

УДК 533.9

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ СОЗДАНИЯ РЕЖИМОВ С ВЫСОКОЙ ДОЛЕЙ НЕИНДУКЦИОННОГО ТОКА В ТОКАМАКЕ T-10

*Н.А. Кирнева, А.А. Борщеговский, А.Я. Кислов, Д.А. Кислов,
Н.А. Мустафин, Г.Е. Ноткин, Ю.Д. Павлов, И.Н. Рой, Е.В. Трухина*

НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

В работе проведена оценка потенциальной возможности создания режимов с большой долей неиндукционного тока в токамаке T-10 с использованием новых возможностей гиротронного комплекса (увеличенная мощность и дополнительные системы поворотных зеркал), оценка возможной достижимой доли электронно-циклотронного (ЭЦ) тока и бутстреп-тока. Проведённый анализ выполнен на основании расчётов с помощью кода OGRAY с использованием реальных экспериментальных профилей температуры и плотности плазмы, полученных в T-10 в условиях с той же полной мощностью электронно-циклотронного нагрева плазмы, которая в последующем будет использована в экспериментах с генерацией тока. Это позволяет не использовать моделирование процессов переноса энергии и частиц, что в некоторой степени улучшает предсказательную точность результата. На основании проведённых расчётов можно ожидать, что модернизация гиротронного комплекса T-10 позволит получить режимы с высокой долей неиндукционного тока плазмы вплоть до полного неиндукционного поддержания тока с долей бутстреп-тока ~15% в режиме с $I_p = 200\text{—}220$ кА ($q_L \sim 3,5$). Предсказываемый на основании расчётов профиль неиндукционного тока оказывается узко локализованным. В связи с этим дополнительные эксперименты могут потребоваться для оптимизации ввода ЭЦ-мощности и получения устойчивого разряда с высокой долей неиндукционного тока.

Ключевые слова: токамак, генерация тока, электронно-циклотронный ток, неиндукционное поддержание тока.

ESTIMATION OF POSSIBILITY OF THE REALIZATION OF DISCHARGES WITH HIGH FRACTION OF NON-INDUCTIVE CURRENT IN T-10 TOKAMAK

*N.A. Kirneva, A.A. Borschegovskij, A.Ya. Kislov, D.A. Kislov, N.A. Mustafin, G.E. Notkin, Yu.D. Pavlov,
I.N. Roy, E.V. Trukhina*

NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Estimation of potential possibility to prepare a plasma discharge with high fraction of noninductively driven current in T-10 tokamak with modified gyrotron set-up (increased total input power, and additional systems of steerable mirrors) is presented together with an estimation of possible bootstrap current fraction and Electron Cyclotron current value. The analysis has been carried out basing on the OGRAY Code calculations. Temperature and density profiles observed in T-10 experiments with the same heating power value as that planned for the future experiments with electron cyclotron current drive have been used. It leads to the better reliability of estimations because no any transport modeling of energy and particle transport is used for evaluation of plasma profiles. Basing on the results of analysis it can be expected that discharges with the high fraction of noninductively driven current (up to the fully noninductive current drive) can be achieved in experiments with low level of bootstrap current and $I_p = 200\text{—}220$ kA ($q_L \sim 3.5$). The feature is that the calculated EC current profile is strongly localized on-axis. It means that an additional experimental optimization can be required to obtain MHD stability in such discharges with high fraction of noninductive current.

Key words: tokamak, current drive, electron-cyclotron current, fully noninductive current operation.

ВВЕДЕНИЕ

Установка T-10 — круглый лимитерный токамак с большим радиусом плазменного шнура $R = 1,5$ м, малым радиусом плазмы $a = 0,3$ м. Отличительная особенность установки — использование электронно-циклотронного нагрева в качестве единственного метода дополнительного нагрева плазмы. В настоящее время проводится переоснащение комплекса нагрева с целью увеличения мощности и установки дополнительных поворотных зеркал для обеспечения возможности работы гиротронов не только в режиме нагрева, но и генерации ЭЦ-тока. Такое переоснащение позволит расширить возможности управления профилем тока плазмы, в том числе возобновить исследование режимов с полностью неиндукционным поддержанием тока. Разряды с полностью неиндукционным поддержанием тока позволяют, с одной стороны, провести наиболее достоверную проверку достижимой величины генерируемого тока и тем самым проверить теоретические модели взаимодействия СВЧ-волны с плазмой. С другой стороны, такие эксперименты позволяют анализировать удержание и устойчивость плазмы, перестройку профилей параметров плазмы (плотности, температуры, давления) в условиях, когда основной ток плазмы создаётся неомическими источниками, т.е. моделируются условия, близкие к условиям будущего реактора.

Ранее на T-10 режимы с большой долей неиндукционного тока были получены в экспериментах с током плазмы $I_p = 75$ кА при вводе СВЧ-мощности 2,1 МВт на первой гармонике ЭЦ-частоты [1]. В этих

экспериментах доля бутстреп-тока составляла 50%. Позднее эксперименты по полностью неиндукционному поддержанию тока при помощи генерации ЭЦ-тока были выполнены на токамаках TCV [2], ASDEX Upgrade [3]. На установке TCV [2] при поглощённой СВЧ-мощности 2,7 МВт (2-я гармоника ЭЦ-резонанса, необыкновенная волна) удалось поддерживать ток плазмы 210 кА в течение ~2 с. Доля бутстреп-тока составляла ~10% от полного тока плазмы. На токамаке ASDEX Upgrade были получены аналогичные результаты: $I_p = 320$ кА поддерживался при помощи ЭЦ- и бутстреп-тока (82 и 12% от полного тока плазмы соответственно).

Эффективность генерации ЭЦ-тока определяется по формуле [4]

$$\eta_{EC} = \frac{I_{EC} \bar{n}_e R_0}{P_{ab}} \quad (\text{А}, 10^{19} \text{ м}^{-3}, \text{м}, \text{Вт}), \quad (1)$$

где I_{EC} — полная величина тока, генерируемого ЭЦ-волнами; $\bar{n}_e$ — линейная средняя плотность плазмы вдоль центральной хорды; R_0 — большой радиус плазмы; P_{ab} — поглощённая ЭЦ-мощность. В работе [5] показано, что в экспериментах T-10 эффективность генерации тока на второй гармонике ЭЦ-резонанса (необыкновенная волна) составляла $0,13 \cdot 10^{19}$ А/Вт/м², на первой гармонике ЭЦ-резонанса (обыкновенная волна) $\eta_{EC} = 0,3 \cdot 10^{19}$ А/Вт/м². В приведённых экспериментах TCV эффективность генерации тока составила $0,073 \cdot 10^{19}$ А/Вт/м². В экспериментах DIII-D с генерацией тока на второй гармонике ЭЦ-частоты [6] величина эффективности генерации тока менялась в зависимости от температуры плазмы как $\eta_{EC} = 0,1 T_e \cdot 10^{19}$ А/Вт/м², где T_e — электронная температура плазмы (кэВ).

Целью данной работы является оценка потенциальной возможности создания режимов с большой долей неиндукционного тока в токамаке T-10 с использованием новых возможностей гиротронного комплекса (увеличенная мощность и дополнительные системы поворотных зеркал), возможной достижимой доли ЭЦ- и бутстреп-тока.

Обычно оценки возможностей комплекса генерации тока строятся на предсказательном моделировании будущих разрядов. Однако известно, что ввод мощности дополнительного нагрева в плазму приводит к изменению характера удержания энергии и частиц плазмы. При использовании любого метода нагрева это проявляется в так называемой деградации удержания, т.е. уменьшении энергетического времени жизни плазмы с мощностью нагрева. Для режимов L -моды деградация удержания соответствует закономерности $\tau_E \sim P_{tot}^{-0,73}$ [4]. Увеличение мощности СВЧ-нагрева также ведёт к перераспределению частиц плазмы (электронов, ионов, примесей) — так называемое явление density pump-out [4]. В настоящее время не существует единой универсальной модели, которая с достаточной степенью достоверности описывала бы всё имеющееся разнообразие экспериментов с дополнительным нагревом плазмы и позволяла бы делать достоверный прогноз предстоящих экспериментов. В T-10 удалось проанализировать достижимые величины генерируемого тока, используя реальные экспериментальные результаты (профили температуры и плотности плазмы), полученные в условиях с той же полной мощностью ЭЦ-нагрева плазмы, которая в последующем будет использована в экспериментах с генерацией тока. Это позволяет не использовать моделирование процессов переноса энергии и частиц, что в некоторой степени улучшает предсказательную точность результата.

Отметим, что наряду с вопросом о величине генерируемого тока при подготовке экспериментов возникают также задачи, связанные с анализом МГД-устойчивости будущих режимов, взаимодействием плазмы и стенки в условиях мощного дополнительного нагрева плазмы (что может привести, например, к изменению притока примесей). Однако эти вопросы представляют собой дополнительное самостоятельное исследование и здесь не рассматриваются.

В данной работе материал излагается в следующей последовательности: описываются комплекс дополнительного нагрева плазмы токамака T-10, параметры режимов, для которых были сделаны оценки величины неиндукционного тока, приведены результаты расчёта ЭЦ-тока, оценены величина бутстреп-тока и доля неиндукционного тока, рассмотрена возможность увеличения доли генерируемого ЭЦ-тока, приведены выводы.

КОМПЛЕКС ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА И ГЕНЕРАЦИИ ТОКА

На токамаке T-10 для дополнительного нагрева плазмы используется гиротронный комплекс, состоящий из пяти гиротронов, один из которых оснащён поворотным зеркалом, что позволяет не только нагревать

плазму, но и создавать ЭЦ-ток. В настоящее время ведутся работы по созданию второй системы поворотных зеркал, что позволит создавать ЭЦ-ток с помощью трёх гиротронов. Параметры комплекса приведены в табл. 1 (f — частота гиротрона, P_{ECRH} — вводимая в плазму СВЧ-мощность). Для нагрева плазмы и генерации тока используется необыкновенно поляризованная ЭЦ-волна на второй гармонике ЭЦ-частоты.

Т а б л и ц а 1. Параметры гиротронного комплекса

№ гиротрона	f , ГГц	Диапазон изменения тороидального угла ввода, град	P_{ECRH}^* , кВт
1	128,9	0°	550
2	129,2	0°	550
3	139,9	0° (в перспективе –20°—+20°)**	1100
4	140,45	–20°—+20°	800
5	140	В перспективе –20°—+20°	1000

* Поглощённая мощность оценивалась из эволюции сигналов $(\beta + I/2)$.

** Положительный угол соответствует генерации неиндукционного тока вдоль направления тока плазмы, отрицательный угол обозначает генерацию тока в направлении, противоположном току плазмы.

В рассматриваемых экспериментах были использованы гиротроны 1—4. Гиротроны 1—3 осуществляли только нагрев плазмы (тороидальный угол ввода мощности составлял 0° по направлению к большому радиусу тора). Гиротрон 4 работал в режиме генерации тока, ввод волны в плазму происходил под углом $\Psi_T = +20^\circ$. В рамках данной работы экспериментальное исследование зависимости эффективности генерации тока от тороидального угла ввода мощности не проводилось. Однако тестовые расчёты показали, что выбранное значение Ψ_T является оптимальным с точки зрения ожидаемых величин эффективности генерации тока: уменьшение тороидального угла ввода мощности до $\Psi_T = +15^\circ$ приводит к снижению ожидаемой эффективности генерации тока на ~20% (при условии сохранения области вклада мощности). Это не противоречит имеющимся в литературе данным [6].

ПАРАМЕТРЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ РЕЖИМОВ

Эксперименты проводились в режиме с током плазмы $I_p = 200$ —220 кА и значением тороидального магнитного поля $B_T = 2,4$ —2,42 Тл, что соответствовало значению фактора запаса устойчивости на границе плазмы $q_L = 3,3$ —3,6. Были выбраны режимы с близкими значениями линейной средней плотности плазмы $\bar{n}_e = (1,8$ —2,05) 10^{19} м^{–3}. Номера импульсов и параметры режимов приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Параметры рассматриваемых экспериментальных режимов T-10

Номер импульса	P_{ECRH} , кВт	P_{ECCD} , кВт	$\bar{n}_e$, 10^{19} м ^{–3}	$T_e(0)$, кэВ	q_L	B_T , Тл
61 205	800	800	1,8	2,3	3,3	2,42
61 208	1900	800	1,85	3,7	3,3	2,42
61 389	3000	800	2,05	4,1	3,6	2,4

Средняя плотность плазмы измерялась с помощью СВЧ-интерферометра (длина волн $\lambda = 1$ мм) вдоль хорды зондирования, проходящей через центр плазмы. Профиль плотности определялся с помощью решения обратной задачи восстановления локальных значений из хордовых измерений, выполненных с помощью СВЧ- и HCN-лазерного ($\lambda = 337$ мкм) интерферометров, по 8—14 хордам зондирования.

Температура плазмы определялась по интенсивности излучения из плазмы на второй гармонике ЭЦ-частоты, центральная температура контролировалась по спектрам мягкого рентгеновского излучения.

Профили плотности и температуры плазмы, использованные для расчётов распространения СВЧ-волны, показаны на рис. 1. Здесь и далее r — текущее значение радиуса магнитной поверхности.

Центральные значения электронной температуры в области с мощным ЭЦ-нагревом могут быть несколько завышены. При рассматриваемых параметрах плазмы к завышению измеряемого сигнала могут приводить эффекты, связанные с доплеровским и релятивистским смещением частоты излучения. Тем не менее, как будет обсуждаться далее, в ходе расчётов получена зависимость эффективности генерации тока от температуры плазмы в условиях, когда плотность плазмы мало меняется в зоне поглощения (см. рис. 1, $r < 10$ см). Это позволит внести необходимую поправку на точность определения температуры в ходе предстоящих экспериментов.

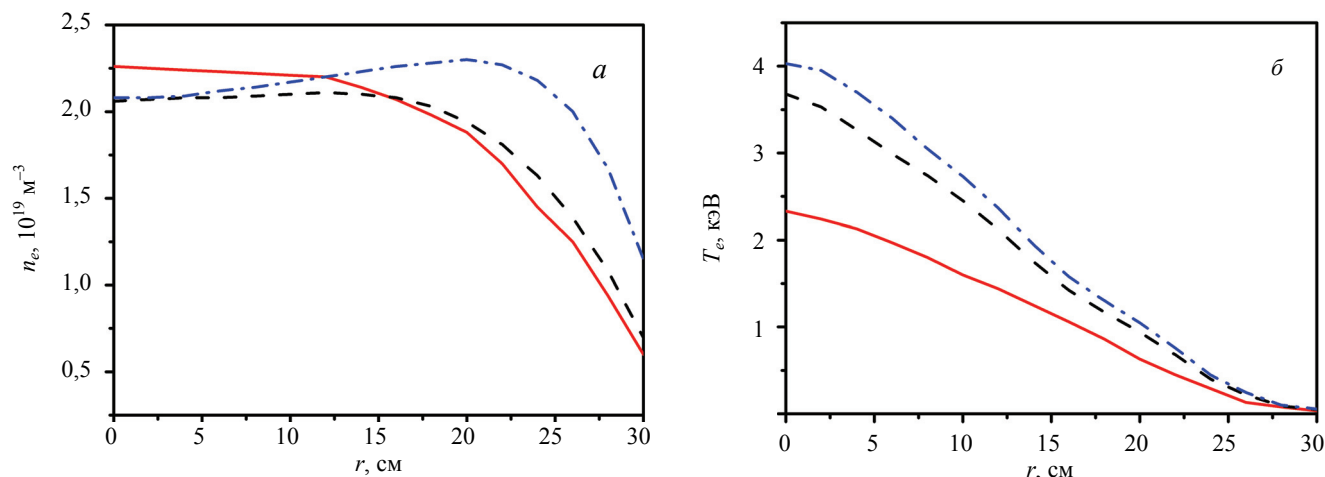


Рис. 1. Профили плотности плазмы (а), профили электронной температуры (б): — — профили, соответствующие импульсу 61 205; - - - — импульсу 61 208; - · - · — импульсу 61 389

Эффективный заряд плазмы принимался равным $z_{\text{эф}} = 2$. Это даёт удовлетворительное согласие (не хуже 20%) с измеренным напряжением обхода плазмы для приведённых импульсов.

РАСЧЁТ ВЕЛИЧИНЫ ЭЦ-ТОКА

Для определения профилей поглощённой мощности и генерируемого тока выполнены расчёты распространения ЭЦ-волн в плазме при помощи квазилинейного кода OGRAY [7] для трёх перечисленных разрядов. При расчётах по коду OGRAY ЭЦ-волна представляется в виде гауссова пучка с заданной геометрией: диаметром пучка и радиусом кривизны волнового фронта. Расчёты, приведённые в данной статье, выполнялись для каждого гиротрона с использованием реальной геометрии пучка, характерной для данного гиротрона.

Импульс 61 205 — наименьшая из рассмотренных полная мощность нагрева плазмы. Обсуждаемый разряд — типичный режим L -моды с чётко выраженными пилообразными колебаниями. По данным многоканальных рентгеновских измерений радиус переворота фазы пилообразных колебаний в этом импульсе составляет $r_s = 8$ —10 см.

В данном импульсе нагрев плазмы и генерация ЭЦ-тока осуществлялись с помощью одного гиротрона с полной мощностью 800 кВт. Тороидальный угол ввода СВЧ-волны составлял $\Psi_T = +20^\circ$.

На рис. 2 показано поглощение мощности волны вдоль траектории луча. Волна распространяется со стороны слабого магнитного поля. Начало поглощения характеризуется началом спада СВЧ-мощности, которое наблюдается в области $r = 4$ —5 см. Максимум поглощения мощности смещён на сторону сильного поля, поглощение сосредоточено внутри магнитной поверхности с характерным радиусом $r = 8$ см, т.е. внутри поверхности с $q = 1$.

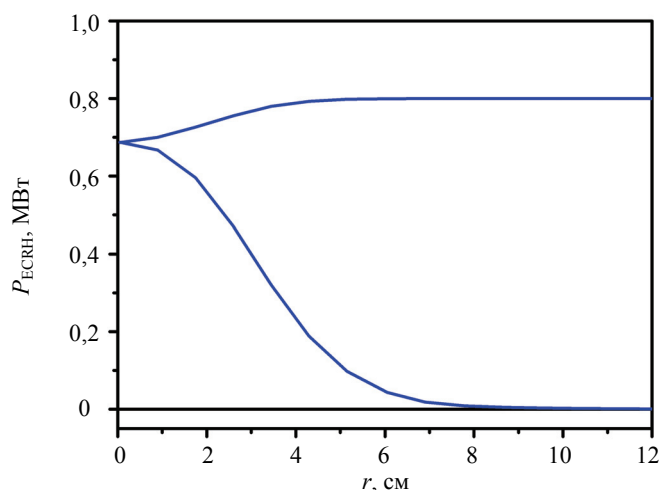


Рис. 2. Поглощение мощности вдоль траектории распространения СВЧ-волны в импульсе 61 205

Согласно расчётам, представленным на рис. 2, наблюдается полное однопроходное поглощение. Профили поглощённой СВЧ-мощности и плотности генерируемого тока показаны на рис. 3. Полный ЭЦ-ток составил 46 ± 11 кА.

Импульс 61 208 — увеличенная мощность нагрева плазмы. В этом импульсе наряду с гиротроном 4 ($\Psi_T = +20^\circ$) для нагрева плазмы дополнительно использованы гиротроны 1 и 2. СВЧ-волна от гиротронов 1 и 2 вводилась строго вдоль большого радиуса плазменного шнура, не давая вклад в создание ЭЦ-тока.

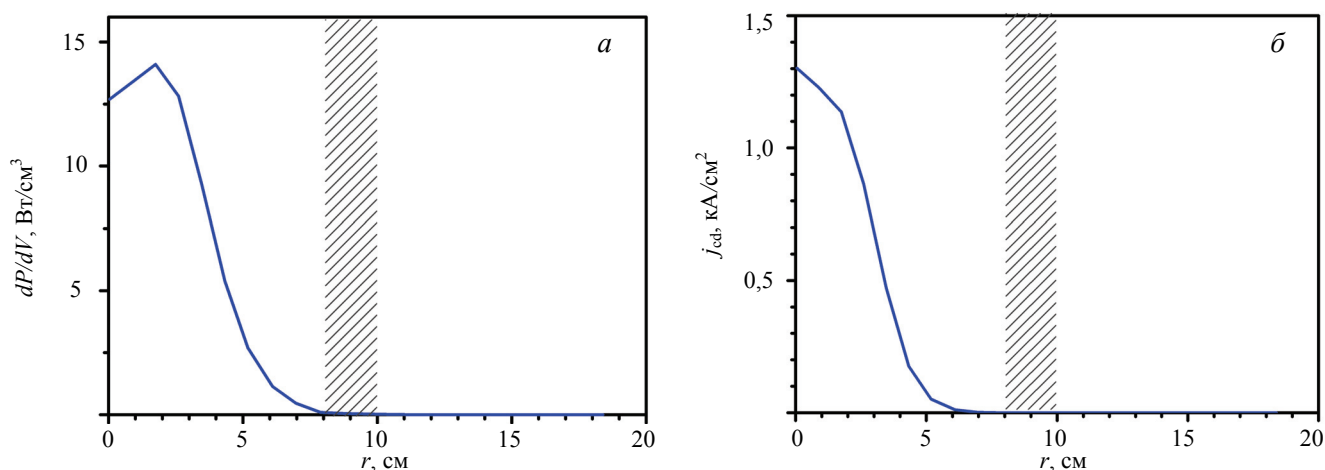


Рис. 3. Профиль плотности поглощённой СВЧ-мощности (а), профиль плотности ЭЦ-тока для импульса 61 205 (б): штриховкой показано положение радиуса переворота фазы пилообразных колебаний с учётом экспериментальной точности

Поглощение мощности в плазме вдоль траектории распространения волны от каждого гиротрона показано на рис. 4.

Поскольку гиротроны 1 и 2 имеют близкие частоты, то их области поглощения близки. Частоты этих гиротронов ниже, чем частота гиротрона 4, поэтому их область поглощения смещена в сторону слабого поля. Область поглощения для гиротрона 4 осталась практически такой же, как и в предыдущем случае.

Радиус переворота фазы пилообразных колебаний в этом импульсе составляет $r_s = 10\text{--}12$ см, т.е. поглощение всей мощности нагрева в соответствии с предсказаниями кода OGRAY происходит внутри области с $q = 1$. Профили плотности поглощённой мощности и плотности генерируемого тока показаны на рис. 5.

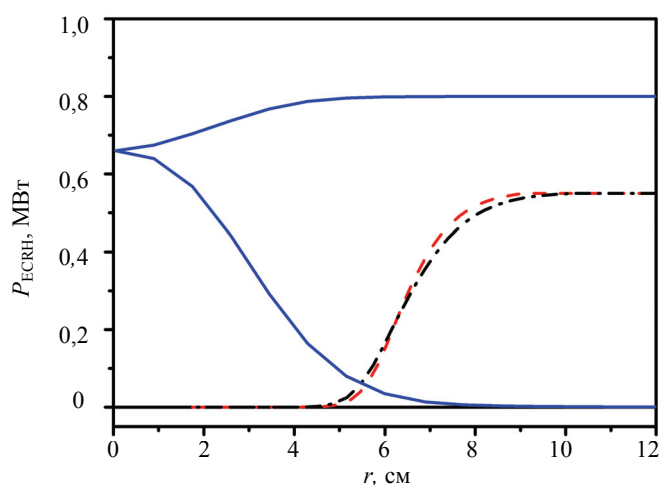


Рис. 4. Поглощение мощности вдоль траектории распространения СВЧ-волны в импульсе 61 208: — гиротрон 4; --- гиротрон 1; -.-.- гиротрон 2

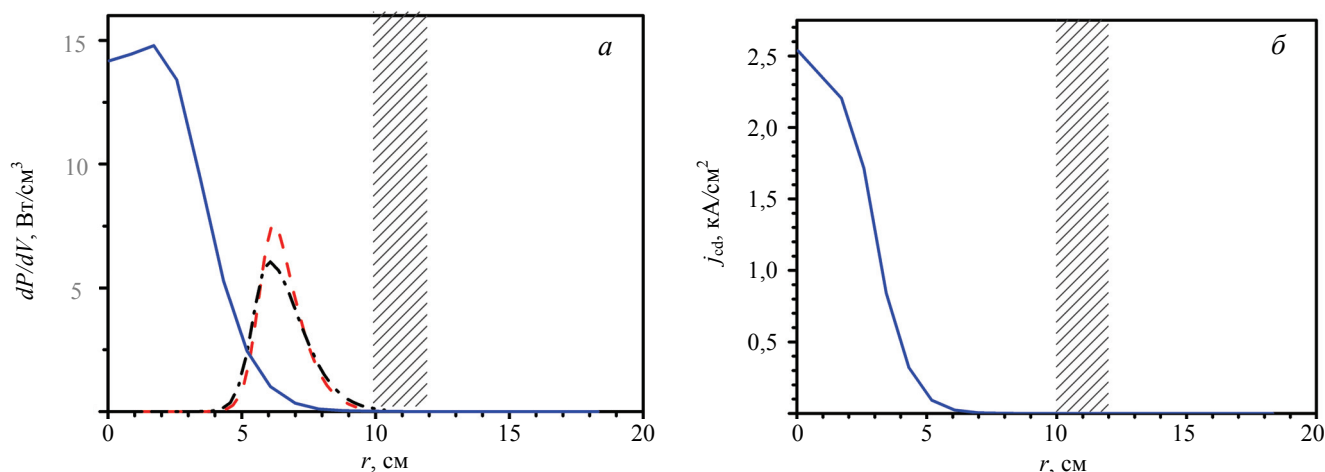


Рис. 5. Профиль плотности поглощённой СВЧ-мощности: — гиротрон 4, --- гиротрон 1, -.-.- гиротрон 2 (а) и профиль плотности ЭЦ-тока для импульса 61 208 (б)

Результирующий профиль мощности ЭЦ-нагрева показан на рис. 6.

Сравнение рис. 5, б и 3, б показывает, что плотность генерируемого тока возросла в ~ 2 раза при сохранении полуширины профиля. Это приводит к возрастанию величины полного ЭЦ-тока до 87 ± 21 кА. Такое изменение генерируемого тока не противоречит изменению температуры и плотности плазмы в зоне взаимодействия СВЧ-волны с плазмой.

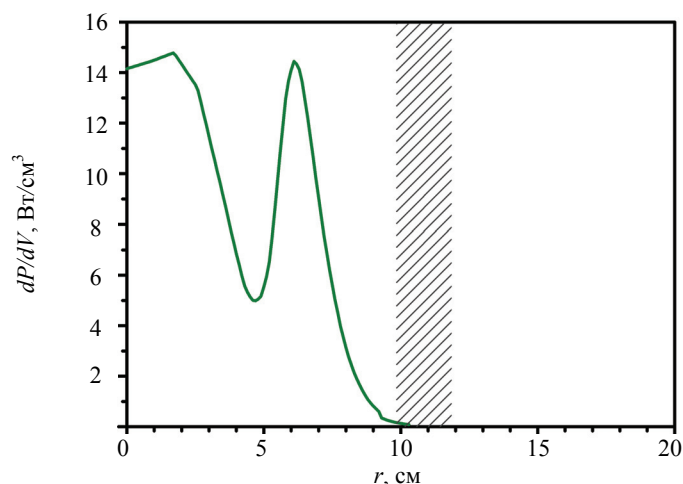


Рис. 6. Суммарный профиль поглощённой СВЧ-мощности от всех задействованных гиротронов для импульса 61 208

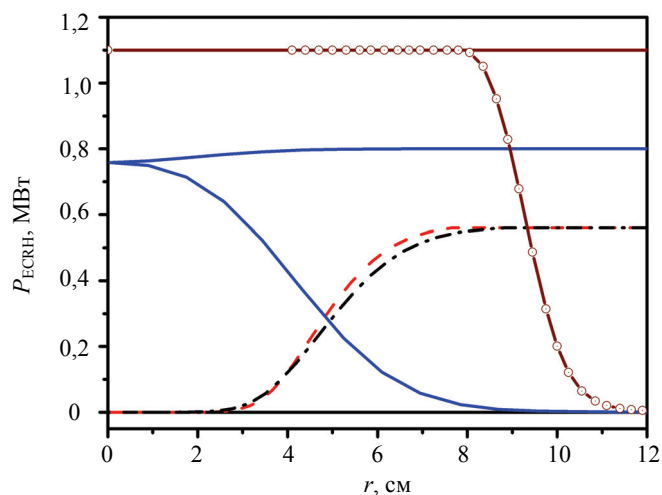


Рис. 7. Поглощение мощности вдоль траектории распространения СВЧ-волны в импульсе 61 389: — ги́ротрон 4; --- ги́ротрон 1; -.-.- ги́ротрон 2; —○— ги́ротрон 3

рентгеновских измерений, в этом импульсе составляет 10—11 см, поглощение всей мощности нагрева так же, как и в предыдущих случаях, происходит внутри области с $q = 1$. На рис. 8 показаны профили плотности поглощённой мощности и плотности ЭЦ-тока, результирующий профиль мощности ЭЦ-нагрева — на рис. 9.

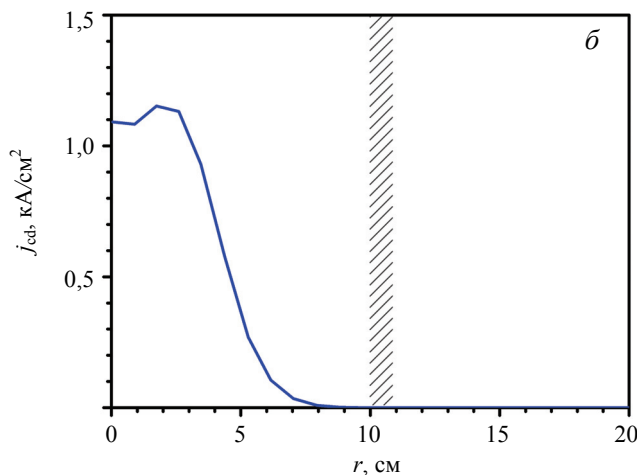
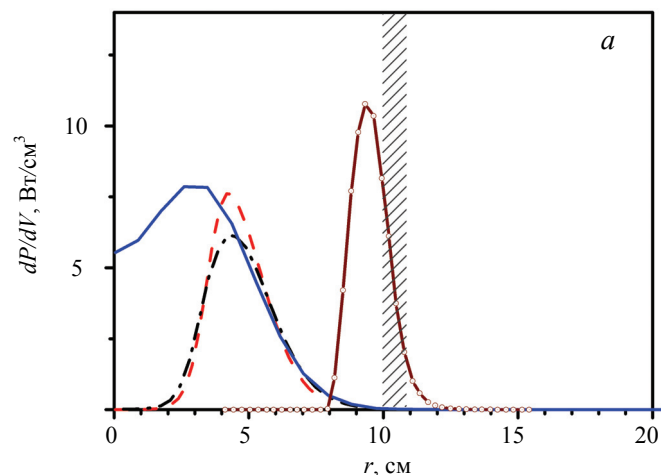


Рис. 8. Профиль плотности поглощённой СВЧ-мощности: — ги́ротрон 4, --- ги́ротрон 1, -.-.- ги́ротрон 2; —○— ги́ротрон 3 (а) и профиль плотности ЭЦ-тока для импульса 61 389 (б)

Импульс 61 389 — максимальная использованная мощность нагрева плазмы. В этом импульсе в дополнение к гиротронам, использованным в импульсе 61 205, включался гиротрон 3. Он использовался в режиме ЭЦ-нагрева (т.е. $\Psi_T = 0^\circ$) и так же, как и гиротроны 1 и 2, не давал вклад в создание тока. Для гиротрона 4 сохранялась конфигурация с $\Psi_T = 20^\circ$. По сравнению с рассмотренными разрядами в этом импульсе величина магнитного поля уменьшена до 2,4 Тл, что должно было привести к небольшому (~1 см) смещению области поглощения для всех гиротронов в сторону сильного поля. На рис. 7 показано поглощение мощности в плазме вдоль траектории распространения волны от каждого гиротрона.

Действительно, как и ожидалось, область поглощения смещается на внутренний обвод тора. Вклад мощности от гиротрона 3 оказывается наиболее нецентральным, так как для него резонансное значение магнитного поля составляет 2,5 Тл. Смещение зоны резонанса для всех гиротронов оказывается несколько более сильным, чем ожидается из простой качественной оценки. Это может быть объяснено тем, что в данном режиме за счёт более высокой плотности и температуры плазмы (см. табл. 2 и рис. 1) увеличивается газокINETическое давление плазмы и, соответственно, возрастает шафрановское смещение шнура в сторону меньшего магнитного поля. Это приводит к дополнительному радиальному смещению области поглощения.

Радиус поворота фазы пилообразных колебаний, определённый из многоканальных

Область резонансного взаимодействия СВЧ-волны с плазмой для гиротрона 4 при данном значении магнитного поля сильнее сместилась на внутренний обвод тора. Это привело к увеличению ширины профиля вложенной мощности с уменьшением пикового значения (см. рис. 8, а в сравнении с рис. 5, а). При этом полная величина генерируемого тока практически не изменилась по сравнению с предыдущим случаем, несмотря на увеличение температуры плазмы. Согласно расчётам OGRAY ЭЦ-ток в этом импульсе составил 80 ± 15 кА.

Положение зоны поглощения для всех гиротронов с $\Psi_T = 0^\circ$ практически совпадает с положением холодного резонанса, т.е. определяется условием $\omega - 2\omega_{ce} = 0$ (где $\omega = 2\pi f$, $\omega_{ce} = 2\pi f_{ce}$, где f_{ce} — частота ЭЦ-резонанса, множитель 2 перед ω_{ce} появляется, так как в Т-10 нагрев осуществляется на второй гармонике ЭЦ-резонанса). Для гиротронов с $\Psi_T = 20^\circ$ область максимального поглощения смещена от зоны холодного резонанса на ~ 5 см в сторону слабого магнитного поля. Это связано с появлением слагаемого $k_{||}v_{||}$ в условии резонанса: $\omega - 2\omega_{ce} = k_{||}v_{||}$ ($k_{||}$ — продольный волновой вектор СВЧ-волны, $v_{||}$ — продольная скорость резонансных электронов).

Оценка эффективности генерации тока. Достигнутая эффективность генерации тока рассчитывалась по формуле (1). Значения, определённые на основании расчётов по коду OGRAY для каждого из обсуждаемых импульсов, приведены в табл. 3.

Таблица 3. Расчётные значения эффективности генерации тока

Номер импульса	$\eta_{EC}, 10^{19} \text{ A/Bт/м}^2$
61 205	$0,15 \pm 0,04$
61 208	$0,30 \pm 0,07$
61 389	$0,31 \pm 0,05$

Предсказываемые кодом величины эффективности генерации тока для импульса 61 205 близки к ранее полученным на Т-10 в экспериментах с генерацией тока на второй гармонике ЭЦ-частоты [5]. В импульсах 61 208 и 61 389, в которых наряду с генерацией тока используется дополнительная мощность для увеличения температуры плазмы, эффективность генерации оказывается даже выше, что, по-видимому, соответствует проявлению температурной зависимости (рис. 10) [4, 6].

ДОСТИГНУТАЯ ДОЛЯ НЕИНДУКЦИОННОГО ТОКА

Оценка величины бутстреп-тока I_{bs} была сделана по формуле [8]

$$\frac{I_{bs}}{I_p} = C\epsilon^{1/2}\beta_p, \quad (2)$$

где I_p — величина полного тока плазмы; ϵ — обратное аспектное отношение; β_p — отношение газодинамического давления плазмы к давлению полоидального магнитного поля; C — численный коэффициент, который в соответствии с [8] обычно принимается равным 0,3—0,7. Оценки доли неиндукционного тока в рассмотренных (реализованных) режимах Т-10 приведены в табл. 4.

С помощью кода ASTRA [9] было проведено моделирование распределения тока плазмы с учётом бутстреп-тока с использованием модели Хинтона—Хазелтайна [10] и модели Сотера [11]. Первая из перечисленных моделей хорошо описывает распределение тока плазмы в установках с большим аспектным отношением

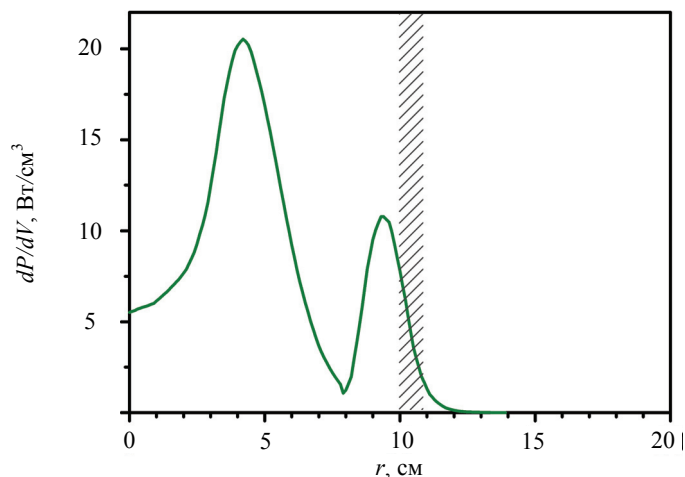


Рис. 9. Суммарный профиль поглощённой СВЧ-мощности от всех задействованных гиротронов для импульса 61 389

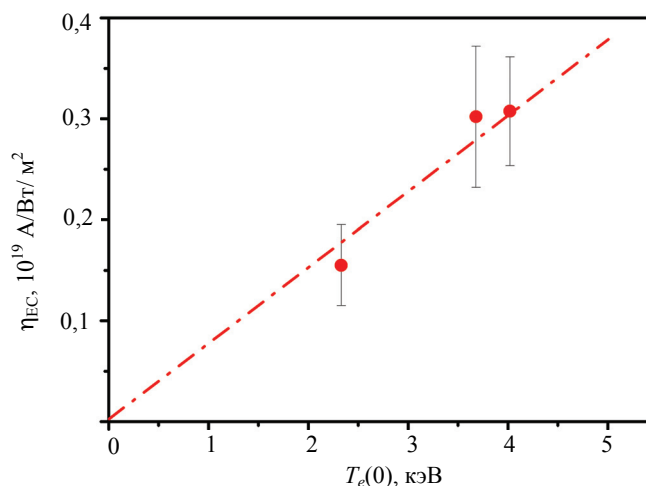


Рис. 10. Зависимость эффективности генерации тока от температуры плазмы

Т а б л и ц а 4. Оценка доли неиндукционного тока

Номер импульса	I_p , кА	I_{bs} , кА			I_{ec} , кА	$(I_{ec} + I_{bs})/I_p$
		(1)*	(2)**	(3)***		
61 205	220	22 ± 8	13	16	46 ± 11	$0,30 \pm 0,10$
61 208	220	26 ± 11	19	23	87 ± 21	$0,50 \pm 0,15$
61 389	200	34 ± 14	24	30	80 ± 15	$0,57 \pm 0,15$

* Оценка бутстреп-тока по формуле (2).

** Оценка бутстреп-тока по формуле Хинтона—Хазелтайна [10].

*** Оценка бутстреп-тока по формуле Сотера [11].

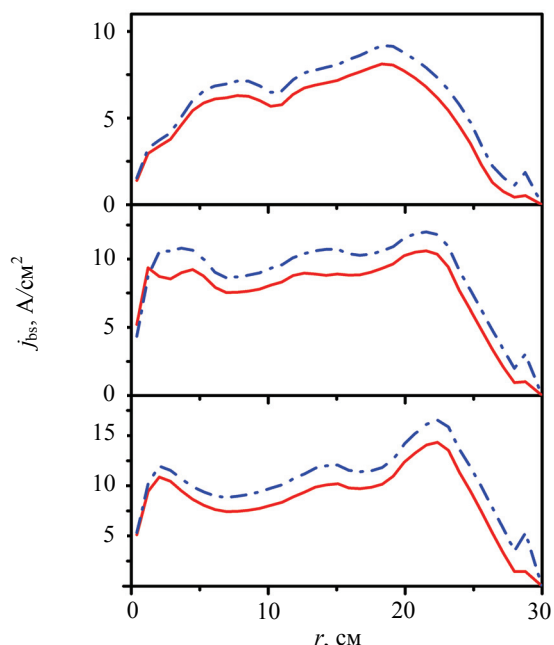


Рис. 11. Профили бутстреп-тока, посчитанные по модели Хинтона-Хазелтайна (—) и Сотера (---): импульс 61 205 (а); импульс 61 208 (б); импульс 61 389 (в)

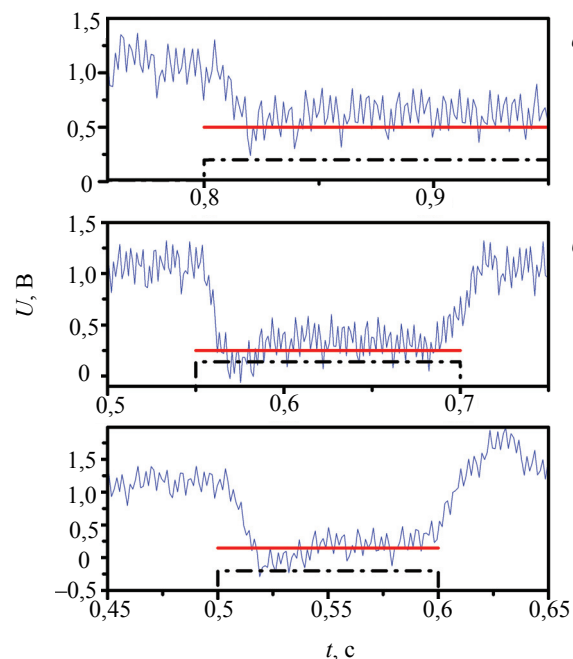


Рис. 12. Экспериментальная осциллограмма напряжения на обходе тора (—), расчётное напряжение на обходе тора (горизонтальная прямая) для импульсов 61 205 (а), 61 208 (б), 61 389 (в): --- — длительность СВЧ-нагрева

(для Т-10 $A = 5$). Вторая модель — более поздняя, уточнённая. Она не содержит предположений или ограничений на величину аспектного отношения и частоту столкновений. Сравнение профилей бутстреп-тока, полученных по двум моделям, показано на рис. 11.

На рис. 12 показано сопоставление экспериментальных значений напряжения на обходе тора и значений напряжения, полученных из расчётов по коду ASTRA, выполненных с учётом ЭЦ- и бутстреп-тока, определённого по модели Хинтона—Хазелтайна. Видно, что расчётные значения неиндукционного тока не противоречат имеющимся экспериментальным данным.

ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ УВЕЛИЧЕНИЯ ДОЛИ НЕИНДУКЦИОННОГО ТОКА

В предыдущем разделе было показано, что в Т-10 в режиме с $q_L \sim 3,5$ (т.е. интересном с точки зрения токамака-реактора) можно получить неиндукционный ток, составляющий $\sim 50\%$ от полного тока плазмы при использовании четырёх гиротронов для нагрева плазмы, один из которых включён в режим нагрева и генерации тока. Для увеличения доли ЭЦ-тока в дальнейшей работе Т-10 гиротрон 3 может быть использован в режиме генерации тока, т.е. с тороидальным углом ввода СВЧ-волны $\Psi_T \neq 0$. Дополнительные расчёты по коду OGRAY были выполнены для этого гиротрона для параметров импульса 61 389. Тороидальный угол ввода СВЧ-мощности задавался $\Psi_T = +20^\circ$. В этом случае можно ожидать, что основные параметры экспериментального режима (температура плазмы, плотность) не должны измениться, локализация вклада мощности внутри $q = 1$ должна сохраниться, поэтому в расчётах по коду OGRAY можно использовать параметры экспериментального режима 61 389.

Результаты расчёта профиля генерируемого тока от гиротронов 3 и 4 показаны на рис. 13. Полный ЭЦ-ток от гиротрона 3 составил 108 ± 17 кА. В соответствии с представленным расчётом (см. табл. 3) ЭЦ-ток от гиротрона 4 составляет 80 ± 15 кА. Таким образом, можно ожидать, что суммарный ЭЦ-ток составит 188 ± 32 кА, что с учётом бутстреп-тока позволит ожидать полного замещения омического тока плазмы.

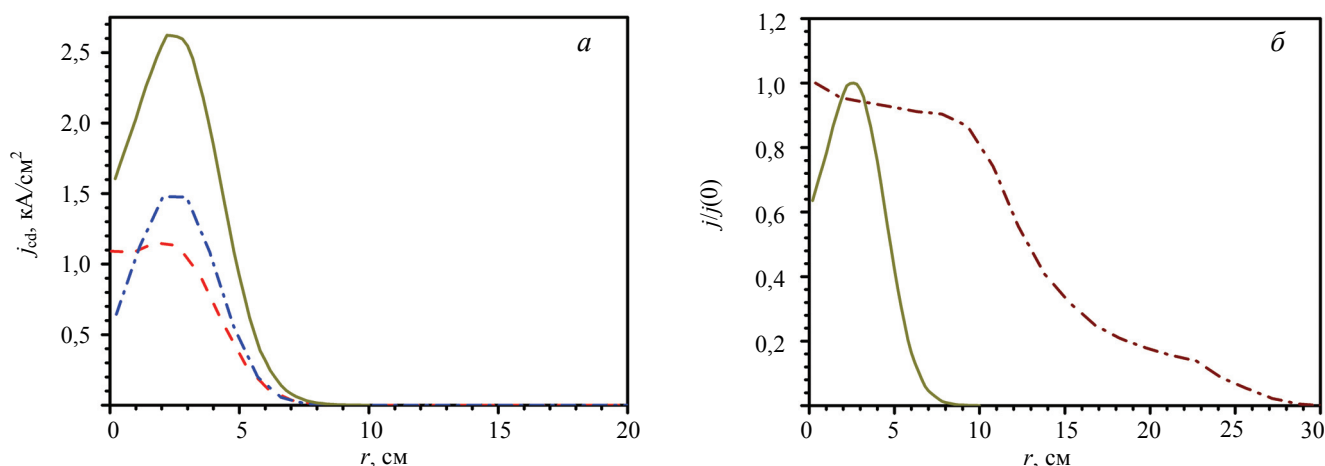


Рис. 13. Импульс 61 389. Плотность ЭЦ-тока: — — — гиротрон 4; - · - · - гиротрон 3; — — — результирующий профиль генерируемого тока (а), нормированные на пиковую величину распределения генерируемого тока (—) и омического тока (- · - · -) (б)

Следует обратить внимание на то, что расчётный профиль полного генерируемого тока локализован в узкой зоне вблизи центра плазменного шнура, $r/a < 0,3$. В режиме с теми же параметрами плазмы, но в случае, когда весь ток создаётся индукционным способом, профиль тока оказывается гораздо более широким (см. рис. 13, б). В экспериментах TCV [2] показано, что МГД-неустойчивости ограничивают минимально возможную ширину профиля неиндукционного тока и снижают максимально достижимую величину эффективности генерации тока. В упоминаемых экспериментах TCV нормализованная эффективность генерации тока ($\eta_{\text{norm}} = \eta_{\text{EC}}/T_e$) уменьшалась с ростом вложенной мощности. Это означает, что разряд с полностью неиндукционным поддержанием тока с профилем генерируемого тока, представленным на рис. 13, а, может оказаться неустойчивым, что потребует дополнительных экспериментов, направленных на выбор оптимальной геометрии ввода ЭЦ-волн.

ВЫВОДЫ

Для режимов с высокой мощностью нагрева плазмы в T-10 проведен анализ возможности обновленного комплекса ЭЦ-нагрева с точки зрения получения режимов с высокой долей неиндукционного тока.

Рассмотрены режимы с полной мощностью ЭЦ-нагрева до 3 МВт (мощность, используемая для генерации тока, не превышала 2 МВт). Расчёты, выполненные с помощью кодов OGRAY и ASTRA, показывают, что модернизация гиротронного комплекса T-10 позволит получить режимы с высокой долей неиндукционного тока плазмы вплоть до полного неиндукционного поддержания тока с долей бутстреп-тока ~15% в режиме с $I_p = 200\text{—}220$ кА ($q_L \approx 3,5$). Предсказываемая кодом OGRAY эффективность генерации ЭЦ-тока в рассмотренном диапазоне параметров плазмы увеличивается линейно с ростом температуры плазмы от $0,15 \cdot 10^{19}$ А/Вт/м² при $T_e(0) = 2,8$ кэВ до $\sim 0,3 \cdot 10^{19}$ А/Вт/м² при $T_e(0) \approx 4$ кэВ.

Однако расчётный профиль неиндукционного тока оказывается узко локализованным. Можно ожидать, что создание такого профиля тока в экспериментальном режиме может привести к развитию неустойчивости, которая приведёт к снижению эффективности генерации тока, как наблюдалось в [2]. В связи с этим дополнительные эксперименты могут потребоваться для оптимизации ввода ЭЦ-мощности и получения устойчивого разряда с высокой долей неиндукционного тока.

Авторы благодарят коллектив диагностического комплекса T-10, на основании результатов измерений которого выполнены приведённые в данной статье расчёты.

Авторы благодарят А.А. Сковороду за постоянный интерес к работе авторского коллектива, поддержку и участие в обсуждении результатов. Выполнение данной работы было бы также невозможным без помощи А.Ю. Куянова, который помог нам в обеспечении технической возможности проведения расчётов по коду OGRAY.

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки (контракт № 16.518.11.7004) и Госкорпорации «Росатом» (контракт № Н.4х.45.90.12.1023).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Alikaev V.V. et al.** — Nucl. Fusion, 1992, vol. 32, p. 1811.
2. **Coda S. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2000, vol. 42, B311.
3. **Gruber O. et al.** — In: Proc. 18th IAEA Fusion Energy Conf. Sorrento, 2000, IAEA-CN-77/OV2/1.
4. **ITER Phys. Bas.** — Nuclear Fusion, 1999, vol. 39, p. 2137.
5. **Esipchuk Yu.V.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 1995, vol. 37, p. A267.
6. **Petty C.C. et al.** — Nuclear Fusion, 2001, vol. 41, p. 551.
7. **Звонков А.В. и др.** — Физика плазмы, 1998, вып. 24, с. 424.
8. **Wesson J.** — Tokamaks, 2004.
9. **Pereversev G.V., Yushmanov P.N.** ASTRA — Automated System for TRansport Analysis. IPP 5/98, February 2002.
10. **Hinton F.L., Hazeltine R.D.** — Rev. Mod. Phys., 1976, vol. 48, p. 239.
11. **Sauter O. et al.** — Phys. Plasmas, 1999, vol. 6, p. 2834.



Наталья Александровна Кирнева, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
kirneva@nfi.kiae.ru



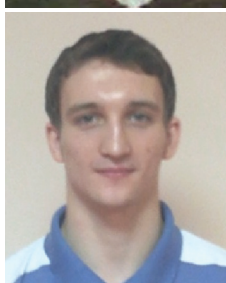
Александр Алексеевич Борщеговский, с.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
borsch@nfi.kiae.ru



Александр Яковлевич Кислов, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
aj@nfi.kiae.ru



Дмитрий Александрович Кислов, заместитель начальника отдела, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
dkislov@nfi.kiae.ru



Никита Александрович Мустафин, инженер; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
nix8807@rambler.ru



Геннадий Евсеевич Ноткин, начальник отдела; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
notkin@nfi.kiae.ru



Юрий Дмитриевич Павлов, в.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
pavlov@nfi.kiae.ru



Игорь Николаевич Рой, с.н.с.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
roy@nfi.kiae.ru



Елена Валентиновна Трухина, ведущий программист; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия
trukhina@mail.ru

Статья поступила в редакцию 14 мая 2012 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2012, вып. 3, с. 59—68.