

## Нагрев плазмы в токамаке ТО-1 при возбуждении спектра магнитно-звуковых колебаний плазменного шнура

ИВАНОВ Н. В., КОВАН И. А., СИЛУЯНОВ В. В., ШВИНДТ Н. Н.

УДК 621.039.643

Как показано ранее [1, 2], для дополнительного нагрева плазмы в токамаке при определенных условиях могут быть использованы магнитно-звуковые колебания плазменного шнура, возбуждаемые с помощью локального петлевого возбуждателя. В этих условиях проводящая камера токамака, заполненная плазмой, представляет собой резонатор, обладающий спектром собственных колебаний и конечной добротностью, связанной с поглощением энергии колебаний в объеме и стенках. Трудность возбуждения такого резонатора состоит в том, что возбуждатель должен размещаться в узком зазоре между стенкой камеры и плазменным шнуром, ограниченным диафрагмой. Близость плазмы и стенки создает опасность электрических пробоев и тем самым снижает допустимые напряжения на возбуждателе и вводимую в плазму высокочастотную мощность. Кроме того, в результате экранирующего действия проводящей камеры практически при любой конструкции возбуждателя связанные с ним поля будут сосредоточены вблизи стенки, даже если петля охватывает плазменный шнур. Это уменьшает связь резонатора с источником колебаний.

Из теории резонаторов известно, что активное сопротивление, вносимое при резонансе в возбуждающую петлю, пропорционально добротности резонатора и квадрату площади петли. Поэтому для ввода максимальной мощности в плазму при допустимых напряжениях на петле целесообразно выбирать такие условия, когда добротность резонатора велика и для возбуждения можно использовать низкоиндуктивные петли малых размеров. Разумеется, нагрев плазмы окажется эффективным, если диссипация волн в объеме будет превалировать над поглощением в стенках.

Нестабильность собственных частот плазменного резонатора и его высокая добротность затрудняют непрерывное поступление ВЧ-энергии в плазму. При этом, как отмечалось в работе [1], для нагрева плазмы существуют две возможности. Одна из них предполагает поддерживать колебания определенных типов с помощью широкополосного усилителя, охваченного обратной связью через плазму, другая — использование генератора фиксированной частоты, соответствующей квазинепрерывному

участку спектра собственных колебаний плазменного шнура.

Целью настоящей работы являлось измерение параметров разряда в токамаке ТО-1 при нагреве плазмы на квазинепрерывном спектре собственных колебаний, когда уровень вводимой ВЧ-мощности соизмерим с мощностью омического нагрева плазмы. Предыдущие эксперименты [2] показали, что при малом уровне ВЧ-мощности наблюдался эффективный нагрев ионов, который регистрировался по спектру атомов перезарядки и по эффекту Доплера на линии CV высокоионизированной примеси. Нагрев сопровождался возрастанием диамагнетизма плазмы, смещением плазменного шнура наружу и увеличением тока регуляторов равновесия плазмы. В настоящей работе этим характеристикам разряда уделено наибольшее внимание

### Конструкция возбуждателя

Для нагрева плазмы использован автогенератор, работающий на частоте 47 Мгц в режиме импульсной модуляции. ВЧ-энергия от генератора поступала по коаксиальному кабелю на возбуждатель, конструкция которого показана на рис. 1. Возбуждатель вводился в тороидальную камеру установки с большим и малым радиусами 60 и 18 см через боковой патрубок и представлял собой петлю диаметром 32 см, соединенную с коаксиальным фидером. Петля и фидер были изготовлены из нержавеющей стали и не изолировались от плазмы с помощью диэлектрика. Вакуумная и электрическая развязки осуществлялись с помощью алундового изолятора, размещенного вне соленоида продольного магнитного поля. Чтобы уменьшить концентрацию плазмы вблизи возбуждателя, петлю располагали между двумя молибденовыми диафрагмами с диаметром отверстия 25 см, отстоящими друг от друга на расстоянии 20 см. Ток, протекающий по петле, измерялся магнитным зондом, помещенным в специальный контейнер с алундовым изолятором на конце.

Особенностью работы данной конструкции возбуждателя является нелинейная зависимость тока петли от величины приложенного ВЧ-напряжения. При больших амплитудах масштаба киловольт ток, измеряемый магнитным зондом, пропорционален напряжению и не зависит от

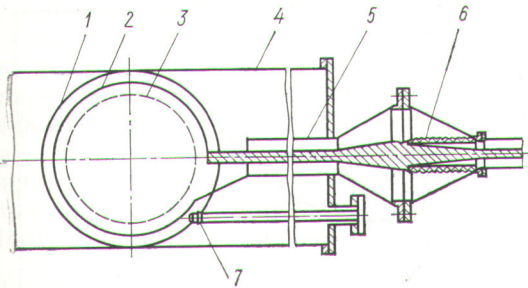


Рис. 1. Конструкция ВЧ-возбудителя:

1 — тороидальная камера; 2 — петля возбуждителя; 3 — проекция диафрагмы; 4 — боковой патрубок; 5 — коаксиальный фидер; 6 — изолятор; 7 — контейнер магнитного зонда.

появления плазмы. В противоположность этому при малых амплитудах в несколько вольт сигнал с зонда исчезал на время разрядного импульса токамака, что можно объяснить шунтированием возбуждителя токами через плазму в тени диафрагмы. Следует также отметить, что без защитных диафрагм шунтирование возбуждителя наблюдалось при всех приложенных напряжениях вплоть до 20 кВ.

### Результаты экспериментов

Представление о поведении ряда характеристик плазмы в течение разрядного импульса в токамаке, полученных при напряженности продольного магнитного поля на оси камеры 8,5 кэ и начальном давлении водорода  $3 \times 10^{-4}$  торр, дает рис. 2. Как следует из рисунка, включение генератора приводило к изменению хода концентрации плазмы и интенсивности линии CV во времени, а также к некоторому возрастанию напряжения разряда. Такие изменения не наблюдались ранее (см. [2]) при малом уровне вводимой ВЧ-мощности.

Можно указать две вероятные причины подъема концентрации плазмы: увеличение потока нейтральных атомов из области возбуждителя и возрастание времени жизни заряженных частиц, связанное со стабилизирующим действием магнитно-звуковой волны на дрейфовые колебания плазмы [3]. Изменение интенсивности линии CV естественно объяснить ростом концентрации электронов.

На рис. 3 приведены осциллограммы протектированных с магнитных зондов сигналов и временная зависимость постоянной составляющей мощности, отдаваемой генератором плазме. Первый зонд, расположенный возле возбуждителя, применялся для измерения на-

пряжения на петле. Второй зонд, регистрировавший продольную по отношению к оси камеры составляющую ВЧ-магнитного поля, отстоял от возбуждителя на  $90^\circ$  относительно главной оси тора и находился в тени диафрагмы. По форме сигнала с второго зонда можно судить о последовательном возбуждении пространственных гармоник собственных колебаний плазменного шнура при изменении концентрации плазмы.

На рис. 4 показано изменение ионной температуры после включения ВЧ-генератора. Температура измерялась с помощью сканирующего интерферометра Фабри — Перо по доплеровскому уширению линии CV (2274 Å). Контур линии регистрировался за 100 мксек.

Возрастание энергосодержания плазмы, определявшегося по диамагнитному эффекту, смещение плазменного шнура наружу и увеличение тока регулятора равновесия при ВЧ-нагреве представлены на рис. 5, а. В данном режиме

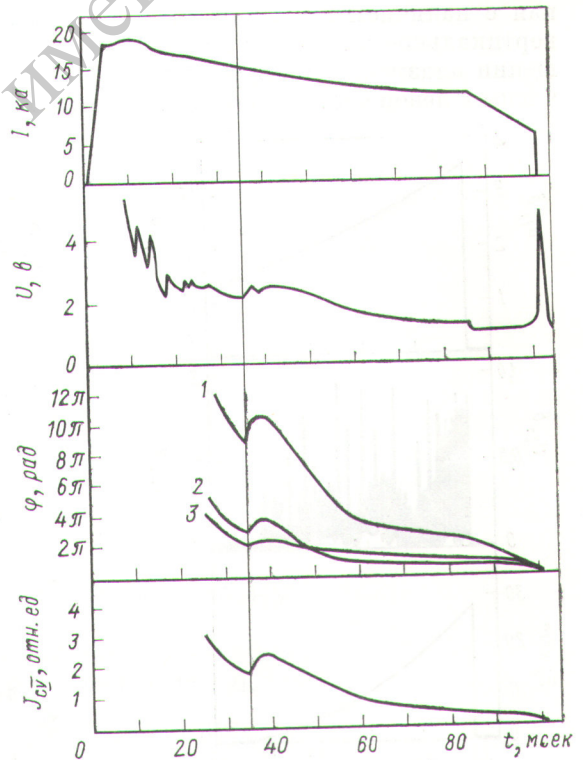


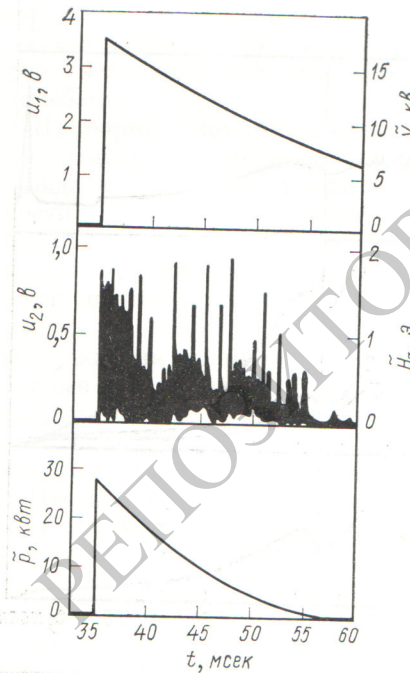
Рис. 2. Изменение по времени тока и напряжения разряда, фазового сдвига 4-миллиметрового интерферометра при зондировании в вертикальном направлении по диаметру (кривая 1) и хордам, отстоящим на 7,5 см наружу (кривая 2) и внутрь (кривая 3) от центра камеры, и интенсивности линии CV. Момент включения ВЧ-генератора показан вертикальной линией.

разряда исходный уровень полного энергосодержания плазмы перед включением ВЧ-генератора составлял  $\sim 40$  Дж. Без включения генератора изменение энергосодержания во времени в интервале от 35 до 55 мсек не превышало 20%.

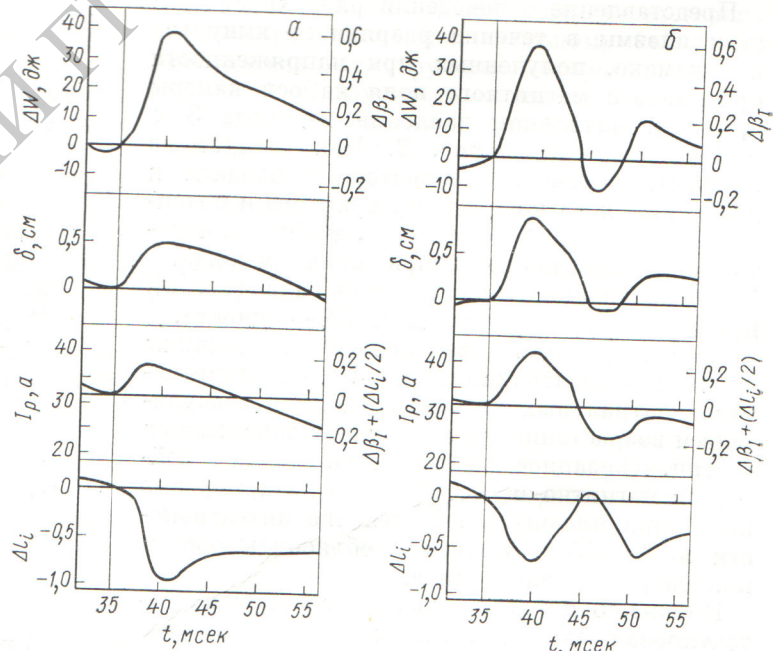
Равновесие плазмы в токамаке ТО-1 без проводящего кожуха обеспечивается регуляторами, создающими в камере токамака вертикальное магнитное поле, пропорциональное смещению шнура и величине разрядного тока [4]. Баланс сил, действующих на плазменный шнур в направлении большого радиуса тора [5], дает следующее уравнение равновесия:

$$\ln \frac{8R}{a} + \beta_I + \frac{1}{2} l_i - \frac{3}{2} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial L}{\partial R} = \frac{cRH_{\perp}}{I}$$

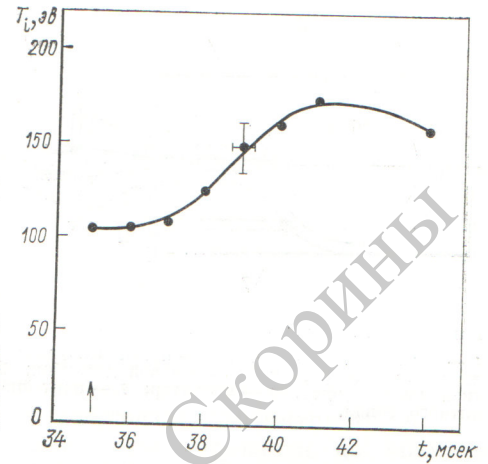
(здесь  $I$  — ток разряда;  $R$  и  $a$  — большой и малый радиусы плазменного шнура;  $l_i$  — внутренняя индуктивность единицы длины шнура;  $\beta_I$  — отношение давления плазмы к давлению полоидального магнитного поля;  $L$  — добавка к индуктивности плазменного шнура, связанная с наличием железного сердечника;  $H_{\perp}$  — вертикальное магнитное поле). При малом смещении плазменного шнура первый и последний члены в левой части уравнения меняются незна-



Р и с. 3. Изменение во времени сигналов с магнитных зондов и ВЧ-мощности, вводимой в плазму.



Р и с. 5. Изменение во времени полного энергосодержания плазмы  $\Delta W$ , смещения плазменного шнура в направлении большого радиуса тора  $\delta$  и внутренней индуктивности единицы длины шнура  $l_i$  относительно исходного уровня перед ВЧ-нагревом, а также тока регулятора равновесия  $I_r$ . Момент включения генератора показан вертикальной линией.



Р и с. 4. Изменение во времени температуры ионов. Момент включения ВЧ-генератора показан стрелкой.

чительно по сравнению с остальными членами. Поэтому, измеряя токи регуляторов, создающих вертикальное магнитное поле и диамагнетизм плазмы, можно получить представление о поведении внутренней индуктивности плазменного шнура (см. рис. 5, а).

Наблюдаемое уменьшение  $l_i$  свидетельствует о том, что при ВЧ-нагреве происходило уплотнение профиля радиального распределения разрядного тока. Возможной причиной этого эффекта является увеличение термотока Галеева — Сагдеева [5, 6] с ростом давления плазмы, приводящее к отжатию полоидального магнитного поля к периферии плазменного шнура [7]. Доля термотока в полном токе по плазме составляет по порядку величины  $\sqrt{\frac{a}{R}} \beta_I$  и при наблюдаемом изменении  $\Delta \beta_I = 0,6$  должна возрастать на десятки процентов.

Кроме того, наблюдались разрядные импульсы, в которых при тех же начальных условиях и при том же уровне вводимой мощности энерго-содержание плазмы испытывало во время ВЧ-нагрева резкие колебания (см. рис. 5, б). В настоящее время нет однозначного объяснения этого явления. Не исключено, что оно связано с потерей равновесия плазменного шнура либо с нарушением гидромагнитной устойчивости плазмы из-за перераспределения профиля разрядного тока. При меньших уровнях ВЧ-мощности такая неустойчивость не проявлялась.

В заключение авторы выражают благодарность Л. И. Артеменкову и И. Н. Головину за полезные обсуждения полученных результатов, а также А. М. Какурину и Л. И. Молоткову за помощь в работе.

Поступила в Редакцию 14/VIII 1973 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Иванов Н. В., Кован И. А., Лось Е. В. «Атомная энергия», 1972, т. 32, вып. 5, с. 389.
2. Иванов Н. В. и др. «Письма в ЖЭТФ», 1972, т. 16, с. 88.
3. Иванов А. А., Соболева Т. К. ЖЭТФ, 1972, т. 62, с. 2170.
4. Артеменков Л. И. и др. Труды IV Международной конф. МАГАТЭ по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу, 1971. Доклад CN28/C-3.
5. Арцимович Л. А. Управляемые термоядерные реакции. М., Физматгиз, 1961.
6. Галеев А. А., Сагдеев Р. З. «Докл. АН СССР», 1969, т. 189, с. с. 1204.
7. Галеев А. А. ЖЭТФ, 1970, т. 59, с. 1378.
8. Кадомцев Б. Б., Шафранов В. Д. См. [4], Доклад CN 28/F-8.

#### ◆ ◆ ◆

#### ВЫШЛО В СВЕТ И ПОСТУПИЛО В ПРОДАЖУ

новое переработанное и дополненное издание научно-популярной книги Тарасенко Н. Д. «ВТОРЖЕНИЕ В КЛЕТКУ (РАДИАЦИЯ И СЕЛЕКЦИЯ)», посвященной достижениям в области генетики.

В книгу включены новые данные, полученные за последние годы.

Книгу можно приобрести в Атомиздате (Москва, К-31, ул. Жданова, 5.)