

04

## Концепция ионного циклотронного нагрева плазмы в сферическом токамаке Глобус-М2

© О.Н. Щербинин, В.В. Дьяченко, В.К. Гусев, В.И. Варфоломеев,  
Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров

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

Поступило в Редакцию 28 февраля 2012 г.

Приводятся результаты расчетов сопротивления связи антенны с плазмой сферического токамака Глобус-М2 при увеличении тороидального магнитного поля, а также профили поглощения ВЧ мощности компонентами плазмы. Обсуждается концепция антенны для ввода БМЗ волн в плазму.

Исследования дополнительного нагрева плазмы на сферическом токамаке Глобус-М ( $R_0 = 36$  см и  $a_0 = 24$  см) начались несколько лет тому назад [1,2]. В течение последних лет был получен ряд важных результатов по удержанию быстрых частиц [3], из которых стала ясной значимость повышения тороидального магнитного поля.

Эксперименты по ионному циклотронному нагреву проводились в режиме фундаментального циклотронного резонанса для примеси легких ионов водорода в дейтериевой плазме с помощью однопетлевой антенны, расположенной в экваториальной трубке со стороны слабого магнитного поля [4]. В большинстве проведенных экспериментов тороидальное магнитное поле на оси равнялось 0.4 Т, а частота генератора 7.5 МГц. При этом зона фундаментального резонанса для водорода располагалась на 5 см глубже геометрической оси камеры

установки. Особенностью экспериментов в сферических токамаках является сильная радиальная вариация магнитного поля (примерно в 4 раза). Поэтому в сечении токамака одновременно должны присутствовать несколько зон поглощения, связанных с расположением гармоник циклотронного резонанса. Следовательно, сразу же можно было опасаться расположения одной из таких зон непосредственно перед антенной, так как поглощение волны вблизи антенны привело бы к снижению эффективности нагрева из-за плохого удержания нагретых частиц. Именно это обстоятельство определило наш выбор сценария экспериментов на частотах, близких к фундаментальной, так как при работе на высоких циклотронных гармониках в камере всегда будет находиться несколько из них и до центральных областей плазмы будет доходить меньшая часть введенной мощности.

Важным фактом, который был установлен в экспериментах и подтвержден численными расчетами, оказалось достаточно эффективное поглощения ВЧ волн (в отличие от традиционных токамаков) при высокой относительной концентрации водорода в плазме  $S_H$ . Это явилось следствием того, что из-за большого радиального градиента магнитного поля в сферических токамаках все зоны непрозрачности становятся малыми по сравнению с длиной волны. Реально в плазме с ростом относительной концентрации водорода  $S_H$  происходит смена доминирующего механизма поглощения — от поглощения в зоне фундаментального резонанса к поглощению в области ион-ионного гибридного резонанса (он расположен еще на несколько сантиметров глубже). Но при этом общая эффективность поглощения не падает, а, как оказалось, даже несколько возрастает.

В связи с разработкой конструкции модифицированного токамака Глобус-М2 с увеличенным тороидальным магнитным полем и током плазмы необходимо было проверить, как изменятся условия для ионного циклотронного нагрева, т. е. как скажется увеличение магнитного поля и тока до 1.0 и 0.5 МА соответственно, а также и других параметров плазмы на условиях ионно-циклотронного нагрева плазмы при сохранении общей концепции экспериментов. С самого начала ясно, что пропорционально увеличится рабочая частота и уменьшится длина волны (как вакуумная, так и в плазме). Так как геометрические размеры установки сохраняются, а следовательно, и градиенты полей, надо проверить, как повлияет на прохождение и поглощение волн некоторое изменение соотношения между шириной всех резонансных зон и

длиной волны. По-видимому, эффективность резонансного поглощения должна возрасти, а эффективность прохождения барьеров несколько понизиться.

Для этого использовалась разработанная ранее методика [5], когда плазма сферического токамака упрощенно представлялась в виде бесконечно высокого плазменного столба с постоянными по вертикали параметрами, а радиальная зависимость параметров принималась подобной ожидаемой зависимости в экваториальной плоскости реального токамака. Антенна располагалась на внешней стороне камеры, а противоположная стенка рассматривалась как идеально отражающая волны поверхность. В этой геометрии вычислялись матрица поверхностного импеданса плазмы и сопротивление связи антенны с плазмой, определялся спектр возбуждаемых волн и рассчитывался профиль поглощения ВЧ мощности каждой компонентой плазмы по отдельности. Прежде всего следовало прояснить, как параметры модернизированного Глобуса-М2 влияют на глобальную эффективность поглощения волн. Поскольку магнитное поле увеличивается в 2.5 раза (с 0.4 до 1.0 Т), настолько же могла бы увеличиться и локальная резонансная частота: с 7.5 до  $\sim 18$  МГц. Однако для более эффективного удержания горячих ионов желательно сдвинуть резонансную зону на 5 см наружу до совпадения с магнитной осью. Поэтому резонансную частоту следует принять равной 15 МГц. На рис. 1 для стандартной одиночной антенны (длина токовой шины — 34 см, ширина — 12 см) показано, как по мере роста магнитного поля и резонансной частоты возрастает сопротивление связи антенны с плазмой. В той же степени возрастает вклад ВЧ мощности в плазму при неизменной амплитуде тока в антенне (т. е. примерно вдвое).

Другим преимуществом увеличения рабочей частоты является более благоприятное для нагрева ионов распределение вклада мощности между различными компонентами плазмы. Данные расчетов для относительной концентрации водорода в дейтериевой плазме,  $C_H = 10\%$ , приведены в таблице. Видно, что вклад мощности в ионные компоненты при увеличении тороидального поля в установке возрастает, а вклад в электронный компонент (за счет магнитной накачки) становится слабее.

В экспериментах, проведенных на Глобусе-М при тороидальном поле 0.4 Т, было показано, что в отличие от ситуации в токамаках

1\* Письма в ЖТФ, 2012, том 38, вып. 19

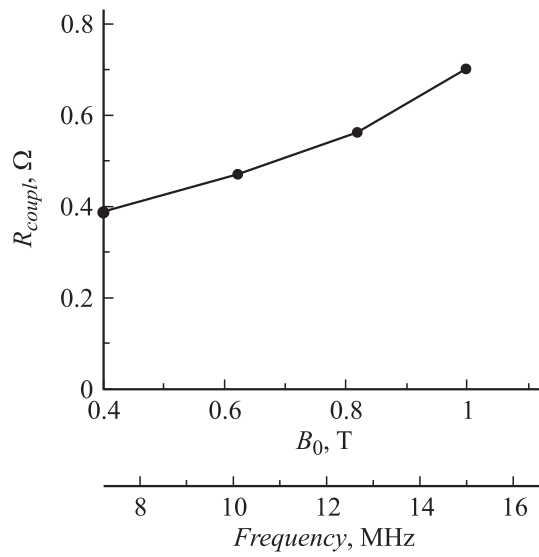
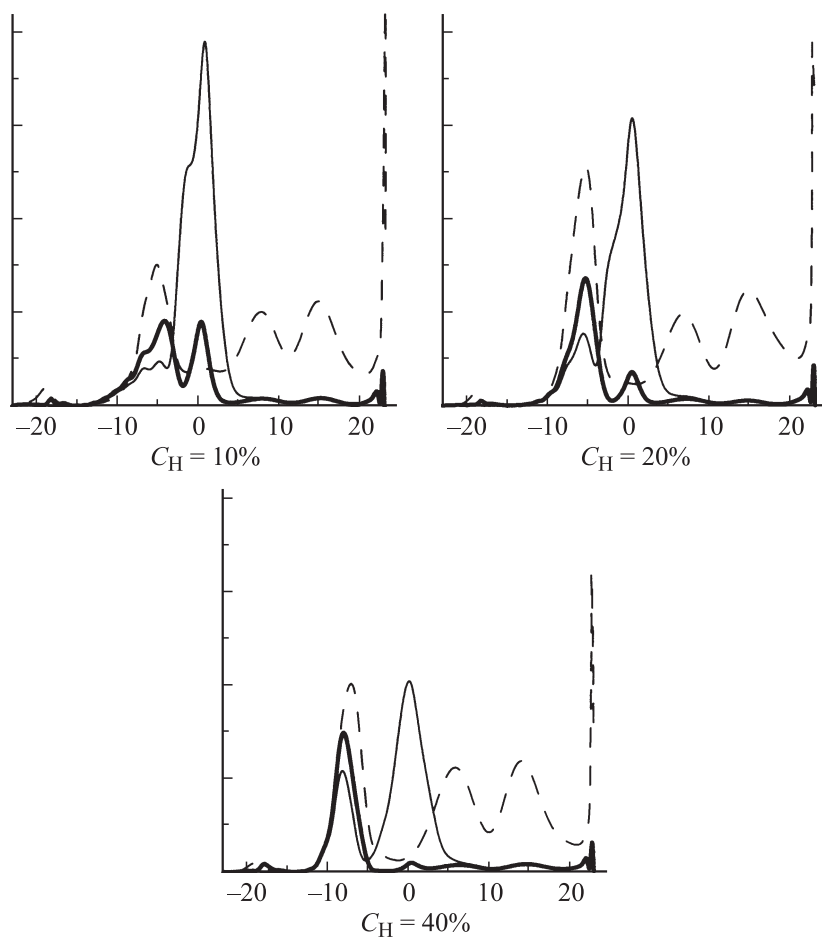


Рис. 1. Сопротивление связи антенны с плазмой.

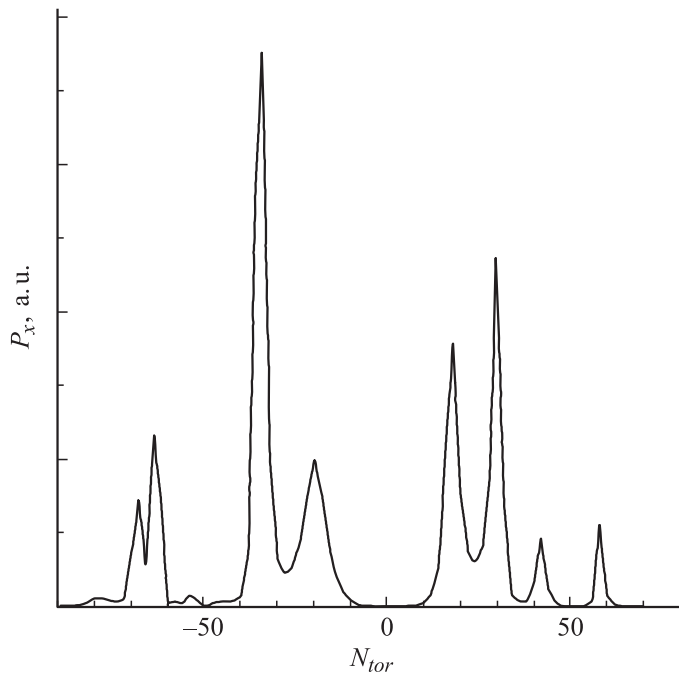
Сорт частиц	Доля мощности при 0.4 Т	Доля мощности при 1.0 Т
$e^-$	0.641	0.46
$p^+$	0.260	0.38
$d^+$	0.099	0.16

традиционного типа эффективность ионного нагрева с ростом концентрации примеси легких ионов (водорода) не падает. Для Глобуса-М2 также были проведены расчеты профилей поглощения при различных добавках водорода. Результаты расчетов для  $C_H = 10, 20$  и  $40\%$  приведены на рис. 2 (по горизонтальной оси отложен малый радиус в см). Радиальные профили поглощения в относительных единицах показаны для дейтерия — жирной линией, для водорода — тонкой, для электронов — пунктиром. Видно, что с ростом  $C_H$ , как и раньше, снижается эффективность поглощения мощности ионами в окрестности ионного циклотронного резонанса для водорода (при малом радиусе



**Рис. 2.** Профили поглощения ВЧ мощности компонентами плазмы (в отн. единицах).

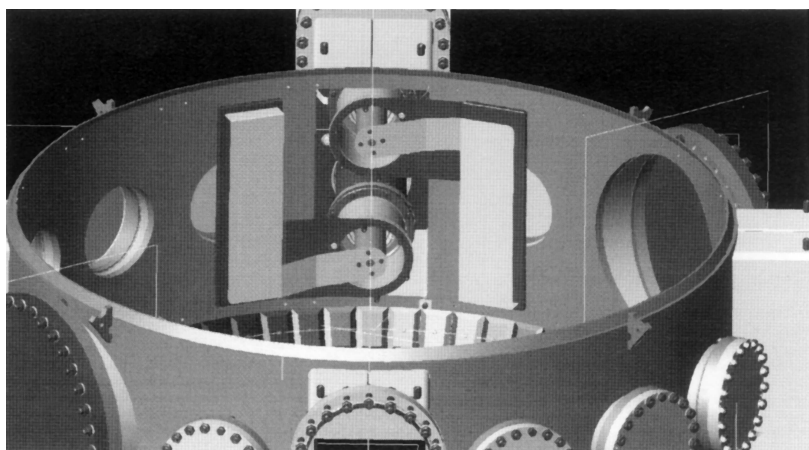
$r = 0$  см), но зато возрастает поглощение в условиях ион-ионного гибридного резонанса (при  $r = -5$  —  $-9$  см). Однако в новых условиях зона поглощения сдвинется к центру, что должно улучшить удержание горячих ионов. Заметного ослабления проникновения волны в область ион-ионного гибридного резонанса не наблюдается.



**Рис. 3.** Спектр возбуждаемых антенной волн.

В этих расчетах также учитывалось, что в экспериментах на Глобусе-М2 будет использоваться двухпетлевая антенна с противофазным возбуждением токов (две шины шириной 8 см с расстоянием между осями 40 см). Расчетный спектр волн, возбуждаемый такой антенной в плазме при  $C_H = 40\%$ , показан на рис. 3. Резонансные пики в спектре возникают из-за отражения волн от дальней стенки, а провалы при  $N_{tor} = \pm 50$  — результат резонансного „гашения“ волны с длиной 40 см (т.н. „антирезонанс“). Провал в окрестности  $N_{tor} = 0$  обусловлен противофазным включением токовых шин.

Расположение антенны на внутренней стенке камеры токамака изображено на рис. 4. Показана лишь экваториальная часть вакуумной камеры. Защитные экраны антенны на рисунке удалены. Противофазность возбуждения достигается за счет подвода мощности к противо-



**Рис. 4.** Расположение двухпетлевой ВЧ антенны на внутренней стенке камеры.

положным концам токовых шин. Правда, в этой конструкции уже не будет возможности радиального перемещения антенны. Но изменять расстояние от антенны до границы плазмы по-прежнему будет можно путем смещения центра плазменного тока управляющими полями.

В заключение можно сделать следующие выводы:

1. Повышение магнитного поля в сферическом токамаке Глобус-М2 благоприятно скажется на сопротивлении связи антенны с плазмой, что позволит с большей эффективностью использовать ВЧ генератор, а увеличение тока плазмы улучшит удержание быстрых ионов.

2. Распределение вводимой мощности между частицами плазмы сдвигается в пользу ионной компоненты.

3. По-прежнему важную роль в поглощении волн будет играть ион-ионный гибридный резонанс, что позволит работать с увеличенными добавками водорода в дейтериевую плазму.

4. Использование сдвоенной антенны с противофазным возбуждением тока в шинах позволит уменьшить долю слабо замедленных волн в излучаемом спектре и, как следствие, ослабить взаимодействие ВЧ мощности со стенками камеры. При этом можно ожидать уменьшения поступления примесей в плазму.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, ГК № 16.552.11.7002 и № 16.518.11.7003, а также грантом Правительства РФ № 11.G34.31.0041.

### **Список литературы**

- [1] *Гусев В.К., Голант В.Е., Гусаков Е.З.* и др. // ЖТФ. 1999. Т. 69. В. 9. С. 58.
- [2] *Гусев В.К., Дьяченко В.В., Чернышев Ф.В.* и др. // Письма в ЖТФ. 2004. Т. 30. В. 16. С. 58.
- [3] *Чернышев Ф.В., Аюшин Б.Б., Гусев В.Г.* и др. // Физика плазмы. 2009. Т. 35. В. 10. С. 903.
- [4] *Shcherbinin O.N., Chernyshev F.V., Dyachenko V.V.* et al. // Nuclear Fusion. 2006. V. 46. P. 592.
- [5] *Ирзак М.А., Трегубова Е.Н., Щербинин О.Н.* // Физика плазмы. 1999. Т. 25. В. 8. С. 659.