

*Штукел*  
*Stöckel*  
*NEBRAT*

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

# ФИЗИКА ПЛАЗМЫ

Том 14

(ОТДЕЛЬНЫЙ ОТТИСК)

4

МОСКВА · 1988

УДК 533.9.07

**ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ГЕНЕРАЦИИ ТОРОИДАЛЬНОГО ТОКА НИЖНЕГИБРИДНЫМИ ВОЛНАМИ НА ТОКАМАКЕ КАСТОР****БАДАЛЕЦ Я. \*, ВАЛОВИЧ М. \*, ДЯТЛОВ Й. \*, ЖАЧЕК Ф. \*,  
КОПЕЦКИ В. \*, КЭРБЕЛ Ш. \*, КРИШКА Л. \*, МАГУЛА П. \*,  
НАНОБАШВИЛИ С. И., ПРЕИНГАЕЛЬТЕР Й. \*, ШТЭКЛ Я. \*, ЯКУБКА К. \*****Введение**

В связи с проработкой эскизного проекта термоядерного реактора на основе токамака большое значение приобретает поиск методов поддержания стационарного тока в тороидальных установках.

Возможность генерации тока в тороидальной плазме с помощью ВЧ-волн была показана еще в начале 50-х годов [1], однако теоретические и экспериментальные исследования в этом направлении наиболее активно ведутся в последние годы [2—5]. Как следует из этих работ, для генерации тока ВЧ-волнами наиболее благоприятным является диапазон нижнегибридных волн. Поскольку для генерации тока используется механизм затухания Ландау на электронах, очевидно, необходимо направленно возбуждать вдоль оси тора в плазме замедленные НГ-волны.

В таких условиях на ряде токамаков в последнее время проведены успешные эксперименты по генерации тока НГ-волнами [6—14]. В этих работах для направленного возбуждения замедленных НГ-волн используются ВЧ-системы (антенны), состоящие из ряда сфазированных волноводов, так называемые «гриллы» [15]. Сдвиг фазы между волноводами грилла задается обычно фазовращателями, включенными в каналы грилла, или электрическим способом [11].

В недавно появившейся работе [16] для НГ-нагрева плазмы в токамаке используется сравнительно простой грилл нового типа — «многоступенчатый грилл».

В настоящей работе приводятся результаты экспериментов по генерации тока НГ-волнами с использованием подобного многоступенчатого грилла на токамаке КАСТОР Института физики плазмы Чехословацкой АН.

**Постановка эксперимента**

Токамак КАСТОР — это модернизированный токамак ТМ-1-ВЧ. Основные направления исследования на этом токамаке — изучение взаимодействия и нагрева плазмы с помощью НГ-волн, а также изучение пристеночной плазмы.

При модернизации токамака электротехническая схема и ее параметры остались практически неизменными. С сохранением прежних геометрических размеров был полностью заменен лайнер. Если предыдущий лайнер не позволял ввести в него современные антенные устройства для возбуждения НГ-волн и к тому же имел ограниченное количество диагностических патрубков, то новый лайнер сделан с учетом всех этих обстоятельств. Он имеет несколько патрубков большого сечения для ввода ВЧ-

\* Институт физики плазмы АН ЧССР.

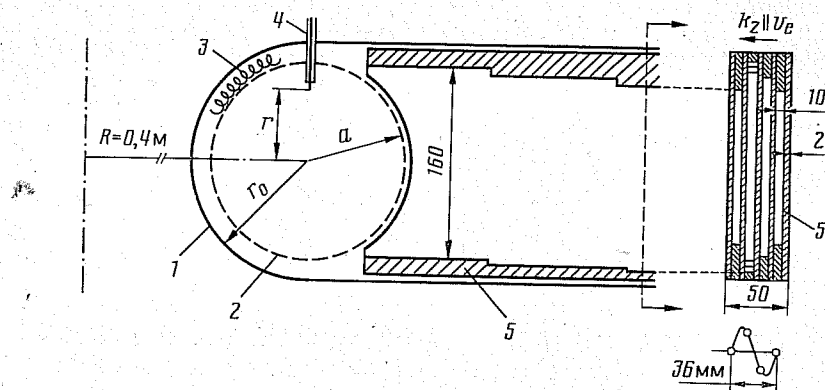


Рис. 1. Схема экспериментальной установки: 1 — лайнер, 2 — диафрагма, 3 — пояс Роговского, 4 — подвижный лангмюровский зонд, 5 — многоступенчатый грилл

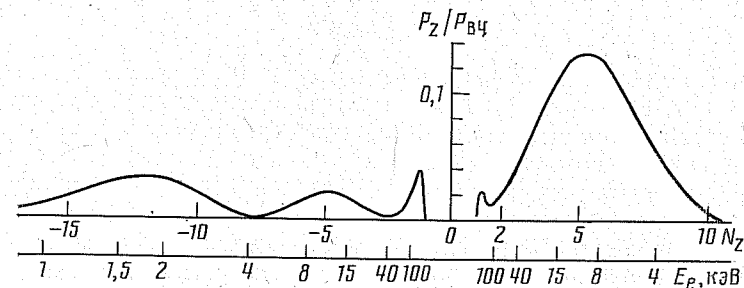


Рис. 2. Спектры волн, излучаемых гриллом

антенных устройств и большое количество диагностических патрубков. Кожух остался прежним, но он уже не вакуумный.

Токамак КАСТОР — это небольшой токамак с большим радиусом  $R=40$  см, малым радиусом камеры  $r_0=10$  см, радиусом диафрагмы  $a=8,5$  см (рис. 1). Кроме того, имеются две подвижные серповидные диафрагмы. Эксперименты проводятся с водородной плазмой при давлении  $\sim 10$  мПа. В данной серии экспериментов не использовался импульсный напуск газа. Торoidalное магнитное поле  $B_T \leq 2$  Тл, ток плазмы  $I_p \leq 30$  кА. В стандартном индукционном разряде для облегчения пробоя осуществляется предьонизация газа с помощью электронной пушки. Длительность омического разряда  $\tau \approx 9$  мс. ВЧ-мощность вводится в плазму в различных стадиях развития разряда.

В качестве источника ВЧ-мощности на токамаке КАСТОР используется магнетрон мощностью 40 кВт на частоте  $\omega_0/2\pi=1,25$  ГГц с длительностью импульса  $\tau_{ВЧ} \leq 30$  мс. ВЧ-энергия подводится к токамаку с помощью волноводного тракта, содержащего ферритовую развязку, аттенюатор, направленные ответвители и тефлоновую вакуумную развязку. Вакуумная развязка удалена от токамака на расстояние 1 м. Сразу за ней начинается многоступенчатый грилл. Основной волновод с помощью металлических перегородок делится на четыре идентичных волновода, т. е. мы имеем четырехволноводный грилл. На входе грилла размеры волноводов одинаковые. Затем с помощью согласующих трансформаторов в каждом волноводе делается переход на такие размеры широкой стенки волновода, которые обеспечивают желаемые сдвиги фаз между волноводами и направление распространения волны. Очевидно, что сдвиги фаз между волноводами фиксированы. В нашем случае размеры подобраны так, что сдвиги фаз составляют  $120^\circ$ . На выходе грилла вновь с помощью согласующих трансформаторов размеры всех волноводов делаются одинаковыми, равными  $1,0 \times 16,0$  см<sup>2</sup>. Расстояние между осями волноводов равно 1,2 см. Таким образом, на срезе грилла формируется полная длина

волны, равная 36 мм, в то время как вакуумная длина волны накачки 240 мм. Отсюда можно оценить коэффициент замедления, равный  $N_e \approx 6,7$ . В наших экспериментах при максимальной вводимой в плазму ВЧ-мощности, равной 40 кВт, плотность мощности на раскрытие грилла составляла  $0,5$  кВт·см<sup>-2</sup>. При этом пробоя в системе ввода не наблюдалось. Необходимо отметить также, что перед началом экспериментов производилась тренировка грилла серией импульсов.

Спектры волн, излучаемых гриллом, рассчитанные для градиента концентрации у грилла  $2 \cdot 10^{20}$  м<sup>-4</sup> и абсолютного значения концентрации  $3 \cdot 10^{18}$  м<sup>-3</sup>, приведены на рис. 2. Как видно, спектр несимметричен по направлению. Имеются основная мода с довольно узким спектром и с одним максимумом при  $N_e \approx 5,5$  (эквивалентная энергия электронов  $E_e \approx 8,5$  кэВ) и «паразитная» мода, которая распространяется в противоположную сторону и имеет довольно широкий спектр с несколькими максимумами. Из расчетов следует, что 30% подводимой мощности отражается от грилла, 50% переносится основной модой и 20% «паразитной» модой. Грилл так ориентирован в горизонтальном патрубке токамака, что основная мода излучения волн была направлена в сторону токового движения электронов в омическом разряде.

В ходе экспериментов обычными стандартными методами определялись напряжение и ток разряда и положение плазменного шнура по большому радиусу тока. Кроме того, ток плазмы можно было определить с помощью пояса Роговского, расположенного внутри лайнера в тени диафрагмы. Концентрация плазмы измерялась 4-мм СВЧ-интерферометром, зондирующим плазменный шнур по диаметру.

Жесткое рентгеновское излучение плазмы с энергией квантов  $\geq 200$  кэВ регистрировалось сцинтиллятором NaI, который был ориентирован на область диафрагмы.

Регистрация циклотронного излучения плазмы осуществлялась полупроводниковым детектором на частоте 36 ГГц. Антенна принимала волны с поляризацией, соответствующей необыкновенной волне. Необходимо отметить, что в условиях наших экспериментов практически нет различия между сигналами различной поляризации.

Кроме рентгеновского и циклотронного излучения в наших экспериментах проводилась регистрация линий излучения водорода и примесей (углерода и кислорода).

Подвижный лангмюровский зонд дал нам возможность провести по диаметру плазмы локальные измерения концентрации и температуры электронов. В период увлечения тока НГ-волнами удавалось проникнуть зондом в плазменный шнур на расстояние  $r \approx a/2$  без заметных искажений характеристик разряда.

### Результаты экспериментов и обсуждение

Эксперименты по генерации тока НГ-волнами проводились при торoidalном магнитном поле  $B_T=1,3$  Тл в индукционном разряде сравнительно низкой плотности  $n_e=(2-8) \cdot 10^{18}$  м<sup>-3</sup>. При этом условие для генерации тока  $\omega_0 > 2\omega_{LH}$ , связанное с нижним гибридным резонансом и параметрическими эффектами [17, 18], выполняется с запасом.

В экспериментах ВЧ-мощность подавалась в разрядную камеру в различные моменты развития омического разряда в токамаке.

1. Результаты, касающиеся генерации тока в стационарной фазе омического разряда при  $\tau_{ВЧ} < \tau$ , даны на рис. 3. ВЧ-импульс длительностью  $\tau_{ВЧ}=2$  мс вводился в камеру через 4 мс после начала омического разряда, когда параметры плазмы вышли уже на стационарный уровень. На рис. 3 представлен временной ход параметров плазмы с ВЧ-импульсом (сплошные кривые) и без него (пунктирные кривые). Как видно из этого рисунка, подача ВЧ-импульса приводит к значительной «подсадке» напряжения обхода, в то время как ток плазмы практически остается неизменным. Это понятно, так как токамак КАСТОР, как и все современные

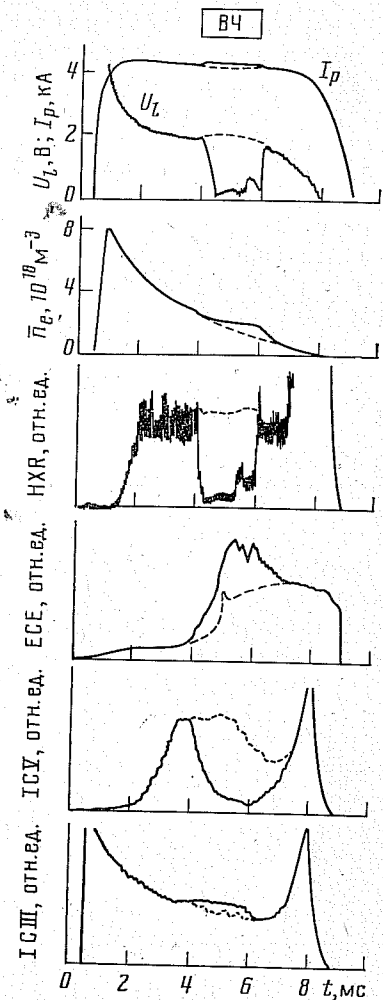


Рис. 3. Временной ход параметров плазмы при  $\tau_{ВЧ} < \tau$ ,  $U_{LC} = 1$  кВ,  $P_{ВЧ} = 40$  кВт; сплошные кривые — при включенном, штриховые — при отключенном ВЧ-генераторе

токамаки, работает в режиме стабилизации тока в цепи первичной обмотки трансформатора вихревого поля. По этой причине в омическом режиме разряда о генерации тока судят по уменьшению напряжения обхода. При произвольной подсадке напряжения ток увлечения можно определить по формуле

$$I_{ВЧ} = I_p \frac{\Delta U_L}{U_L}, \quad (1)$$

где  $U_L$  — напряжение обхода в отсутствие ВЧ-мощности.

Эксперименты показали, что как величина ВЧ-тока, так и скорость его нарастания зависят от вводимой ВЧ-мощности и концентрации плазмы. Концентрацию плазмы можно было менять путем изменения напряжения на батарее вихревого поля ( $U_{LC}$ ). Зависимости величины ВЧ-тока ( $I_{ВЧ}$ ), скорости его нарастания ( $\Delta I_{ВЧ}/\Delta t$ ) и усредненной по диаметру концентрации плазмы  $\bar{n}_e$  от  $U_{LC}$  при подводимой к плазме ВЧ-мощности  $P_{ВЧ} = 40$  кВт представлены на рис. 4. Видно, что генерируемый ВЧ-ток достигает максимума при  $U_{LC} = 2$  кВ и при дальнейшем повышении напряжения падает. При этом эффективность увлечения тока достигает величины  $0,5 \text{ A} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . Что касается скорости нарастания ВЧ-тока, то она довольно высокая  $\sim 1,5 \cdot 10^7 \text{ A} \cdot \text{с}^{-1}$  и с повышением напряжения  $U_{LC}$  монотонно падает. Падение ВЧ-тока и скорости его нарастания при увеличении  $U_{LC}$  можно связать с увеличением концентрации плазмы. Действительно, как предсказывает теория, величину генерируемого ВЧ-тока можно определить из соотношения

$$I_{ВЧ} (\text{kA}) = 0,1 \eta T_e (\text{kэВ}) P_{ВЧ} (\text{kВт}) / R (\text{м}) n_e (10^{13} \text{ см}^{-3}), \quad (2)$$

где  $P_{ВЧ}$  — вводимая ВЧ-мощность,  $n_e$  — плотность плазмы,  $R$  — большой радиус тора, а коэффициент  $\eta = 2-10$  в зависимости от вида спектра возбуждаемых волн [13].

Из наших экспериментальных данных, приведенных на рис. 4, следует, что при  $U_{LC} > 2$  кВ в соответствии с теорией  $I_{ВЧ} \sim 1/n$ . При этом абсолютное значение генерируемого ВЧ-тока, рассчитанное по формуле (2) для наших условий, также хорошо согласуется с экспериментальными данными.

Что касается увеличения  $I_{ВЧ}$  с повышением плотности плазмы при  $U_{LC} < 2$  кВ, т. е. обратной зависимости по сравнению с предсказаниями теории, то это явление, по-видимому, можно объяснить тем обстоятельством, что при довольно низкой плотности плазмы около грилла его связь с плазмой слабая и повышение плотности в этом диапазоне приводит к улучшению связи и увеличению генерируемого тока.

Обработка осциллограмм напряжения обхода дала возможность построить зависимость его относительно изменения ( $\Delta U_L/U_L$ ) от инжектируемой ВЧ-мощности. Эта зависимость представлена на рис. 5. Как видно из этого рисунка, взаимодействие ВЧ-волн с плазмой имеет пороговый характер. При ВЧ-мощности  $P_{ВЧ} < 8$  кВт эффект увлечения тока пол-

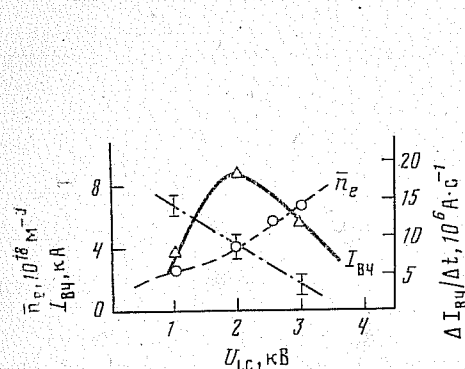


Рис. 4

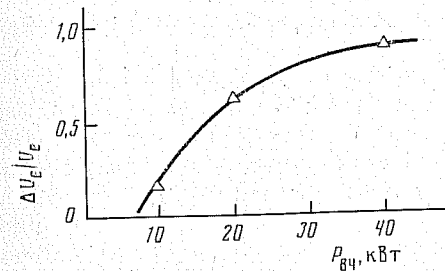


Рис. 5

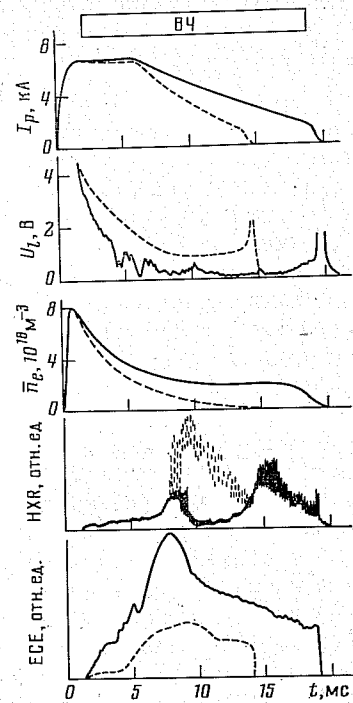


Рис. 6

Рис. 4. Зависимость средней по диаметру концентрации плазмы, тока увлечения и скорости нарастания тока увлечения от напряжения на батарее вихревого поля при  $P_{ВЧ} = 40$  кВт

Рис. 5. Зависимость относительного изменения напряжения обхода от ВЧ-мощности при  $U_{LC} = 1$  кВ

Рис. 6. Временной ход параметров плазмы при  $\tau_{ВЧ} > \tau$ ,  $U_{LC} = 1$  кВ,  $P_{ВЧ} = 40$  кВт; сплошные кривые — при включенном, штриховые — при отключенном ВЧ-генераторе

ностью пропадает, а при больших мощностях с увеличением мощности величина  $\Delta U_L/U_L$  увеличивается и при  $P_{ВЧ} = 40$  кВт приближается к единице.

Поскольку мы работаем без импульсного напуска газа, то в течение омического разряда плотность плазмы монотонно падает и, как показали эксперименты, в этих условиях ввод ВЧ-мощности приводит к некоторому замедлению спада плотности в течение действия ВЧ-импульса (см. рис. 3). Сигналы магнитных зондов показывают, что в период ВЧ-инжекции плазменный шнур незначительно смещается по большому радиусу тора к наружной стенке.

Из рис. 3 видно, что интенсивность жесткого рентгеновского излучения ( $HXR$ ) резко падает с вводом ВЧ-мощности в плазму и с уменьшением напряжения обхода. Одновременно начинает подрастать сигнал с детектора циклотронного излучения ( $ECE$ ). Видно, что эти изменения значительные, но если характерное время уменьшения интенсивности рентгеновского излучения совпадает с характерным временем изменения напряжения обхода, то циклотронное излучение подрастает значительно медленнее. После окончания ВЧ-импульса снова резко увеличивается интенсивность  $HXR$  и значительно медленнее уменьшается интенсивность  $ECE$ .

Уменьшение интенсивности жесткого рентгеновского излучения указывает на то, что в период ВЧ-увлечения тока происходит уменьшение энергии убегающих электронов, торможение которых на диафрагме и стенках лайнера обеспечивает излучение и которые генерируются вследствие наличия напряжения обхода. В то же время увеличение интенсивности циклотронного излучения указывает на образование пучка быстрых электро-

нов, которые должны быть ответственны за перенос ВЧ-тока в плазме. Действительно, как известно из квазилинейной теории, под действием ВЧ-волн на функции распределения электронов формируется плато, которое и определяет генерируемый ток. К тому же границы плато должны совпадать с границами спектра волн, т. е. в нашем случае оно должно быть вблизи 10 кэВ (см. рис. 2).

С другой стороны, из измерений в оптическом диапазоне спектра следует, что интенсивности линий примесей с высокими уровнями возбуждения, такие, как С V, О V и О IV в период ВЧ-увлечения тока уменьшаются, в то время как интенсивности линий с низкими уровнями возбуждения, такие, как С III, О III и О II, возрастают (см. рис. 3). Это дает возможность заключить, что происходит охлаждение основной части плазмы и температура понижается от исходной в омическом режиме разряда  $T_e = 200-300$  эВ до  $T_e$  порядка 30-40 эВ.

К сожалению, имеющиеся пока экспериментальные данные не дают нам возможности более точных количественных расчетов энергии электронов в период НГ-увлечения тока.

2. Результаты, касающиеся инжекции длинных ВЧ-импульсов ( $\tau_{вч} > \tau$ ) в стационарной фазе омического разряда, представлены на рис. 6. В этом случае в схеме питания первичной обмотки трансформатора вихревого поля введена диодная закоротка, которая приводит к затягиванию тока до  $\sim 14$  мс (пунктирная кривая), тогда как без диода  $\tau = 9$  мс. ВЧ-импульс длительностью 17 мс вводится в плазму через 2 мс после начала омического разряда, когда ток плазмы достигает уже своего максимального значения. И в этом случае в стационарной фазе до  $t \approx 6$  мс ток плазмы практически не меняется, но напряжение обхода с вводом ВЧ-мощности начинает быстро падать и приближается к нулю. При  $t > 6$  мс, если без ВЧ-импульса ток плазмы сравнительно быстро падает, с ВЧ-импульсом падение тока значительно замедляется и ток поддерживается в течение действия всего ВЧ-импульса. В этой стадии напряжение обхода  $U_i = 0$ , и это указывает на то, что весь ток переносится ВЧ-волной.

Как видно из рис. 6, ввод ВЧ-мощности приводит к значительному замедлению спада концентрации плазмы, и на поздней стадии (при  $t > 10$  мс), когда ток уже полностью переносится ВЧ-волной, концентрация практически остается постоянной при значении  $\bar{n}_e \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ .

Что касается жесткого рентгеновского излучения и излучения на циклотронной частоте, то их изменение хорошо коррелирует с изменением напряжения и тока плазмы. Как видно из рис. 6, интенсивность НХР в начальный период омического разряда низкая, при  $t \approx 8$  мс резко увеличивается и затем при  $t > 10$  мс начинает падать. Инжекция ВЧ-мощности, несмотря на резкое уменьшение  $U_i$ , не приводит к заметному изменению интенсивности НХР в начальный период разряда, но на более поздней стадии происходит его сильное подавление. В конце разряда, когда ВЧ-ток сильно падает, ухудшается удержание, плазма начинает разваливаться и интенсивность НХР увеличивается. В отличие от НХР интенсивность ЕСЕ с инжекцией ВЧ-мощности сразу начинает подрастать. Как по величине, так и по скорости нарастания она в несколько раз больше по сравнению с омическим режимом разряда. При  $t = 8$  мс интенсивность ЕСЕ достигает максимального значения и потом начинает падать. Скорость ее падения хорошо коррелируется со скоростью падения ВЧ-тока, а с окончанием ВЧ-импульса происходит обрыв сигнала до нулевого значения.

Кроме того, в период ВЧ-увлечения тока интенсивности линий примесей с высокими уровнями возбуждения (С V, О V и О IV) сильно падают, а линий с низкими уровнями возбуждения (С III, О III и О II) повышаются, что свидетельствует об охлаждении основной части плазмы.

3. Временной ход параметров плазмы при инжекции ВЧ-мощности в распадающуюся плазму токамака после закорачивания первичной обмотки трансформатора вихревого поля тиристором уже в начальной фазе развития омического разряда представлен на рис. 7. Закорачивание происходит через  $t = 0,75$  мс после начала разряда (указано стрелкой на рис. 7). Видно, что после этого ток начинает сразу падать и напряжение обхода

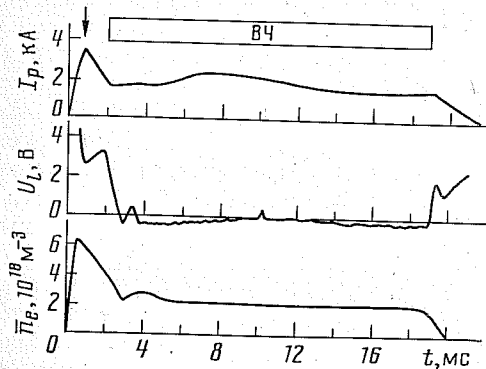


Рис. 7

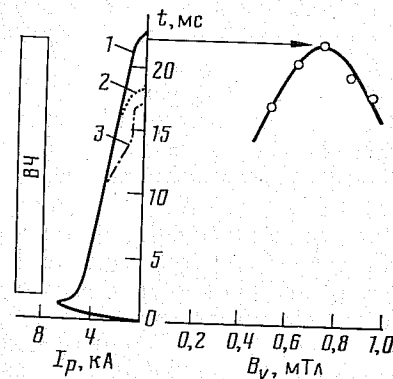


Рис. 9

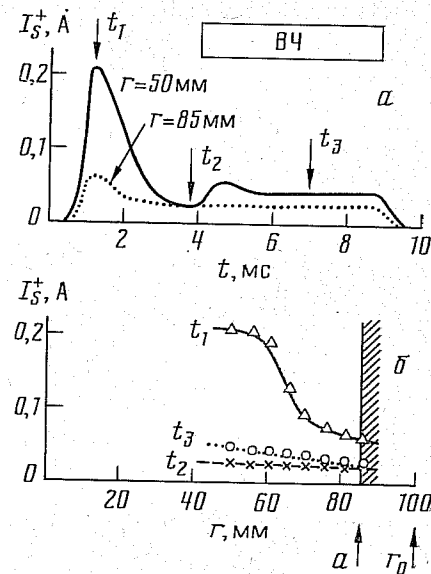


Рис. 8

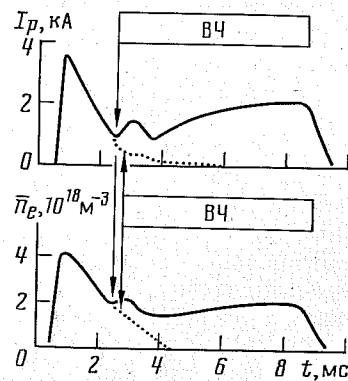


Рис. 10

Рис. 7. Временной ход параметров распадающейся плазмы при  $P_{вч} = 40$  кВт

Рис. 8. Зависимость ионного тока насыщения в распадающейся плазме при  $P_{вч} = 40$  кВт: а — от времени на различных радиусах плазмы, б — от радиуса плазмы в различные моменты времени

Рис. 9. Зависимость эффекта увлечения тока от вертикального магнитного поля компенсации

Рис. 10. Зависимость эффекта увлечения тока от концентрации плазмы

подскакивает. Если не вводить ВЧ-мощность, то разряд оканчивается приблизительно на 3-й мс. В нашем случае ввод ВЧ-импульса длительностью  $\tau_{вч} = 17$  мс осуществляется через 2 мс после начала разряда, и сразу ток плазмы прекращает уменьшаться и поддерживается ВЧ-волной до конца импульса. До  $t = 8$  мс происходит некоторое увеличение тока увлечения, но потом оно сменяется легким падением. Падение тока можно связать с тем обстоятельством, что ВЧ-мощность в течение импульса падает почти до 50%. В период ВЧ-увлечения тока напряжение обхода даже слегка отрицательно, а концентрация плазмы держится на уровне  $n_e \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ .

Что касается интенсивности жесткого рентгеновского и циклотронного излучения и линий примесей, то они ведут себя таким же образом, как и в предыдущих случаях, т. е. в период ВЧ-увлечения тока интенсивность НХР падает, а ЕСЕ увеличивается. Кроме того, интенсивности линий примесей с высокими уровнями возбуждения (С V, О V и О IV) силь-

но падают, а с низкими уровнями возбуждения (С III, О III и О II) повышаются.

Следует заметить, что параметры плазмы при ВЧ-увлечении тока в токамаке существенно изменяются по сравнению с омическим режимом разряда. Происходит в целом охлаждение плазмы и уплотнение профиля концентрации. Последнее продемонстрировано на рис. 8. Типичная зависимость ионного тока насыщения  $I_s^+$  от времени на различных радиусах плазмы представлена на рис. 8, а. Обработка этих данных дала возможность построить распределение по радиусу ионного тока насыщения для различных моментов развития разряда:  $t_1$  соответствует моменту времени, когда закорачивается тиристором первичная обмотка трансформатора вихревого поля, т. е. омическому режиму разряда;  $t_2$  — режиму распада плазмы перед самым включением ВЧ-мощности и  $t_3$  — стационарной фазе ВЧ-увлечения тока. Из рис. 8, б видно, что во время распада плазмы профиль ионного тока насыщения уплотняется и при ВЧ-увлечении тока происходит ее незначительное обострение.

По-видимому, в период ВЧ-увлечения тока кроме уплотнения профиля концентрации происходит и уплотнение профиля тока, т. е. увеличение плотности тока на периферии плазменного шнура по сравнению с исходным шкированным профилем в омическом разряде. На это указывает сильная зависимость тока и напряжения плазмы от величины вертикального магнитного поля компенсации, т. е. от горизонтального положения шнура (рис. 9). Имеется некое оптимальное положение шнура, когда эффект увлечения тока максимален. По-видимому, смещение шнура от оптимального положения наружу приводит к контакту токового слоя плазмы с диафрагмой и развалу плазмы, а смещение вовнутрь, кроме того, к удалению плазмы от грилла и уменьшению связи. Аналогичный эффект повышения «чувствительности» шнура к малым смещениям при вводе ВЧ-мощности отмечен в [13].

Из наших экспериментальных данных следует также, что существует пороговое значение концентрации плазмы, ниже которого эффект ВЧ-увлечения тока пропадает. Это иллюстрируется рис. 10. ВЧ-мощность инжектировалась в распадающуюся плазму при различных значениях ее концентрации. Видно, что при  $\bar{n}_e = 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  еще наблюдается эффективное увлечение тока, а при  $\bar{n}_e < 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  эффект увлечения пропадает. Естественно предположить, что причиной этого является сильное ухудшение связи грилла с плазмой при низких концентрациях.

И, наконец, следует обратить внимание на тот факт, что в период ВЧ-увлечения тока в разнообразных его режимах (см. рис. 3, 6, 7 и 10) концентрация плазмы имеет явную тенденцию к стабилизации и ее значение устанавливается опять-таки на уровне  $\bar{n}_e \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ .

### Выводы

Таким образом, проведенные на токамаке КАСТОР эксперименты продемонстрировали возможность эффективной генерации тороидального тока с помощью нижнегибридных волн, возбуждаемых многоступенчатым гриллом.

Установлено, что эффективность увлечения тока  $\sim 0,5 \text{ А} \cdot \text{Вт}^{-1}$ . В период ВЧ-увлечения тока происходит уплотнение профиля концентрации и, по-видимому, также уплотнение профиля тока. Существует порог как по плотности ( $\bar{n}_e \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$ ), так и по ВЧ-мощности ( $P \approx 8 \text{ кВт}$ ), ниже которого эффект увлечения пропадает. Обнаружен также эффект стабилизации концентрации плазмы на уровне  $\bar{n}_e \approx 2 \cdot 10^{18} \text{ м}^{-3}$  при ВЧ-увлечении тока в токамаке.

### Литература

1. Thonemann P. C., Cowhig W. T., Davenport P. A. // Nature. 1952. V. 169. P. 34.
2. Klima R. // Plasma Phys. 1973. V. 15. P. 1031.
3. Fisch N. J. // Phys. Rev. Lett. 1978. V. 41. P. 873.
4. Karney C. F. F., Fisch N. J. // Nucl. Fus. 1981. V. 21. P. 1549.
5. Паралл В. В., Переверзева Г. В. // Физика плазмы. 1983. Т. 9. С. 585.
6. Yamamoto T., Imai T., Shimada M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1980. V. 45. P. 716.

7. Maekawa T., Saito T., Nakamura M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 85A. P. 339.
8. Nakamura M., Cho T., Kubo S. et al. // Phys. Rev. Lett. 1981. V. 47. P. 1902.
9. Ohkubo K., Takamura S., Kawahata K. et al. // Nucl. Fus. 1982. V. 22. P. 203.
10. Luchardt C. S., Porkolab M., Knowlton S. F. et al. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 48. P. 152.
11. Bernabei S., Dauhney C., Efthimion P. et al. // Phys. Rev. Lett. 1982. V. 49. P. 1255.
12. Porkolab M., Schuss J., Takase Y. // Plasma Phys. and Contr. Nucl. Fus. Res. 1982. (Baltimore). IAEA: Vienna, 1983. V. 1. P. 227.
13. Будников В. Н., Герасименко Г. В., Дьяченко В. В. и др. // Физика плазмы. 1984. Т. 10. С. 485.
14. Аликаев В. В., Гвоздинов Ю. В., Дятлов И. и др. // Физика плазмы. 1985. Т. 11. С. 53.
15. Brambilla M. // Nucl. Fus. 1976. V. 16. P. 47.
16. Cormezano C., Briand P., Briffod G. et al. // Nucl. Fus. 1985. V. 25. P. 419.
17. Porkolab M. // Phys. Fluids. 1977. V. 20. P. 2058.
18. Porkolab M., Bernabei S., Hooke W. M. et al. // Phys. Rev. Lett. 1977. V. 38. P. 230.

Институт физики АН ГССР  
Институт физики плазмы АН ЧССР

Поступила в редакцию  
22.IX.1986  
Исправленный вариант  
получен 15.VI.1987

УДК 533.9.07

**ЗАВИСИМОСТИ ВРЕМЕНИ УДЕРЖАНИЯ ЭНЕРГИИ  
ОТ ПЛОТНОСТИ, КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПАСА УСТОЙЧИВОСТИ  
И БОЛЬШОГО РАДИУСА ШНУРА В ТОКАМАКЕ «Т-13»**

АБРАМОВ А. В., БЕЛАШОВ В. И., БОРТНИКОВ А. В.,  
БРЕВНОВ Н. Н., ГЕРАСИМОВ С. Н.

1. Электронная теплопроводность в токамаках имеет аномальный характер и превосходит примерно на два порядка величины неоклассическое значение [1]. Из-за отсутствия ясного понимания этого явления приходится использовать эмпирические зависимости времени удержания  $\tau_E$  от параметров плазменного шнура. Различные зависимости  $\tau_E$  от геометрических параметров  $q$ ,  $a$  и  $R$ , обнаруженные в экспериментах, указывают на конкуренцию различных физических процессов, определяющих перенос энергии в токамаке. В данной работе приводятся результаты экспериментов, выполненных на установке «Т-13» по исследованию зависимости времени удержания энергии в электронной компоненте  $\tau_E$  от различных параметров плазменного шнура, в том числе и от большого радиуса шнура  $R$ .

2. Отличительной особенностью установки токамак «Т-13» является вытянутая вдоль большого радиуса вакуумная камера прямоугольного сечения. Это позволяет в довольно широких пределах изменять большой радиус плазменного шнура и провести эксперименты по непосредственному измерению зависимости времени удержания энергии в электронной компоненте от большого радиуса. Меридиональное сечение вакуумной камеры и некоторые из диагностик показаны на рис. 1. Подробное описание конструкции установки «Т-13» можно найти в [2-4].

Максимальное тороидальное магнитное поле на радиусе  $R=40$  см составляло  $B_T=14$  кГс, что при малом радиусе шнура  $a=7,5$  см и  $q=3$  позволяло получать под внутренним диагностическим окном ( $R=40$  см) ток  $J_p \approx 30$  кА, а под средним окном ( $R=58$  см) ток  $J_p=16$  кА. Средняя по сечению плотность электронов  $\langle n \rangle$  изменялась от  $2 \cdot 10^{12}$  до  $2 \cdot 10^{13}$  см<sup>-3</sup>. Энергетическое время жизни электронов определялось на квазистационарной стадии разряда из соотношения

$$\frac{6\pi^2 \int_0^a n T_e r dr}{\tau_E} = J_p U - P_{rad}$$

где  $U$  — напряжение на обходе,  $P_{rad}$  — мощность потерь с излучением. Измеренный профиль плотности близок к параболическому. Центральная температура электронов определялась по мягкому рентгеновскому излучению методом фильтров [5] и по спектру рентгеновского излучения, измеренному с помощью пятиканального фотоэлектронного спектрометра [6]. На рис. 2 приведено сравнение центральной температуры электронов, измеренной по проводимости плазмы (в предположении параболического профиля температуры и эффективного заряда ионов  $Z \approx 1$ ), с измерениями по мягкому рентгеновскому излучению. В широкой области изменения параметров  $\langle n \rangle$ ,  $q$  и  $R$  наблюдается соответствие между  $T_{e0}$  по рентгеновским измерениям и по проводимости плазмы. В нашем случае при не-