

02;04;12

Измерение радиационных потерь в сферическом токамаке ГЛОБУС-М

© Б. Фэн, П.Г. Габдуллин, В.Г. Кагралов, Б.В. Кутеев,
А.С. Смирнов, В.К. Гусев, С.И. Лашкул,
Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров

С.-Петербургский государственный политехнический университет
E-mail: root@phtf.stu.neva.ru
Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

Поступило в Редакцию 15 января 2003 г.

Проведены первые измерения абсолютных значений радиационных потерь в сферическом токамаке ГЛОБУС-М. Доля радиационных потерь составляет около 30% от вкладываемой в разряд мощности, что свидетельствует о достаточно высокой чистоте плазмы в установке. Радиационные потери такого уровня следует учитывать при определении энергетического времени жизни плазмы. Предложена методика калибровки болометра по данным других диагностик на фазе роста тока, дающая 15%-ное совпадение с данными калибровки на стенде.

Сферические токамаки, активно создаваемые и исследуемые в последние годы [1] как потенциальные магнитные ловушки для управляемого термоядерного синтеза, являются интересным физическим объектом с недостаточно изученными свойствами плазмы. Их особенностью является малое аспектное отношение $A = R/a \sim 1.5$, где R , a — большой и малый радиусы тора. Уменьшение A , с одной стороны, подчеркивает тороидальные эффекты в плазме, а с другой, позволяет существенно повысить (до 40%) эффективность использования магнитного поля B , характеризующуюся отношением $\beta = nT/(B^2/8\pi)$

давлений плазмы и магнитного поля. Токамак ГЛОБУС-М (ФТИ им. А.Ф. Иоффе) [2] является современной установкой с характеристиками разряда, типичными для установок среднего масштаба ($a = 0.24$ м, большой радиус $R = 0.36$ м, магнитное поле $B = 0.6$ Т, ток разряда $I = 0.3$ МА).

Интегральный баланс энергии в установке определяется уравнением

$$\frac{\partial W}{\partial t} = P_{OH} - \frac{W}{\tau_E} - P_{rad},$$

где W — запас энергии в плазме, P_{OH} — мощность омического нагрева, τ_E — энергетическое время жизни плазмы.

Исследования транспортной составляющей удержания энергии и определение энергетического времени жизни τ_E требуют знания мощности радиационных потерь P_{rad} . Кроме того, соотношение радиационных и транспортных потерь характеризует содержание в плазме примесей, что существенно для оценки качества плазмы, создаваемой в токамаке.

В данной работе приводятся результаты первых измерений радиационных потерь в токамаке ГЛОБУС-М, полученные с использованием широкообзорного пироэлектрического болометра [3]. Область плазмы, наблюдаемая болометром, представлена на рис. 1, *a, b*. Особенностью сферического токамака является то, что вследствие малых размеров центрального стержня наблюдаемый болометром объем плазмы близок к полному объему плазмы V . Для условий данных экспериментов он составлял $0.8 V$. Учитывая, что излучение неравномерно распределено по объему и прижато к пристеночной области, для оценки доли регистрируемого излучения были проведены расчеты для профилей вида $I = I(\rho/a)^2$ и $I = I(\rho/a)^4$, учитывающих рост радиационных потерь вблизи стенок камеры. Доля принимаемого болометром излучения составляет, согласно расчетам, в этих случаях 0.785 и 0.695 соответственно. Данные оценки показывают, что болометр наблюдает основную долю излучения плазмы даже в случае прижатого к поверхности излучения. Это обстоятельство снимает проблемы традиционных токамаков, связанные с необходимостью экстраполяции данных локальных измерений излучения на весь объем установки.

Типичный первичный сигнал болометра показан на рис. 2, *a*. Калибровочные эксперименты, проведенные с использованием лазера, показали, что постоянная времени дифференцирования болометра составляет 30 ms, а чувствительность 1.43 V·см²/W. Восстановленный с учетом

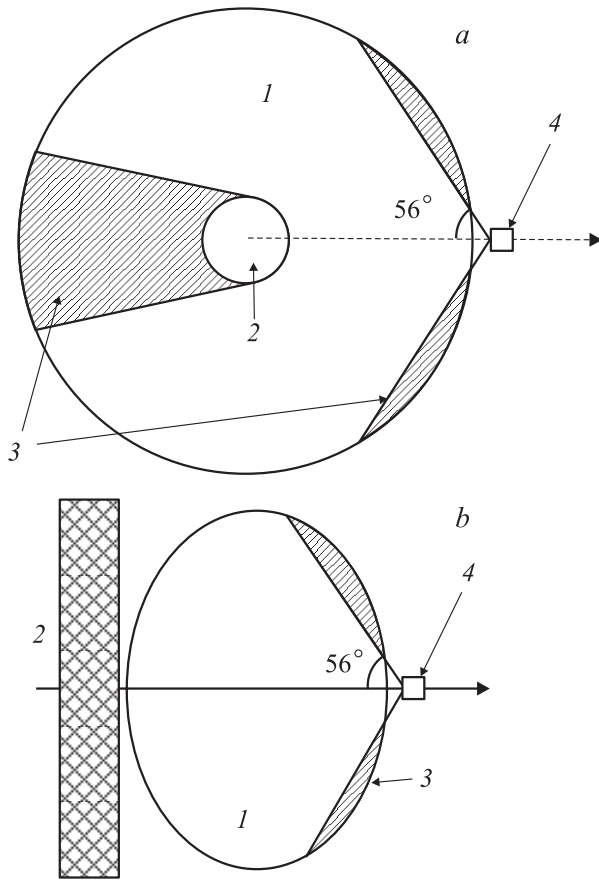


Рис. 1. Блок-схема наблюдений излучения плазмы в сферическом токамаке ГЛОБУС-М: *a* — вид сверху, *b* — вертикальное сечение токамака в месте установки пироэлектрического болометра. *1* — зона наблюдений, *2* — центральный стержень, *3* — область тени, *4* — болометр.

постоянной дифференцирования сигнал показан на том же рисунке. Излучение плазмы растет со временем и в целом следует изменениям тока по плазме (рис. 2, *b*).

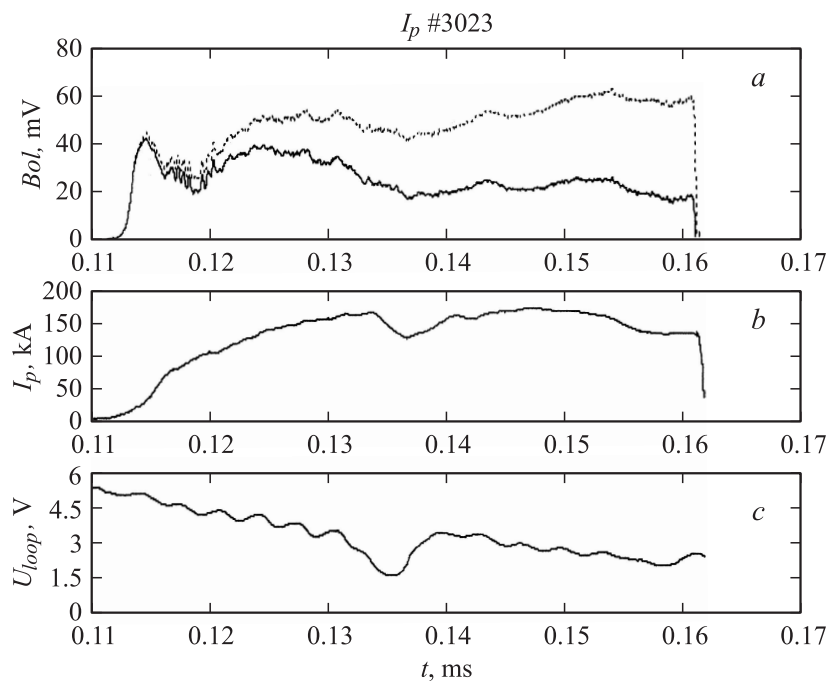


Рис. 2. Набор сигналов диагностик токамака ГЛЮБУС-М. Импульс № 3023. *a* — первичный (штриховая линия) и восстановленный (сплошная) сигналы болометра, *b* — ток, *c* — напряжение на обходе тора, *d* — омическая мощность (штриховая) и мощность радиационных потерь (сплошная), *e* — отношение мощности радиационных потерь к омической, *f* — линейная плотность плазмы по центральной хорде.

Для абсолютной калибровки болометра принимаемая им мощность нормировалась на мощность омического нагрева в момент максимума мощности излучения. При расчетах омической мощности из мощности, вкладываемой в плазму, I^*U вычиталась реактивная составляющая.

Как видно из рис. 2, *a*, максимум излучения достигается вблизи 118 ms. К этому моменту времени ток разряда уже достаточно велик (40 кА), так что магнитная конфигурация сформировалась. В то

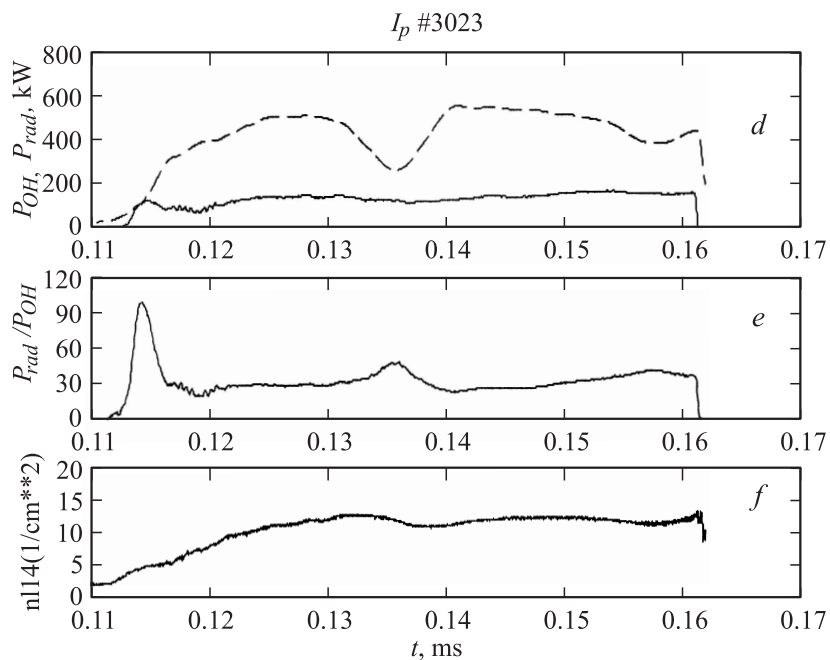


Рис. 2 (продолжение).

же время температура и плотность плазмы еще низки, поэтому можно пренебречь транспортными потерями плазмы по сравнению с радиационными. Пренебрегается также производной энергосодержания, поэтому в итоге дается оценка радиационных потерь сверху. Указанная калибровка болометра с точностью 15% совпала с данными лазерной калибровки. Предложенный способ может быть рекомендован для постоянной абсолютной калибровки болометров в условиях экспериментов на токамаках, когда трудно гарантировать сохранение поглощающих свойств поверхности болометра. Как видно из рис. 2, e , после достижения максимума отношение радиационной мощности к омической резко уменьшается до уровня 0.25, а затем отношение медленно растёт, не превышая в средней части разряда 0.3–0.4.

№ импульса	I_p , кА	U_{loop} , В	Bol , В	N_{142} , 10^{14} cm^{-2}	P_{rad} , кВт	P_{OH} , кВт	P_{rad}/P_{OH} , %	H_α , о.е.
3021	152	3.23	5.56	10.6	167	468	35.6	15
3022	155	3.32	5.85	10.5	173.8	493	35.2	15
3023	160	3.3	5.89	12.1	175.6	488.5	35.9	12
3024	140	3.32	5.89	12.5	178	451	39.5	26
3025	154	3.31	5.89	15.4	169	487	34.7	55
3026	156	3.3	5.82	16.1	175	519	33.6	57
3033	66	4.4	2.56	5.8	85	277	31	164

Для различных параметров разряда отношение радиационных потерь к омической мощности в средней части разряда приведено в таблице. Как видно, радиационные потери не превышают 40% от омической мощности. Данный факт свидетельствует о достаточно высокой чистоте плазмы, достигнутой в экспериментах. В то же время радиационные потери достаточно велики для того, чтобы существенно влиять на измерения энергетического времени удержания плазмы.

Список литературы

- [1] Sykes A. // Controlled Fusion and Plasma Physics. December 2000. V. 40. Suppl. 11 B. P. A127.
- [2] Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З. и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 9. С. 58.
- [3] Фэн Б., Габдуллин П.Г., Капралов В.Г. и др. // Материалы 7 Междунар. конф. „Инженерные проблемы термоядерных реакторов“. С.-Петербург, 27–30.10.2002. С. 196.