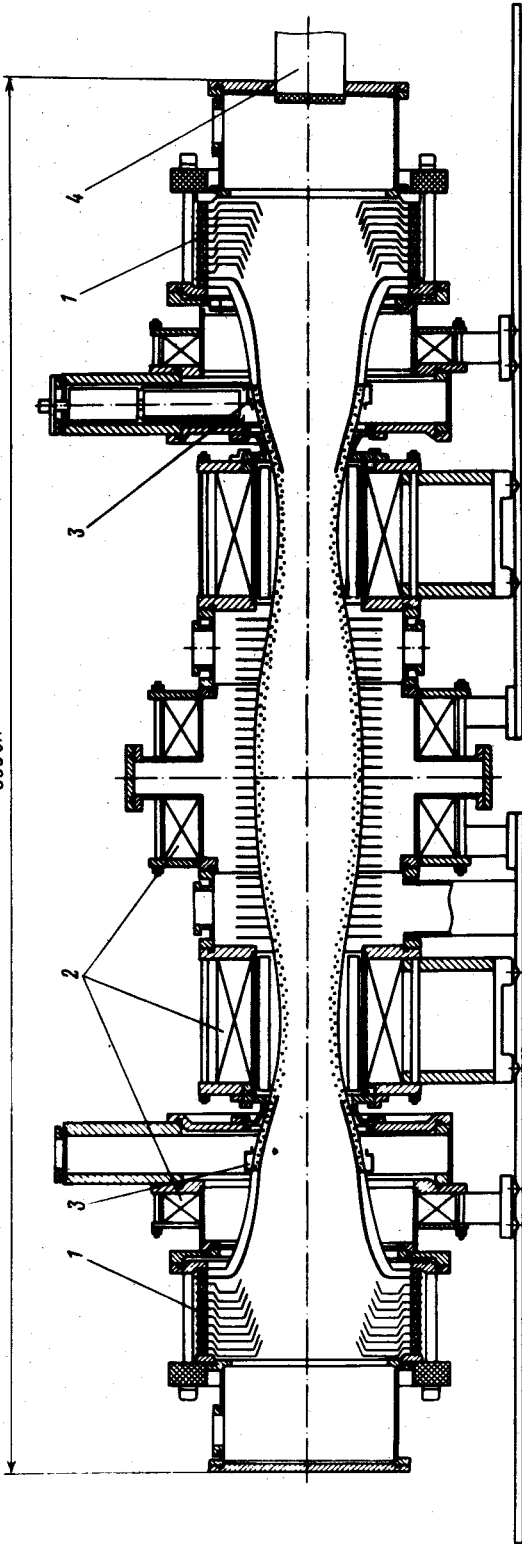


Рис. 1. 1 — торцевые электроды; 2 — катушки магнитного поля; 3 — инжекторы оболочки; 4 — волновод gyrotrона

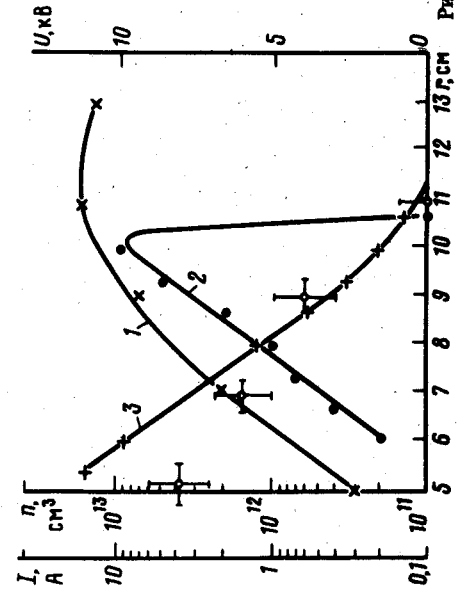


Рис. 2

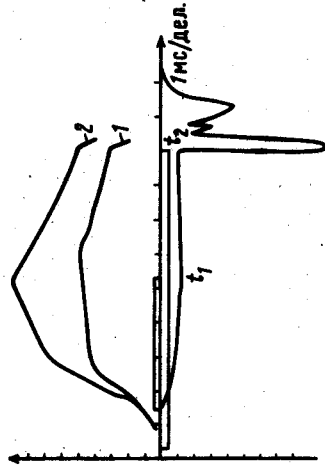


Рис. 3

Рис. 2. Профили: 1 — плотность; 2 и 3 — токи и потенциалы торцевых электродов; \circ — потенциал плазмы
 Рис. 3. 1 — дивергентный сигнал плазмы; 2 — то же с включенным gyrotrоном; 3 — рентгеновское излучение с лайнера. В момент t_1 выключается gyrotrон; в момент t_2 — оболочка

около 1 мс. Профили плотности $n(r)$ и потенциала $\varphi(r)$ в центральной плоскости представлены на рис. 2. Они измерены по перезарядке пучка He^0 ⁵. Отвечающие этому режиму токи и потенциалы торцевых электродов даны на рис. 2 с пересчетом по силовым линиям в центральную плоскость.

Температура электронов, измеренная по томсоновскому рассеянию на $r = 10,5$ см, равна $10 \div 12$ эВ. По спектру атомов перезарядки, регистрируемых детектором с импульсной газовой мишенью ⁶, средняя энергия ионов в системе отсчета, где плазма покоится, оценивается в 200 эВ. Оценка полного энергосодержания, подтверждаемая измерением диамагнетизма, дает при рассчитанной по данным рис. 2 вкладываемой мощности величину энергетического времени жизни плазмы $\tau_3 \sim 0,1$ мс. Следовательно, в ловушке нет по крайней мере, самых грубых центробежных неустойчивостей с инкрементом порядка V/r .

Для более точного утверждения следовало бы исключить влияние на время жизни потерь, уменьшающих τ_3 и в устойчивой плазме: перезарядки, кулоновского рассеяния, возможных разрядов в электродных узлах.

Использование "меченых" частиц позволяет судить об устойчивости несмотря на эти потери. Как известно (см., например, ⁷), при СВЧ нагреве плазмы на ЭЦР в ряде случаев генерируется небольшая по плотности группа электронов с энергиями до десятков кэВ. Время жизни этих электронов по рассеянию в конус потерь ~ 100 мс; более быстрый уход возможен только при неустойчивости — дрейф в азимутальных электрических полях — и происходит примерно за то же время, что и распад основной плазмы по этому каналу. С другой стороны, за быстрыми электронами легко следить по дополнительному диамагнетизму и рентгеновскому излучению.

В опытах использовался гиротрон с $\lambda = 7,2$ мм, $P = 200$ кВт, $\tau = 1 \div 10$ мс ⁸. В типичных режимах в плазме поглощалось около 30 кВт в импульсе с $\tau = 4$ мс, и генерировались электроны с энергией до 50 кэВ. Их распределение по объему плазмы определялось по рентгеновскому излучению с мишеней, для чего синхронно с включением оболочки сбрасывались дробинки. В пределах плазменного кольца сигнал примерно постоянен, а у оси ($r < 4$ см) спадает до нуля. По осциллограммам рис. 3 время жизни горячих электронов составляет 5 — 7 мс, что свидетельствует о МГД устойчивости плазмы.

Выключение оболочки разрушает устойчивый режим. На рис. 3 этому моменту соответствует резкий спад диамагнетизма — как самой плазмы, так и быстрых электронов, — а также вспышка рентгеновского излучения с боковой стенки. Переход в неустойчивое состояние и распад плазмы занимают $30 \div 50$ мкс. Фотоснимки свечения плазмы, сделанные с торца установки посредством ЭОП 'а со временем экспозиции 1 мкс, обнаруживают заполнение приосевой области в процессе распада азимутально неоднородным потоком плазмы (отчетливо видны низшие азимутальные моды). Распад сопровождается всплеском тока на центральные кольца торцевых электродов. Одновременно снижается скорость вращения, и ловушка быстро заполняется газом вследствие рекомбинации распадающейся плазмы на лайнере.

Резкий переход в неустойчивое состояние указывает на независимость механизма стабилизации от контакта с торцами (определяющего эффекта в опытах с плазмой низкой плотности ⁹): выключение оболочки само по себе не может нарушить этот контакт за столь короткое время. Совокупность данных естественно интерпретировать как проявление центробежной стабилизации ¹⁻³.

Авторы признательны Б.Н.Брейзману за постоянные обсуждения.

Литература

1. Панасюк В.М., Цельник Ф.А. ФП, 1975, 1, 522.
2. Lehnert V. Phys. Scripta, 1976, 13, 317.
3. Брейзман Б.Н., Цельник Ф.А. ФП, 1983, 9, 1157.
4. Бочаров В.Н., Константинов С.Г., Кудрявцев А.М., Мыскин О.К., Панасюк В.М., Цельник Ф.А. ВАНТ, 1983, 3, 56.

5. Бочаров В.Н., Константинов С.Г., Кудрявцев А.М., Мыскин О.К., Панасюк В.М., Цельник Ф.А. ФП, 1984, 10, 870.
6. Кудрявцев А.М., Сорокин А.Ф., Цельник Ф.А. Сб. "Диагностика плазмы", 1981, вып. 4, 202, М.: Энергоиздат.
7. Ard W.B., Dandl R.A., Stetson R.F. Phys. Fluids, 1966, 9, 1498.
8. Агапов Л.Н., Богданов С.Д., Бочаров В.Н., Власов С.Н., Завадский Н.А., Киселев А.В., Константинов С.Г., Кудрявцев А.М., Курбатов В.И., Мыскин О.К., Панасюк В.М., Панкратова Т.Б., Петров С.П., Цельник Ф.А. ВАНТ, сер. Термоядерный синтез, 1985, №3, 17.
9. Константинов С.Г., Мыскин О.К., Сорокин А.Ф., Цельник Ф.А. ЖТФ, 1971, 41, 2527.

Институт ядерной физики
Академии наук СССР
Сибирское отделение

Поступила в редакцию
20 марта 1985 г.