

04

О роли графитового покрытия стенок камеры в экспериментах по ИЦР нагреву плазмы в сферическом токамаке ГЛОБУС-М

© Б.Б. Аюшин, В.И. Варфоломеев, В.К. Гусев,
В.В. Дьяченко, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров,
С.А. Хитров, Ф.В. Чернышев, О.Н. Щербинин

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург
E-mail: o.shcherbinin@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 14 мая 2008 г.

Приводятся сравнительные результаты экспериментов по ионно-циклотронному нагреву плазмы на сферическом токамаке Глобус-М в смеси водорода и дейтерия. Анализируются результаты экспериментов за длительный период времени, когда поэтапно проводилась облицовка внутренней поверхности камеры графитовыми пластинами. Зарегистрировано монотонное уменьшение эффективности нагрева по мере заполнения камеры графитом, что может быть объяснено ростом поглощения ВЧ-мощности в облицовке стенок. Приводятся результаты численного моделирования.

PACS: 52.50.Qt, 52.55.Fa

Эксперименты по ионному циклотронному нагреву плазмы на установке Глобус-М (большой радиус тора 36 см и малый 23 см) начались несколько лет тому назад [1]. Осуществлялся сценарий экспериментов, когда ввод ВЧ-мощности производился на ионной циклотронной частоте водородных ионов, существующих в дейтериевой плазме в виде примеси, с помощью одной или двух однопетлевых антенн. Эксперименты велись на частотах 7–9 МГц при магнитном поле 0.4 Т и плотности плазмы на оси разряда до $5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-3}$. Нагрев плазмы происходил главным образом за счет циклотронного затухания быстрых магнитозвуковых (БМЗ) волн, а также по механизмам магнитной накачки и Ландау. Численное моделирование поглощения [2] показало, что эффективность однопроходного поглощения возбуждаемых антенной

волн в условиях сферического токамака Глобус-М весьма невелика. Поглощение волн в объеме камеры оказалось подобным поглощению в многомодовом резонаторе с невысокой добротностью. Практически это означало, что поглощение наступало после многократного прохождения волны поперек плазменного объема и соответственно многократных отражений от стенок камеры.

Как известно, в технологии проведения термоядерных экспериментов большое внимание уделяется чистоте атомного состава плазмы — наличие примесей металлов признается чрезвычайно вредным обстоятельством, резко ограничивающим возможность получения горячей и устойчивой плазмы. Для борьбы с поступлением тяжелых примесей в плазму внутренние поверхности стенок камеры чаще всего покрывают либо пластинами графита специальных сортов, либо другими материалами с малым атомным весом. На токамаке Глобус-М применяется первый из этих методов. Для покрытия камеры использовались пластины рекристаллизованного графита с добавкой титана (типа RGTi) [3]. Причем покрытие производилось поэтапно, в течение нескольких экспериментальных периодов. В результате внутренняя поверхность камеры приняла вид, показанный на рис. 1. В левой части рисунка видна центральная колонна (1), далее — верхний и нижний купола (2 и 3) и покрытие наружных стенок (4). Хорошо видна излучающая часть антенны, с которой снято защитное фронтальное покрытие из нитрида бора.

Во время первых экспериментов по ионно-циклотронному нагреву плазмы (2002–2003 гг.) [4] внутри камеры была облицована графитом только центральная колонна (зона 1 на рис. 1). В этих экспериментах при вводе 120 kW мощности было зарегистрировано почти удвоение ионной температуры (от 180 до 320 eV). Измерения ионной температуры производились методом энергетического анализа потока нейтральных атомов, покидающих плазменный объем.

На следующих этапах работы токамака (с 2004 г.) были покрыты графитом верхний и нижний купола (зоны 2 и 3 на рис. 1). В этих условиях значительного снижения эффективности нагрева не произошло. Был зарегистрирован нагрев на 200 eV при вводе 200 kW ВЧ-мощности. Однако на последнем этапе (2007 г.), когда была покрыта графитом поверхность камеры со стороны слабого магнитного поля (зона 4 на рис. 1), произошло резкое снижение эффективности нагрева. В это же самое время заметно улучшились такие характеристики

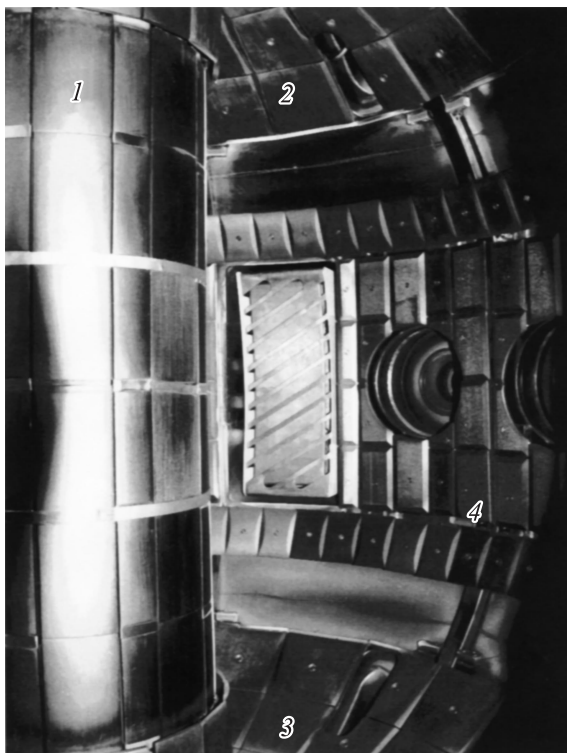


Рис. 1. Вид внутренней поверхности камеры, облицованной графитовыми плитками.

разряда, как его устойчивость и длительность. Для проверки влияния покрытия зоны 4 на ВЧ-нагрев значительная часть графита из этой зоны была временно снята. При этом возобновился заметный нагрев ионов. На рис. 2 для сравнения показаны временные зависимости ионной температуры при вводе ВЧ-мощности, снятые для двух последних случаев. Импульс № 19193 был получен в период работы с полным графитовым покрытием. Импульс № 21298 — при работе без графитового покрытия зоны 4. В нижней части рисунка показан ход ВЧ-мощности для обоих случаев в условных единицах. Сплошная кривая

4* Письма в ЖТФ, 2009, том 35, вып. 2

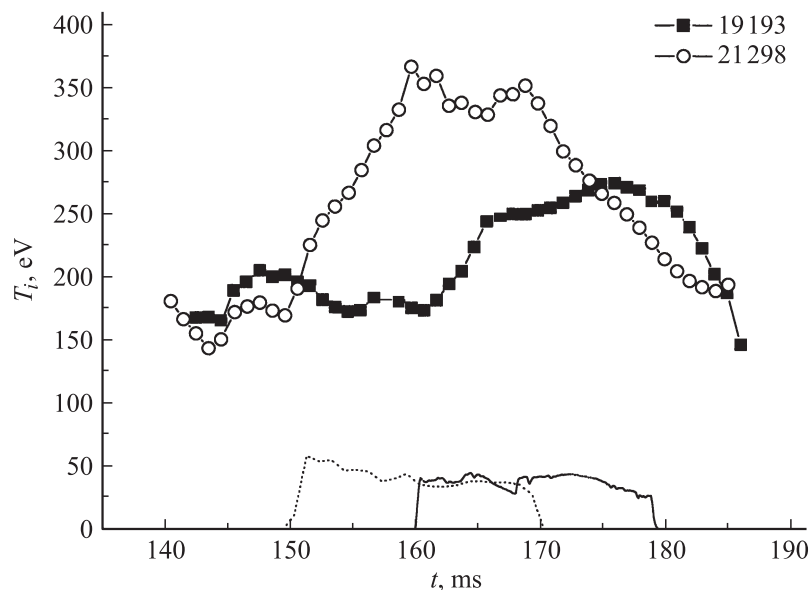


Рис. 2. Поведение ионной температуры плазмы при ионно-циклотронном нагреве в разных условиях экспериментов.

соответствует импульсу № 19193, пунктирная — № 21298. Уровень вводимой мощности в обоих импульсах был около 120 kW. Следует отметить, что покрытие стенок камеры графитом не оказало негативного воздействия на нагрев плазмы методом инъекции высокоэнергетичного нейтрального пучка, исследования которого проводились параллельно все эти годы [5]. В то же время спектральные измерения показали, что при проведении экспериментов по дополнительному нагреву плазмы без покрытия зоны 4 графитом как методом инъекции нейтрального пучка, так и методом ионно-циклотронного нагрева происходит загрязнение плазмы примесями тяжелых металлов.

Для численного моделирования описанного эффекта использовалась модель, которая применялась для расчетов распространения и поглощения БМЗ волн в токамаке Глобус-М [6]. Была лишь модифицирована часть программы, касающаяся работы антенны. В первоначальной версии программы предполагалось, что плазма (с некоторым вакуумным

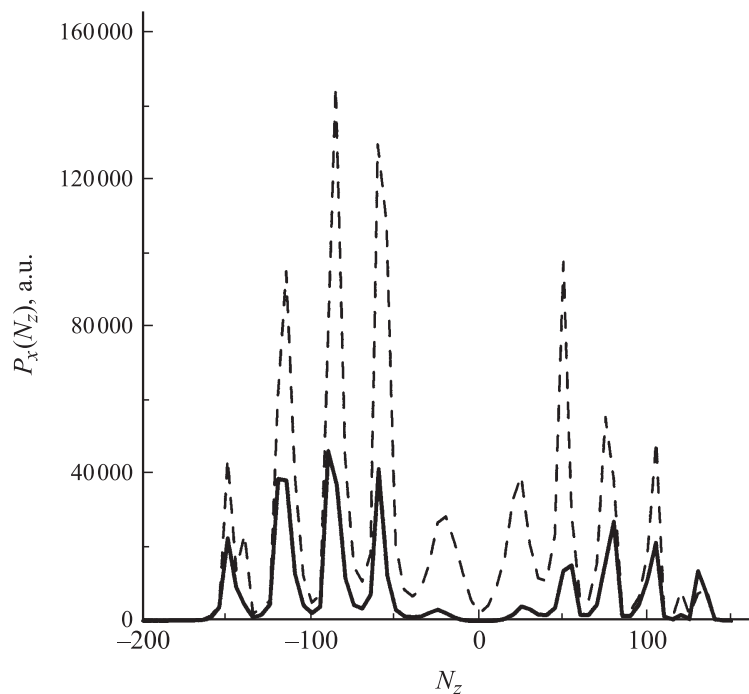


Рис. 3. Расчетные спектры возбуждаемых в плазме волн. Пунктир — случай отражающих стенок, сплошная кривая — случай поглощающих стенок.

зазором) была окружена идеально отражающей стенкой. Теперь же предполагается, что волны, падающие на стенку, полностью поглощаются в ней без отражения. На рис. 3 показаны спектры волн, входящих в плазму, подсчитанные по обеим версиям для одинаковых параметров плазмы и одинаковых ВЧ-токов в антенне. Пунктиром показан спектр, сосчитанный для случая с отражающей стенкой камеры, а сплошной линией — для случая поглощающей стенки. Пики на спектре соответствуют неким пространственным резонансам, возникающим в плазме со слабым поглощением. Из рисунка видно, что при включении в расчеты идеально поглощающих стенок излучаемая в плазму мощность уменьшается более чем в 2 раза.

Следует иметь в виду, что поверхность камеры в зоне 4 имеет форму цилиндра высотой около 500 mm, в среднюю часть которого в экваториальной плоскости врезаны патрубки, в том числе и для антенны. Скорее всего, именно эта часть внутренней поверхности камеры и отвечает за переотражение волн. Можно предположить, что замена покрытия внутренних стенок в этой зоне с графита на вольфрам улучшит ситуацию с ВЧ-нагревом плазмы.

Результаты работы представляются важными для постановки экспериментов по ВЧ-нагреву плазмы в малых токамаках.

Выполнение этой работы поддерживалось грантом РФФИ № 05-02-17763.

Список литературы

- [1] *Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З.* др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 9. С. 58.
- [2] *Ирзак М.А., Трегубова Е.Н., Щербинин О.Н.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25 (8). С. 659; *Irzak M.A., Tregubova E.N., Shcherbinin O.N.* // Plasma Physics Reports. 1999. V. 25 (8). P. 659.
- [3] *Gusev V.K., Alimov V.Kh., Arkhipov I.I.* et al. // Proc. of the 13th Int. Conf. on Fusion Reactor Materials. 2007. Nice, France, Dec. 10–14.
- [4] *Гусев В.К., Дьяченко В.В., Чернышев Ф.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 16. С. 58–64; *Gusev V.K., Dyachenko V.V., Chernyshev F.V.* et al. // Tech. Phys. Lett. 2004. V. 30 (8). P. 690–692.
- [5] *Аюшин Б.Б., Барсуков А.Г., Гусев В.К.* и др. // Физика плазмы. 2008. Т. 34 (2). С. 99–113.
- [6] *Shcherbinin O.N., Chernyshev F.V., Dyachenko V.V.* et al. // Nuclear Fusion. 2006. V. 46 (8). S592–S597.