

УДК 621.039.643+533.9.07

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МОЩНЫХ ГИРОТРОНОВ НА ТОКАМАКЕ Т-10

*А. Я. Кислов, С. Е. Лысенко\*, Г. Е. Ноткин*

НИЦ «Курчатовский институт», группа Т-10, г. Москва, Россия

В работе представлен краткий обзор экспериментов на токамаке Т-10 по взаимодействию сверхвысокочастотных волн в диапазоне частот электронно-циклотронного резонанса с плазмой. Приведены основные результаты по электронно-циклотронному нагреву и генерации неиндукционного тока в плазме как на первой, так и на второй циклотронной гармонике. Представлены характерные значения эффективности нагрева и генерации тока. Продемонстрирована возможность использования локальности вклада высокочастотной мощности для управления неустойчивостью пилообразных колебаний и амплитудой неоклассических тиринг-мод. Использование инъекции высокочастотных волн для предыонизации рабочего газа позволило оптимизировать фазу пробоя в отсутствие вихревого электрического поля и стадию роста разрядного тока.

### ВВЕДЕНИЕ

Эксперименты по взаимодействию сверхвысокочастотных (СВЧ) волн в диапазоне частот электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) с плазмой были начаты в Институте атомной энергии им. И. В. Курчатова в 1972 году по инициативе В. В. Аликаева и ведутся в тесном сотрудничестве с Институтом прикладной физики РАН. Уже в первых экспериментах на токамаке ТМ-3 [1] (большой радиус тора равен  $R = 40$  см, малый радиус тора равен  $a = 8$  см, индукция тороидального магнитного поля составляет  $B_T = 3,5$  Тл), проведенных при мощности СВЧ нагрева  $P_{HF} = 40$  кВт и длительности импульса  $\Delta t = 0,5$  мс, было продемонстрировано, что температура электронов почти удваивается (исходная температура составляла  $T_e \approx 250$  эВ) несмотря на то, что поглощение мощности СВЧ излучения происходило не за один проход. Этот результат послужил стимулом для создания гиротронного комплекса на токамаке Т-10 с мощностью 700 кВт. В дальнейшем эта мощность была доведена до 2 МВт. Результаты, полученные на токамаке Т-10 по нагреву и генерации электронно-циклотронного (ЭЦ) тока как на первой, так и на второй гармонике ЭЦР, послужили толчком для создания СВЧ комплексов на многих зарубежных токамаках (ASDEX, FTU, KSTAR и других). В настоящее время в проекте реактора ITER данный метод рассматривается как основной инструмент для стабилизации крупномасштабных магнетогидродинамических (МГД) неустойчивостей, а также для создания оптимального профиля плотности тока плазмы.

В представленном обзоре описаны эксперименты по ЭЦР-нагреву и генерации тока на токамаке Т-10. Обсуждается управление крупномасштабными МГД неустойчивостями и их стабилизация, (включая пилообразные колебания и неоклассические тиринг-моды). Рассмотрено использование СВЧ волн для облегчения пробоя и оптимизации стадии роста тока разряда.

### 1. НАГРЕВ ПЛАЗМЫ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ

Дальнейшее развитие метода ЭЦР-нагрева плазмы связано с экспериментами на установке токамак Т-10 ( $R = 1,5$  м,  $a = 0,3$  м,  $B_T \leq 3,5$  Тл) при использовании гиротронов с увеличенной мощностью. На начальном этапе использовались гиротроны с частотой  $f = 81,3$  ГГц и мощностью

\* Lysenko\_SE@nrcki.ru

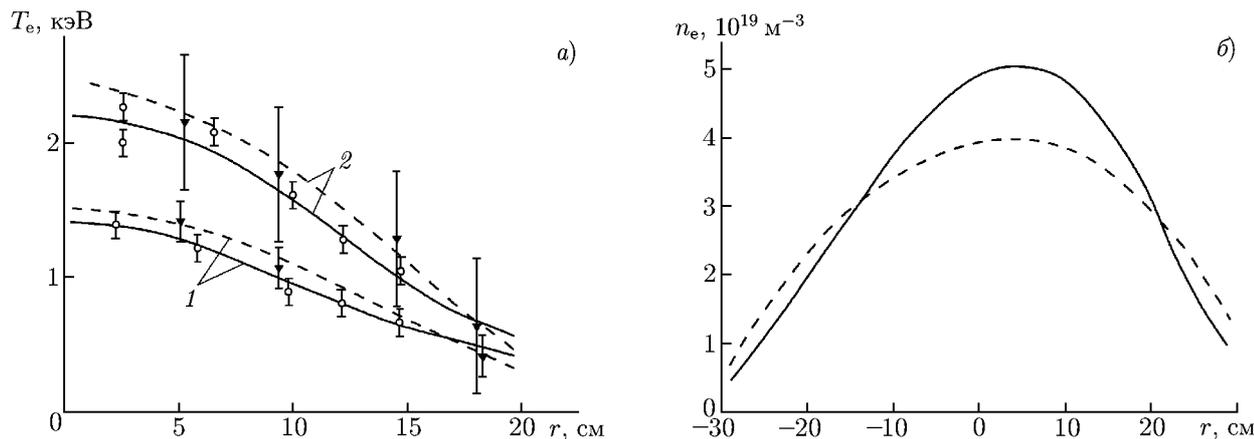


Рис. 1. Радиальные профили температуры (а) и концентрации (б) электронов до (кривые 1) и в конце (кривые 2) импульса ЭЦР-нагрева при двух профилях концентрации (сплошные и штриховые линии). Здесь  $r$  — радиальная координата. Вертикальные отрезки обозначают доверительный интервал

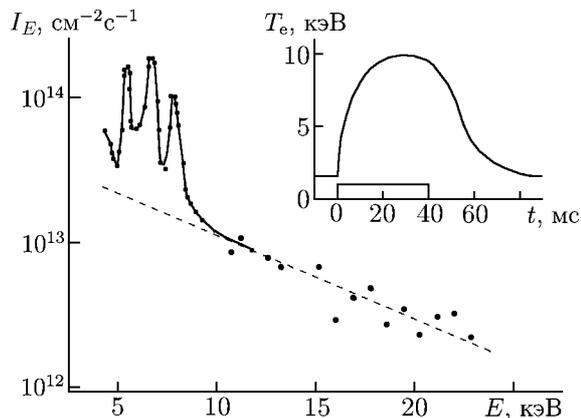


Рис. 2. Энергетический спектр рентгеновского излучения электронов, где  $I_E$  — интенсивность,  $E$  — энергия (точками обозначены экспериментальные значения, сплошной линией — аппроксимация этих значений, штриховой линией — максвелловский спектр). На врезке показана временная эволюция электронной температуры; прямоугольником условно показан импульс СВЧ излучения

в центре плазменного шнура, измеренная по спектру мягкого рентгеновского излучения и по интенсивности второй гармоники ЭЦ излучения, достигала  $T_e \approx 10$  кэВ, что соответствует уровню температуры в термоядерном реакторе. При этом удельная плотность мощности СВЧ излучения в центре плазменного шнура составляла  $p = 8$  Вт/см<sup>3</sup>, но даже при этом значении  $p$  не наблюдалось заметного отклонения функции распределения электронов по энергиям от максвелловской, как это видно из рис. 2. Средняя по лучу (т. е. по хорде, вдоль которой проводились измерения) концентрация электронов в этих разрядах составляла  $\bar{n}_e = 2,2 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>.

Однако в результате исследования удержания энергии при изменении плазменных параметров в широком диапазоне их значений при введении дополнительного СВЧ излучения было показано,

150÷200 кВт при длительности СВЧ импульса 50÷100 мс. В 1982 году была проведена серия экспериментов с группой из четырёх гиротронов с суммарной мощностью  $P_{HF} = 700$  кВт [2]. Высокочастотное излучение на фундаментальной гармонике подводилось со стороны слабого магнитного поля с помощью обыкновенно поляризованной волны (в О-моде). На рис. 1 представлены профили температуры  $T_e$  и концентрации  $n_e$  электронов. В этих экспериментах была получена хорошая эффективность нагрева плазмы:  $\Delta W/\Delta P \approx 12\div 15$  мс, где  $\Delta W$  — прирост энерго-содержания в плазме при вводе дополнительного излучения с мощностью  $\Delta P$ .

Модернизация гиротронного комплекса позволила увеличить его мощность до 2 МВт [3]. Комплекс состоял из 9 гиротронов с частотой 81,3 ГГц и двух гиротронов с частотой 75 ГГц. При центральном вводе СВЧ излучения с мощностью  $P_{HF} = 2$  МВт температура электронов в центре плазменного шнура, измеренная по спектру мягкого рентгеновского излучения и по интенсивности второй гармоники ЭЦ излучения, достигала  $T_e \approx 10$  кэВ, что соответствует уровню температуры в термоядерном реакторе. При этом удельная плотность мощности СВЧ излучения в центре плазменного шнура составляла  $p = 8$  Вт/см<sup>3</sup>, но даже при этом значении  $p$  не наблюдалось заметного отклонения функции распределения электронов по энергиям от максвелловской, как это видно из рис. 2. Средняя по лучу (т. е. по хорде, вдоль которой проводились измерения) концентрация электронов в этих разрядах составляла  $\bar{n}_e = 2,2 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup>.

что время жизни энергии  $\tau_E$  сильно уменьшается с увеличением мощности вводимого излучения  $P$ :  $\tau_E \propto P^{-0,6}$ . Обзор результатов исследования транспортных коэффициентов при ЭЦР-нагреве плазмы представлен в работе [4].

Эксперименты по СВЧ нагреву на первой гармонике показали, что эффективность нагрева падает из-за уширения профиля удельной поглощённой мощности вследствие сильной рефракции уже при концентрации около  $\bar{n}_e \approx 0,5n_{\text{cut-off}}$ , где  $n_{\text{cut-off}}$  — концентрация, при которой наблюдается «отсечка» в центре плазменного шнура. По этой причине дальнейшие эксперименты на токамаке Т-10 по нагреву плазмы проводились с использованием второй гармоники ЭЦР. При этом волны имели необыкновенную поляризацию, т. е. использовалась Х-мода [5]. В этих экспериментах применялись гиротроны с частотой  $f = 140$  ГГц, мощностью  $P_{\text{ГГ}} \approx 0,5$  МВт и длительностью СВЧ импульса до 400 мс. Переход на вторую гармонику позволил провести эксперименты при концентрации электронов до  $\bar{n}_e = 6,5 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ .

Основные зависимости времени жизни энергии и транспортных коэффициентов от параметров плазмы и мощности вводимого СВЧ излучения при нагреве на второй гармонике практически не отличались от случая нагрева на первой гармонике.

## 2. ГЕНЕРАЦИЯ НЕИНДУКЦИОННОГО ТОКА

Создание асимметрии в функции распределения электронов по скоростям может быть использовано для генерации неиндукционного тока в плазме токамака. Такая асимметрия может быть реализована за счёт асимметрии нагрева резонансных электронов, удовлетворяющих условию доплеровского резонанса  $f_g - f_{ce} = k_{\parallel} v_{\parallel} / (2\pi)$ , где  $f_g$  и  $f_{ce}$  — частоты гиротрона и ЭЦР, а  $k_{\parallel}$  и  $v_{\parallel}$  — продольные компоненты волнового вектора и скорости электронов соответственно. Для этого необходимо инжектировать СВЧ излучение под углом относительно направления тороидального магнитного поля, отличным от  $90^\circ$ . Эксперименты по исследованию генерации ЭЦ тока проводились на токамаке Т-10 с использованием как первой, так и второй гармоники ЭЦР [6, 7]. На рис. 3 представлена схема эксперимента. С целью увеличения эффективности генерации тока, которая пропорциональна температуре электронов, для нагрева плазмы были использованы два гиротрона с частотой  $f = 75$  ГГц. Излучение этих гиротронов вводилось под углом  $90^\circ$  к направлению тороидального магнитного поля. Излучение гиротронов с частотой  $f = 81,3$  ГГц вводилось под углом  $\varphi = 21^\circ$  к большому радиусу тора. Генерируемый ток определялся методом ко- и контргенерации (при когенерации ЭЦ ток сонаправлен с омическим током, при контргенерации — противоположен). Аналогичная схема использовалась в экспериментах со второй гармоникой. В экспериментах было показано, что при генерации тока функция распределения электронов отличается от максвелловской (рис. 4).

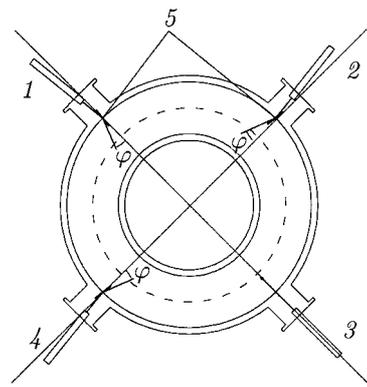


Рис. 3. Схема эксперимента по генерации электронно-циклотронного тока на токамаке Т-10: 1–4 — волноводы, подводящие излучение от гиротронов, 5 — зеркала. Волновод 1 подводит излучение от двух гиротронов, волновод 2 — от четырёх, волновод 3 — от двух, волновод 4 — от трёх. Гиротроны в 1, 2 и 4 инжектируют излучение с длиной волны 3,69 мм и мощностью до 2,5 МВт для генерации ЭЦ тока. Гиротроны в 3 используются для инжекции излучения с длиной волны 4,0 мм и мощностью 0,65 МВт для ЭЦР-нагрева плазмы

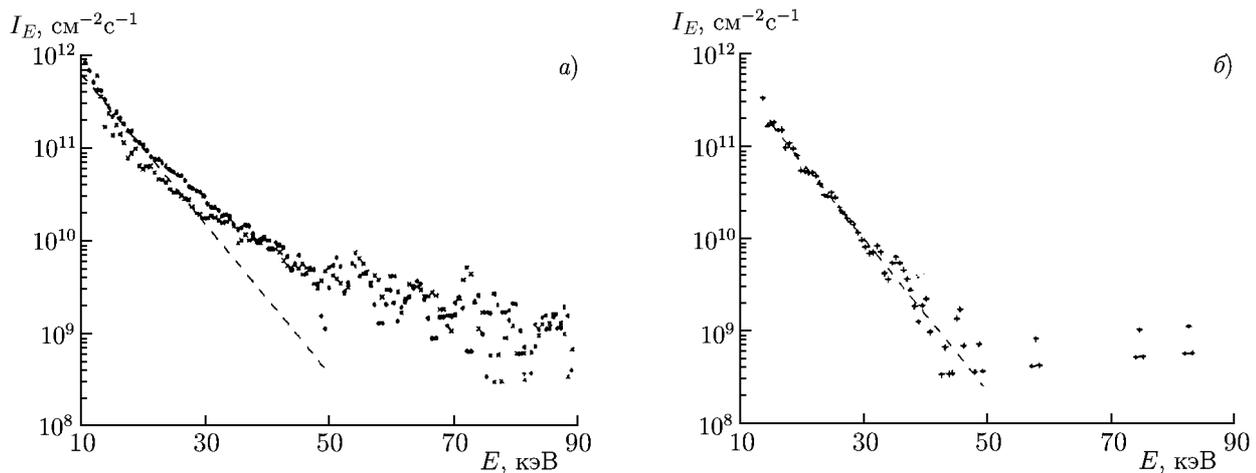


Рис. 4. Рентгеновские спектры электронов в случаях когенерации (крестики, панель *a*) и контргенерации (точки, панель *a*) тока, а также при ЭЦР-нагреве (панель *б*). Штриховая линия соответствует максвелловскому спектру. Видно, что при ко- и контргенерации тока имеет место отклонение измеренного спектра от максвелловского. В случае (*a*)  $T_e = 5,376$  кэВ, в случае (*б*)  $T_e = 5,253$  кэВ

Эффективность генерации ЭЦ тока  $\eta_{CD} = I_{CD} n_e R / P_{HF}$ , где  $I_{CD}$  — сила этого тока,  $n_e$  — концентрация электронов, составила  $\eta_{CD} = 0,03 \cdot 10^{20}$  А/(Вт · м<sup>2</sup>) в случае первой гармоники и  $\eta_{CD} = 0,013 \cdot 10^{20}$  А/(Вт · м<sup>2</sup>) в случае второй гармоники. Видно, что эффективность генерации ЭЦ тока на второй гармонике в два с лишним раза меньше, чем на первой гармонике.

### 3. ВОЗДЕЙСТВИЕ НА КРУПНОМАСШТАБНЫЕ МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЕ НЕУСТОЙЧИВОСТИ

Высокая локальность нагрева плазмы и генерации тока с помощью ЭЦ волн даёт возможность стабилизации крупномасштабных МГД неустойчивостей. На токамаке Т-10 с этой целью использовалось СВЧ излучение с частотой первой и второй гармоник ЭЦР [8, 9].

#### 3.1. Неустойчивость внутреннего срыва

На рис. 5 приведены осциллограммы, демонстрирующие изменение характера пилообразных колебаний, связанных с развитием неустойчивости внутреннего срыва, при изменении положения зоны ЭЦР относительно резонансной поверхности  $q = 1$ , где  $q$  — запас устойчивости, за счёт смещения плазменного шнура вдоль большого радиуса. Из этого рисунка видно, что при приближении зоны резонанса к поверхности  $q = 1$  период пилообразных колебаний увеличивается, а затем они стабилизируются. Аналогичное поведение колебаний наблюдается при сканировании положения резонанса относительно поверхности  $q = 1$  с помощью изменения тороидального магнитного поля.

Резонансный характер воздействия ЭВЧ излучения на неустойчивость внутреннего срыва позволяет создать систему автоматического регулирования для управления периодом пилообразных колебаний. На рис. 6 представлены осциллограммы, демонстрирующие работу этой системы. После включения гиротрона в разряде наблюдаются пилообразные колебания с периодом около 4,5 мс. С помощью управляющего магнитного поля система смещает плазменный шнур (поверхность  $q = 1$ ) относительно зоны ЭЦР так, что период колебаний соответствует заданному

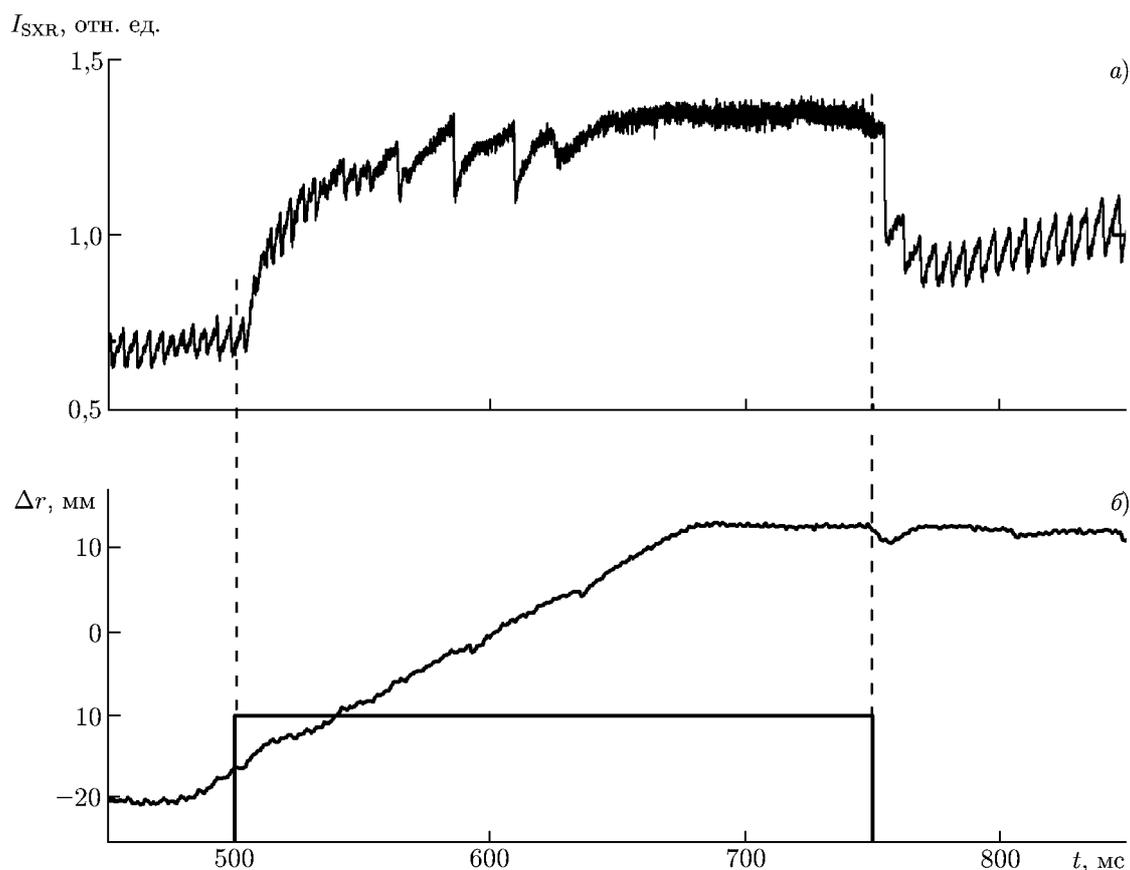


Рис. 5. Осциллограммы пилообразных колебаний интенсивности мягкого рентгеновского излучения  $I_{\text{SXR}}$  (а) и смещения плазменного шнура  $\Delta r$  относительно резонансной поверхности (б). Прямоугольником условно обозначен импульс СВЧ излучения

значению (в данном случае 15 мс), и удерживает этот шнур в данном положении до конца СВЧ импульса.

### 3.2. Неоклассическая тиринг-мода

Для экспериментов по изучению стабилизации неоклассической тиринг-моды (НТМ), которая возникает при предельных значениях величины  $\beta = 8\pi n_e T_e / B_\varphi^2$ , где  $n_e T_e$  — среднее по шнуру газокINETическое давление, а  $B_\varphi$  — индукция полоидального магнитного поля, был создан двухчастотный гиротронный комплекс. Был выбран один из режимов с силой тока плазмы  $I_{\text{pl}} = 80$  кА. Отметим, что предел по величине  $\beta$  в данном режиме реализовался в результате вклада мощности СВЧ излучения в центр плазменного шнура, что позволяло получить профили плазменных параметров, отличные от профилей, наблюдаемых при других методах нагрева плазмы.

Стабилизация НТМ осуществлялась с помощью генерации ЭЦ тока, который создавался с помощью инъекции СВЧ волн под некоторым углом к продольному магнитному полю, а область его локализации находилась вблизи резонансной поверхности. Как было выяснено в вышеописанных экспериментах, наблюдавшаяся НТМ характеризуется отношением  $m/n = 2/1$ , где  $m$  и  $n$  — число обходов по большому и малому радиусам тора соответственно. Это обстоятельство определяет

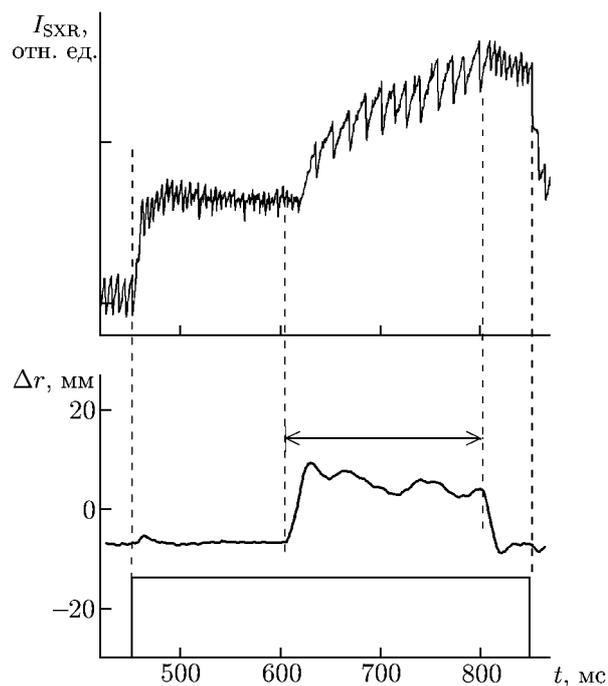


Рис. 6. Управление периодом неустойчивости внутреннего срыва. Вверху — пилообразные колебания мягкого рентгеновского излучения, внизу — сигнал смещения плазменного шнура. Двойная стрелка показывает время работы системы автоматического регулирования, а прямоугольник — время подачи импульса СВЧ излучения

магнитную поверхность  $q = 2$ , вблизи которой необходимо вкладывать энергию излучения.

В качестве стабилизирующего гиротрона был выбран гиротрон с частотой  $f = 140$  ГГц, излучение которого вводилось под углом  $12^\circ$  к направлению большого радиуса тора. В этом случае при индукции тороидального магнитного поля  $B_T = 2,33$  Тл вклад энергии излучения осуществляется в области поверхности  $q = 2$  ( $r = 10$  см). Поскольку стабилизация имеет резонансный характер, для получения максимального эффекта в экспериментах величина  $B_T$  варьировалась в пределах 0,02 Тл.

На рис. 7 приведён набор осциллограмм, полученных в разряде, где наблюдалось подавление НТМ. Как видно из осциллограмм, после включения первой группы гиротронов с задержкой около 120 мс развивается НТМ, которая приводит к падению энергосодержания в плазме. После развития НТМ включается стабилизирующий гиротрон, что спустя 20 мс приводит к уменьшению регистрируемого сигнала МГД активности в 3 раза. При этом энергосодержание в шнуре восстанавливается до прежней величины и поддерживается в течение времени работы стабилизирующего гиротрона. После его отключения наблюдается спад энергосодержания и рост МГД активности.

#### 4. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ПРЕДЫОНИЗАЦИИ ПРИ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОМ РЕЗОНАНСЕ

Поскольку в токамаке существуют рассеянные магнитные поля, пробой нейтрального газа требует, как правило, больших электрических полей с напряжённостью порядка 1 В/м, что для крупных токамаков с толстыми металлическими стенками приводит к большим токам, текущим по стенкам камеры, и, как следствие, к значительным механическим нагрузкам. Одним из способов, который рассматривается как наиболее перспективный, является предыонизация с помощью СВЧ волн в диапазоне частот электронно-циклотронного резонанса [10].

На установке Т-10 такие эксперименты были проведены на первой и второй гармонике ЭЦР в диапазоне мощностей  $0,15 \div 1$  МВт. Поляризация ЭЦ волн соответствовала Х-моду. Вихревое электрическое поле в этих экспериментах отсутствовало. Результаты экспериментов по СВЧ пробую на 1-й и 2-й гармониках близки и сводятся к следующему.

1) Для надёжного пробоя необходимо создать вертикальное магнитное поле с индукцией  $(2 \div 4) \cdot 10^{-3}$  Тл, при этом в плазменном объёме возникают токи равновесия с силой несколько килоампер.

2) Мощность, требуемая для надёжного пробоя, в условиях токамака Т-10 должна превышать 0,5 МВт.

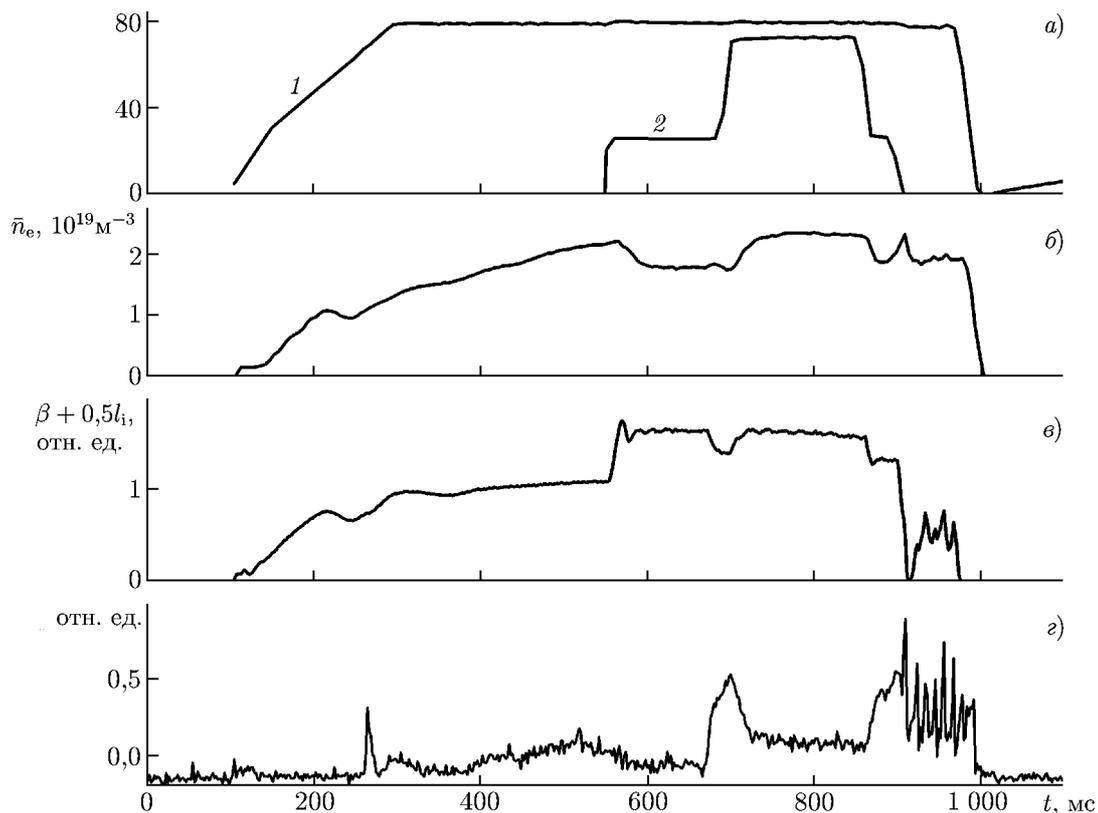


Рис. 7. Осциллограммы основных сигналов разряда с подавлением НТМ: силы тока  $I_{pl}$  (кривая 1 на панели а) и мощности излучения гиротронов (кривая 2 на панели а), концентрация  $\bar{n}_e$  (б), параметра  $\beta + 0,5l_i$ , где  $l_i$  — внутренняя индуктивность плазмы (в), и уровня сигнала магнитных зондов (г). Вдоль вертикальной оси на панели а отложены килоамперы для значений силы тока  $I_{pl}$  и относительные единицы для мощности излучения гиротронов

3) Пробой происходит в области, близкой к зоне ЭЦР.

4) Задержка пробоя относительно момента включения импульса СВЧ излучения при  $P_{HF} > 0,5$  МВт составляет менее 5 мс.

5) «Выгорание» (т. е. уменьшение интенсивности) линии  $D_\alpha$  происходит за короткое время, около  $3 \div 5$  мс, что соответствует большой скорости ионизации (рис. 8). После ионизации газа образуется плазма с концентрацией электронов  $\bar{n}_e = (0,3 \div 0,8) \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$  и температурой  $T_e \approx 150$  эВ. Рост тока плазмы со скоростью  $dI_{pl}/dt \approx 0,5$  МА/с требует вихревого поля с напряжённостью около  $0,1$  В/м.

В настоящее время на токамаке Т-10 создан двухчастотный гиротронный комплекс с частотами  $f_1 = 130$  ГГц,  $f_2 = 140$  ГГц и с полной мощностью  $P_{HF} = 4$  МВт. На этом комплексе проводятся эксперименты по нагреву плазмы и генерации

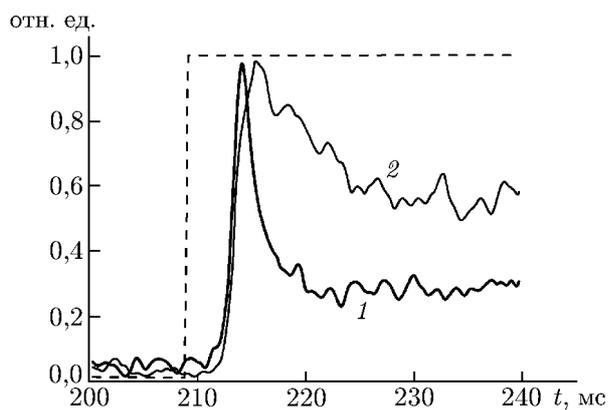


Рис. 8. Изменение интенсивности линии  $D_\alpha$  (кривая 1) и концентрации  $\bar{n}_e$  (кривая 2) при неиндукционном старте разряда в результате инжекции СВЧ излучения, импульс которого условно показан штриховой линией

ЭЦ тока при низких значениях  $q$  и высоких концентрациях электронов до  $\bar{n}_e = 10^{20} \text{ м}^{-3}$ .

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе показано, что использование инъекции СВЧ волн в плазму токамака позволяет решить целый ряд задач, связанных с пробоем нейтрального газа, нагревом плазмы и созданием неиндукционного тока. Высокая степень локальности поглощения СВЧ волн в плазме делает этот метод незаменимым при стабилизации крупномасштабных МГД неустойчивостей. Отметим, что ввод СВЧ излучения в камеру токамака не требует установки внутрикамерных антенн, что существенно повышает конкурентоспособность этого метода.

Работа выполнена при поддержке Росатома (контракт Н.4х.44.90.13.1101).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Alikaev V. V., Bobrovskij G. A., Poznyak V. I., et al. // 5th Europ. Conf. on Controlled Fusion and Plasma Phys. Grenoble, France. 21–25 August 1972. V. 1. P. 108.
2. Аликаев В. В., Агапов Л. И., Арсеньев Ю. И. и др. // Письма в ЖЭТФ. 1982. Т. 35, вып. 3. С. 115.
3. Аликаев В. В., Багдасаров А. А., Васин Н. Л. и др. // Физика плазмы. 1988. Т. 14, вып. 9. С. 1027.
4. Esiptchuk Yu. V., Razumova K. A. // Plasma Phys. Control. Fusion. 1986. V. 28, No. 9A. P. 1253.
5. Alikaev V. V., Bagdasarov A. A., Borshegovskij A. A., et al. // Plasma Phys. Control. Nucl. Fusion Res. 1993. V. 1. P. 627.
6. Alikaev V. V., Bagdasarov A. A., Borshegovskij A. A., et al. // Nucl. Fusion. 1992. V. 32, No. 10. P. 1811.
7. Alikaev V. V., Bagdasarov A. A., Borshegovskij A. A., et al. // Nucl. Fusion. 1995. V. 35, No. 4. P. 369.
8. Kislov D. A., Alikaev V. V., Esipchuk Yu. V., et al. // Nucl. Fusion. 1997. V. 37, No. 3. P. 339.
9. Kislov D. A. // Nucl. Fusion. 2007. V. 47. P. S590.
10. Borshchegovskiy A., Dremin M., Il'in V., et al. // European Phys. J. (EPJ Web of Conferences). 2012. V. 32. P. 02004.

Поступила в редакцию 9 июля 2015 г.; принята в печать 2 сентября 2015 г.

## USING HIGH-POWER GYROTRONS IN THE TOKAMAK T-10

*A. Ya. Kislov, S. E. Lysenko, and G. E. Notkin*

The Tokamak T-10 experiments on the interaction of microwaves with plasma in the electron-cyclotron resonance frequency range is briefly reviewed in this work. The basic results on the electron-cyclotron heating and the non-inductive current generation in plasma at both the first and second cyclotron harmonics are presented along with the characteristic values of the heating and current-generation efficiencies. The possibility of using the local nature of the high-frequency power contribution to ensure control of the sawtooth-oscillation instability and the neoclassical tearing modes is demonstrated. Using the high-frequency wave injection for the working-gas pre-ionization, one can optimize the breakdown phase in the absence of an eddy electric field and the discharge-current increase stage.