

XXX Юбилейная Неделя науки СПбГТУ. Материалы межвузовской научной конференции. Ч. VI:

С. 78, 2002. © Санкт-Петербургский государственный технический университет, 2002.

УДК 533.916

**М.И.Патров (5 курс, каф. ФП), Ю.В.Петров, к.ф.-м.н., ст.н.с. (ФТИ им.Иоффе)**

## **ИССЛЕДОВАНИЯ МГД НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ НАЧАЛЬНОЙ СТАДИИ РАЗРЯДА ТОКАМАКА “ГЛОБУС-М”**

Первый в России сферический токамак “Глобус-М”, построен в ФТИ им.А.Ф.Иоффе в марте 1999 года, большой радиус установки  $R=0,36$  м, малый  $a=0,24$  м (аспектное отношение  $A=R/a=1,5$ ), проектная величина тока 0,5 МА [1]. Установки данного типа имеют ряд преимуществ, по сравнению с традиционными токамаками, описанные, например в [2].

Магнитогидродинамические (МГД) возмущения оказывают существенное влияние на разряд токамака и являются одной из основных причин ухудшения удержания плазмы и даже могут приводить к срыву. Исследования МГД неустойчивостей начальной стадии разряда позволяет оптимизировать ход разряда – относительно увеличивать продолжительность разряда и достигаемую величину тока плазмы. МГД неустойчивости в токамаках с малым аспектным отношением имеют свои особенности и пока недостаточно изучены.

Одной их технических особенностей токамака “Глобус-М” является то, что программирование разряда установки основано на поддержании фиксированного значения напряжения на обходе. Для достижения максимально возможных величин тока по плазме, при ограниченной величине тока центрального соленоида, немаловажным является вопрос эффективности расхода его вольт-секундной емкости. При этом на первый план выходят факторы, оказывающие сильное влияние на рост тока, каковыми являются равновесие и устойчивость.

На начальной стадии разряда, каждому цугу МГД колебаний соответствовало замедление роста тока, или даже его уменьшение. Как известно [3], скорость нарастания тока плазмы, во многом определяет устойчивость плазменного шнура по отношению к развивающимся МГД возмущениям. Это объясняется прямой зависимостью между скоростью роста и градиентом плотности тока, которая в приближении традиционного токамака выглядит так:  $a \cdot \partial J(r) / \partial r|_{r=a} = (2\sigma / c) \cdot dI_p(t) / dt$ , где  $\sigma$  – проводимость,  $I_p(t)$  – ток и  $J(r)$  – плотность тока плазмы. При превышении скорости роста определенного значения, профиль плотности тока, по-видимому, становится чрезмерно уплощенным, что является причиной усиления МГД активности. Ввиду последнего, возникал срыв или серия срывов, характеризующиеся падением тока плазмы на десятки кА. Умеренных скорости роста тока плазмы, по-видимому вызывало обострение профиля  $J(r)$ , ввиду чего происходило снижение МГД активности как начальной стадии разряда так и на всем его последующем протяжении.

Кроме снижения скорости нарастания плазменного тока, продемонстрирован другой эффективный способ обострения профиля тока – охлаждение периферии плазменного шнура [4]. Последнее достигалось путем последовательного увеличения интенсивности газонапуска рабочего газа (водорода), производимого в течение разряда.

Разряды с относительно низкой достигнутой концентрацией протекали преимущественно со срывом на стадии роста тока плазмы. Это обстоятельство можно было бы объяснить превышением скорости тока, при данных условиях разряда, определенного предела, выше которого могут развиваться неустойчивости, приводящие к срыву. Тогда можно было бы утверждать, что газонапуск в разрядах с повышенной концентрацией, вызывал охлаждение периферийной плазмы, достигаемое ввиду ее контакта с нейтральным газом, как следствие, вызывал обострение профиля тока [5].

Однако, при привлечении показаний радиометра (рабочая частота 37,5 ГГц), теоретические предпосылки наблюдаемого явления были скорректированы.

Дополнительный газонапуск, в данном случае, также обуславливает подавление развития МГД возмущений, но, по-видимому, вследствие другого механизма. В случае меньшей концентрации, каждый срыв на росте тока сопровождается не только всплесками МГД активности, но и падением сигнала радиометра. Это явление, по-видимому, можно объяснить тем, что в разряде с малой плотностью создаются благоприятные условия для появления ускоренных электронов. Это обстоятельство, сопровождается развивающимися МГД неустойчивостями на росте тока плазмы. Наступающие на росте тока срывы, связаны, по-видимому, со слишком низкой, для данного значения тока плазмы, концентрацией. Накопление ускоренных электронов, а затем их “сброс” в результате неустойчивости, очевидно, должны сопровождаться уменьшением энергосодержания и тока плазмы, отражение чего было замечено на уменьшении сигнала диамагнитной петли и сигнала с пояса Роговского.

Об ухудшении условий возникновения ускоренных (убегающих) электронов, при меньшей концентрации, говорит отношение тороидального электрического поля  $E_{\text{тор}}$  к полю Драйсера ( $E_{\text{д}}$ ) [3], т.к.  $E_{\text{д}} \approx 4\pi \cdot Z_{\text{эф}}^2 \cdot n_e \Lambda / T_e$ , то  $(E_{\text{тор}} / E_{\text{д}}) \propto n_e^{-1}$ , где  $\Lambda$  – кулоновский логарифм,  $T_e$ ,  $n_e$  – электронная температура и концентрация,  $Z_{\text{эф}}$  – эффективный заряд.

Ввиду описанных явлений, можно сделать вывод, что развитие МГД неустойчивостей и скорость роста тока плазмы взаимосвязаны. Рост тока и поддержание его в течение разряда, зависят от расходимой вольт-секундной емкости магнитной полоидальной системы токамака, которая была примерно одинакова для большинства разрядов.

Энергию, вкладываемую в плазму, представляется возможным охарактеризовать значением интеграла тока плазмы. В таком случае, более длительный разряд, с умеренной скоростью роста тока имеет больше вложенной энергии, в отличие от менее длительного, но с большей скоростью нарастания тока, при условии постоянства расходимых вольт-секунд. При этом, для разряда с большей скоростью роста тока, расход вольт-секундной емкости на начальной стадии меньше, но развивающиеся при этом МГД возмущения требуют значительного энерговклада на последующей стадии разряда. Разряд с меньшей скоростью нарастания, имеет больший расход вольт-секундной емкости на начальной стадии, но умеренная МГД активность впоследствии компенсирует это обстоятельство, что, в конечном счете, существенно увеличивает длительность разряда.

Таким образом, в ходе работы установлено, что для оптимизации режима работы установки, при учете необходимости достижения больших токов по плазме и длительного поддержании их в течение разряда, следует проводить разряды с умеренной скоростью роста тока, что вызывает лишь умеренную МГД активность и дает возможность экономии вольт-секундной емкости центрального соленоида, которую возможно использовать для существенного (до 30%) увеличения длительности разряда. Разряды с высокой скоростью роста тока, хотя и дают возможность достижения больших величин токов при меньшем расходе имеющихся в наличии мощностей, однако оказываются гораздо менее длительными ввиду повышенной МГД активности, развивающейся в течение всего разряда. Также в работе показано, что подавление МГД возмущений на начальной стадии разряда возможно путем дополнительного дозированного газонапуска.

#### ЛИТЕРАТУРА:

1. В.К.Гусев и др., ЖТФ, т.69, вып.9, 1999.
2. Y.-K.M.Peng, D.J.Strickler, Nucl. Fusion, vol. 26, 1986.
3. С.В.Мирнов “Физические процессы в плазме токамака”, М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. С.В.Мирнов, И.Б.Семенов, Физ. плазмы, Т.4, вып.1, 1978.
5. Е.П.Горбунов, С.В.Мирнов, Д.С.Парфенов, Nucl. Fusion, 10, 43, 1970.