

УДК 621.039.643

О ВОЗМОЖНОСТИ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЭЦР-НАГРЕВА И ГЕНЕРАЦИИ ТОКА В УСТАНОВКАХ ДЕМО-С И ДЕМО-ТИН

Н.А. Кирнева^{1,2}

¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

В статье приведены первые результаты расчётов вклада мощности электронно-циклотронного нагрева и распределения электронно-циклотронного тока в установках ДЕМО-С и ДЕМО-ТИН для проектных параметров установок и модельных распределений температуры, плотности и эффективного заряда плазмы. Расчёты выполнены с помощью кода OGRAY для центрального и нецентрального вклада мощности. Показано, что для электронно-циклотронного нагрева и генерации тока в центральной части плазменного шнура в установке ДЕМО-ТИН требуются источники волны, работающие в доступном в современных экспериментах диапазоне частот ~140—160 ГГц. Нецентральный вклад мощности в ДЕМО-ТИН в расчётах обеспечивался смещением области резонанса на сторону сильного магнитного поля. Показано, что для генерации ЭЦ-тока на $\rho \sim 0,65$ в экваториальной плоскости на стороне сильного поля частота волны должна быть увеличена до ~185 ГГц. Для нагрева плазмы и генерации тока с помощью ЭЦ-волн в установке ДЕМО-С требуются источники ЭЦ-излучения, работающие в диапазоне 200—230 ГГц. В режимах с низкой температурой плазмы ($T_e(0) < 10$ кэВ) в обеих установках доля однопроходного поглощения при нецентральном вкладе мощности оказалась ниже 50%, что требует дальнейшей оптимизации геометрии ввода мощности и, возможно, сценария разряда.

Ключевые слова: электронно-циклотронный нагрев, неиндукционное поддержание тока, ДЕМО-С, ДЕМО-ТИН.

ON THE POSSIBILITY OF USING ECR HEATING AND CURRENT DRIVE IN DEMO-S AND DEMO-FNS

N.A. Kirneva^{1,2}

¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

The article presents the first results of calculations of the distribution of electron-cyclotron heating power and driven current in DEMO-S and DEMO-FNS tokamaks for design parameters of installations and model distributions of temperature, density and effective plasma charge. Calculations were made using the OGRAY code for on-axis and off-axis power deposition. It has been shown that on-axis electron cyclotron heating and current drive in the DEMO-FNS tokamak require wave sources operating in the frequency range ~140—160 GHz available in modern experiments. The off-axis power absorption in DEMO-FNS was provided in calculations by shifting the resonance area to the high field side (HFS). It has been shown that in order to generate EC current at $\rho \sim 0.65$ on the equatorial on HFS, the wave frequency must be increased to ~185 GHz. To heat the plasma and generate current using EC waves in the DEMO-S tokamak, EC radiation sources operating in the 200—230 GHz range are required. In regimes with low plasma temperature ($T_e(0) < 10$ keV) in both DEMO-FNS and DEMO-S, the single pass absorption with off-axis power contribution was below 50%, which requires further optimization of the power launch geometry and, possibly, the discharge scenario.

Key words: electron-cyclotron heating, noninductive current drive, DEMO-S, DEMO-FNS.

DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-4-93-104

ВВЕДЕНИЕ

Электронно-циклотронный резонансный (ЭЦР) нагрев — один из методов дополнительного нагрева плазмы и создания неиндукционного тока в токамаках и стеллараторах, который широко применяется в существующих установках и рассматривается для использования в токамаках следующих поколений, включая ИТЭР [1] и ДЕМО [2]. Локальность зоны вклада мощности, отсутствие материальных конструкций, вносимых в вакуумную камеру установки, и сравнительная компактность системы делают ЭЦР-нагрев привлекательным для установок реакторных масштабов. Однако список задач, для которых ЭЦР-нагрев и генерация тока (ЭЦРН/ЭЦГТ) могут быть использованы в установках следующего поколения, несколько сужается по сравнению с предшествовавшими и современными токамаками. В установках-предшественниках ИТЭР системы ЭЦРН/ЭЦГТ применялись и применяются для широкого круга исследовательских задач [1, 3, 4], включая:

- изучение механизмов взаимодействия СВЧ-волны с плазмой;
- нагрев плазмы;

- оптимизацию условий старта разряда;
- изучение процессов переноса энергии и частиц;
- изучение влияния ЭЦР-нагрева на вращение плазмы;
- изучение механизмов формирования режимов улучшенного удержания (H-моды, режимов с внутренними транспортными барьерами);
- получение и исследование режимов с полностью неиндукционным поддержанием тока;
- разработку алгоритмов управления профилем тока плазмы;
- создание алгоритмов управления профилем плотности плазмы и распределением примесей;
- разработку алгоритмов контроля МГД-активности плазмы (пилообразными колебаниями, классическими и неклассическими тиринг-модами (НТМ), периферийными модами (ELMs));
- разработку алгоритмов предотвращения срывов.

Для установок реакторных масштабов (ИТЭР, ДЕМО) акцент в использовании систем нагрева и генерации тока смещается к рутинной реализации алгоритмов управления плазмой. В [2] рассмотрены задачи и требования к системе ЭЦРН/ЭЦГТ для европейского проекта DEMO-EU (табл. 1). Отмечается, что система ЭЦРН/ЭЦГТ в установке DEMO должна позволять одновременно обеспечить центральный и далёкий нецентральный вклад мощности (ρ вплоть до 0,85, где ρ — нормализованный малый радиус магнитной поверхности).

Таблица 1. Основные задачи ЭЦРН/ЭЦГТ в европейском проекте DEMO (по материалам [2])

| Задача | Требуемая мощность, МВт | Локализация, ρ | Основная функция ЭЦРН/ЭЦГТ |
|--|-------------------------|---------------------|--|
| Оптимизация условий пробы | 6—10 | <0,3 | Нагрев |
| Стадия подъёма тока, осуществление L—H перехода, нагрев на основной стадии разряда | 50 | <0,3 | Нагрев и создание неиндукционного тока |
| Управление пилообразными колебаниями | 2—10 | <0,3 | Генерация тока, управление профилем тока |
| Управление НТМ ($q = 3/2$; $q = 2$) | 10—15 | 0,75; 0,85 | Генерация тока |
| Вывод тока | 40 | 0,3—0,5 | Нагрев |

Использование ЭЦ-волн для нагрева плазмы и генерации тока также предусматривается в проектах K-DEMO (Южная Корея [5]), CFETR (Китай [6]) и DEMO Slim-CS (Япония [7]).

В проекте K-DEMO предполагается использовать ЭЦРН/ЭЦГТ для локального изменения профиля тока вблизи рациональных поверхностей с низким значением коэффициента запаса устойчивости q и активного управления МГД-устойчивостью плазмы [5]. Предполагается, что вклад мощности должен быть локализован в области $0,2 < \rho < 0,6$. Пока параметры комплекса ЭЦРН/ЭЦГТ детально не рассматриваются из-за высокого тороидального магнитного поля установки ($B_T = 7,4$ Тл) и, как следствие, необходимости разработки источников СВЧ-излучения с частотой $f > 200$ ГГц.

В установке CFETR ЭЦ-волны предполагается использовать для изменения профиля тока таким образом, чтобы для коэффициента запаса устойчивости q выполнялось условие $q(\rho) > 2$ по всему сечению плазмы [8]. Предполагается, что ЭЦ-ток будет создаваться в области $\rho \sim 0,5$ [8] и составлять до 40% от полного тока плазмы [9]. Современные эксперименты на токамаках показывают, что создание профилей тока с $q(\rho) > 2$ по всему сечению плазменного шнура может осложняться формированием области нулевого полного тока $I_p = 0$ (current hole) [10]. Для того чтобы избежать этого, в установке CFETR будет создаваться небольшой ЭЦ-ток в центральной области плазмы за счёт вклада мощности ~ 1 МВт [8].

В работе [7] рассматривается концепция системы ЭЦРН/ЭЦГТ для японской установки DEMO в её модификации Slim CS 2005 г., т.е. в конфигурации с малым аспектным отношением $A = 2,5$. Поскольку тороидальное магнитное поле в этой установке $B_T = 5,5$ Тл близко к значению магнитного поля в ИТЭР, то авторы рассматривают возможность использования гиротронов с $f = 170$ ГГц, которые создаются для ИТЭР. Области использования ЭЦРН/ЭЦГТ в DEMO-Slim CS в [7] сформулированы в общих чертах: нагрев плазмы, поддержание тока плазмы и стабилизация плазменных неустойчивостей с использованием локализованной генерации тока.

В российском проекте ДЕМО-С [11, 12] первоначально для нагрева плазмы и создания неиндукционного тока рассматривалась инжекция быстрых атомов и ВЧ-волны в диапазоне частот ионного циклотронного резонанса, а использование ЭЦРН/ЭЦГТ не обсуждалось. В установке ДЕМО-ТИН предполагается использование ЭЦГТ мощностью до 6 МВт для увеличения доли неиндукционного тока [13].

Данная работа представляет собой первую попытку расчётов локализации вклада мощности ЭЦР-нагрева, а также ожидаемых величин и профилей ЭЦ-тока в установках ДЕМО-С и ДЕМО-ТИН. Полученные результаты позволяют перейти к дальнейшему обсуждению круга задач для системы ЭЦРН/ЭЦГТ в этих установках, поиску необходимых технологических решений, а также оценке возможности технической реализации системы.

УСЛОВИЯ РАСЧЁТОВ

Расчёты профилей вложенной мощности и генерируемого тока, представленные в этой работе, выполнены с помощью кода OGRAY [14]. Параметры установок ДЕМО-С и ДЕМО-ТИН, использованные в расчётах, приведены в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. Параметры установок ДЕМО-С и ДЕМО-ТИН, закладываемые в расчёты

| Параметр | ДЕМО-С [11] | ДЕМО-ТИН [13] |
|---|-------------|---------------|
| Тороидальное магнитное поле B_T , Тл | 7,7 | 5,0 |
| Большой радиус плазмы R_0 , м | 7,8 | 3,2 |
| Малый радиус плазмы a , м | 1,5 | 1,0 |
| Вытянутость k | 1,85 | 2 |
| Аспектное отношение A | 5,2 | 3,2 |
| Треугольность δ | 0,4 | 0,5 |
| Полный ток плазмы I_p , МА | 10 | 5 |
| Средняя плотность плазмы по объёму $\langle n_e \rangle$, 10^{20} м^{-3} | 1,0 | 1,0 |
| Мощность ЭЦР-нагрева P_{heat} , МВт | 10 | 10 |

Подготовка входных данных для кода OGRAY (распределение температуры, плотности, файл равновесия) проводилась с использованием кода ASTRA [15].

Распределение плотности плазмы задавалось следующими формулами:

$$\begin{aligned}
 n_e(r/a) &= (n_e(0) - n_e(a))(1 - (r/a)^2)^{0,5} + n_e(a); \\
 n_e(0) &= 1,25 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}; \\
 n_e(a) &= 0,2 n_e(0).
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Переход к радиальной координате, выраженной как функция тороидального магнитного потока Ψ_T , $\rho = \sqrt{\Psi_T / \Psi_T(a)}$, приводит профили плотности к виду, показанному на рис. 1.

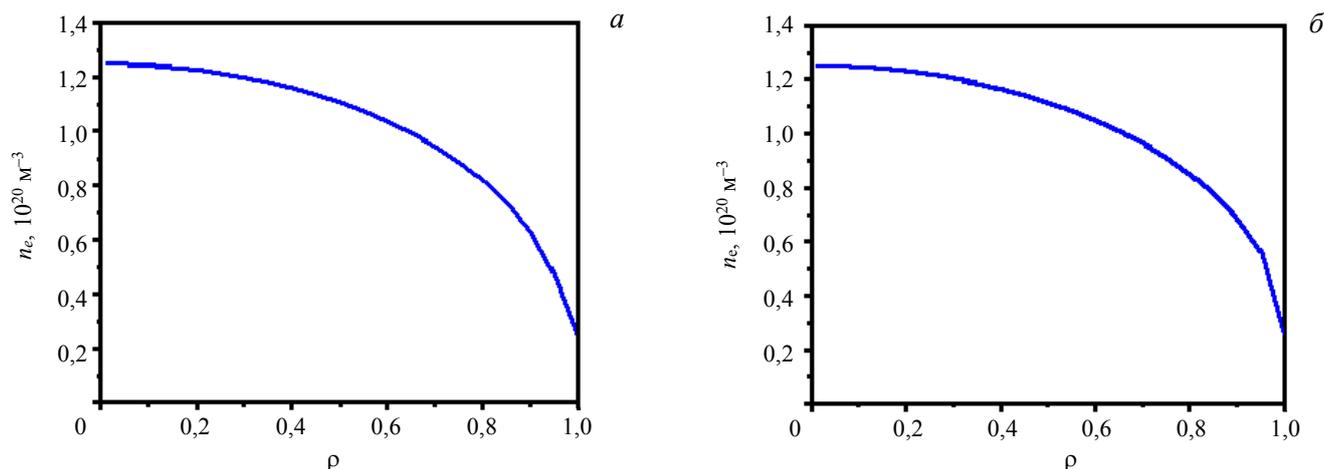


Рис. 1. Модельные профили плотности плазмы для ДЕМО-ТИН (а) и ДЕМО-С (б)

Фактор пикированности для профиля плотности, заданного в (1), составляет $n_e(0)/\langle n_e \rangle \approx 1,4$, разумность этого значения может быть обоснована, опираясь на прогнозируемые профили плотности в ИТЭР и результаты экспериментов на современных токамаках. В документах ИТЭР [1] для основного рабочего сценария рассматривается плоский профиль плотности с $n_e(0)/\langle n_e \rangle \approx 1$. В то же время анализ экспериментальной базы данных действующих токамаков показывает, что форма профиля плотности зависит от столкновительности [16] и в режимах с низкой столкновительностью $\nu^* \sim 0,1$ достигает зна-

чений $n_e(0)/\langle n_e \rangle \approx 1,6$. Более того, как показано в работе [17], увеличение пикированности профиля плотности в реакторной установке позволяет заметно увеличить ожидаемые значения термоядерного выхода при прочих равных условиях. В дополнение отметим, что в европейском проекте ДЕМО рассматривается возможность реализации профилей плотности с фактором пикированности от 1 до 1,3—1,4 [18]. Таким образом, выбранная форма профиля плотности является вполне допустимой.

Распределение температуры плазмы ($T_i = T_e$) задавалось формулами

$$\begin{aligned} T_e(r/a) &= (T_e(0) - T_e(a))(1 - (r/a)^2)^2 + T_e(a); \\ T_e(0) &= 5,1 \text{ кэВ для ДЕМО-ТИН}; \\ T_e(0) &= 10,2 \text{ кэВ для ДЕМО-С}; \\ T_e(a) &= 0,02T_e(0). \end{aligned} \tag{2}$$

Профили температуры в зависимости от координаты $\rho = \sqrt{\Psi_T/\Psi_T(a)}$ показаны на рис. 2. Значение центральной температуры в расчётах менялось с сохранением формы профиля.

Эффективный заряд плазмы предполагался постоянным по радиусу $Z_{\text{эф}}(\rho) = 1,5$.

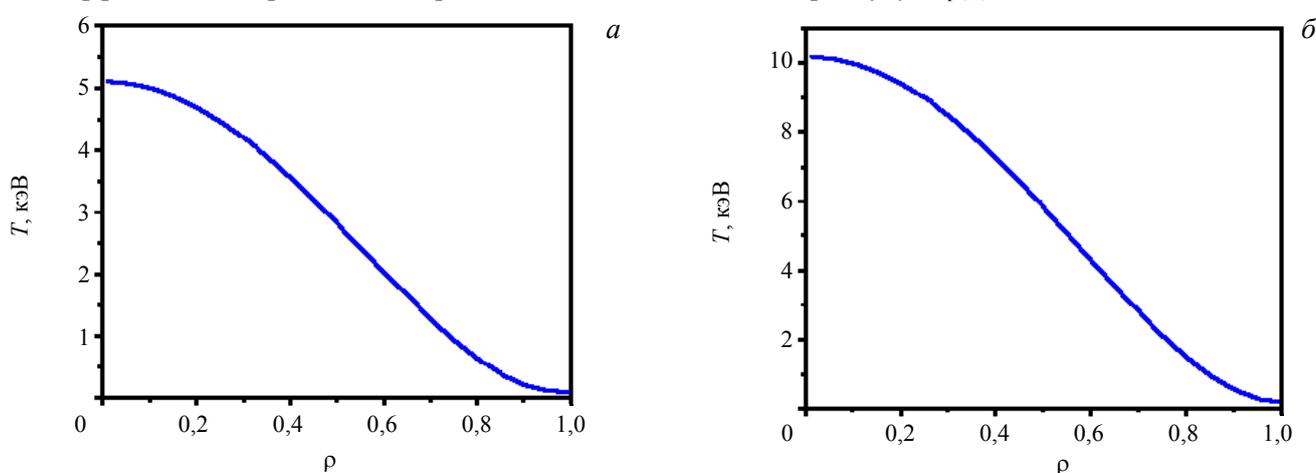


Рис. 2. Модельные профили температуры плазмы для ДЕМО-ТИН (а) и ДЕМО-С (б)

Для создания файла равновесия в коде ASTRA проводилось моделирование распределения тока и коэффициента запаса устойчивости q . Проводимость плазмы считалась неоклассической и вычислялась по формуле Хинтона—Хазелтайна [19], учитывался бутстреп-ток, но не учитывались неиндукционные токи, созданные внешними источниками, поэтому распределение тока соответствовало распределению профиля температуры, и в центральной области плазмы существовала поверхность $q = 1$ (рис. 3). Следует отметить, что значение коэффициента запаса устойчивости вблизи границы q_{95} при расчёте равновесия в коде ASTRA для установки ДЕМО-С хорошо согласуется с аналитической формулой, рекомендованной в [1] (см. формулу (A11)). Расчёт равновесия для установки ДЕМО-ТИН для параметров, приве-

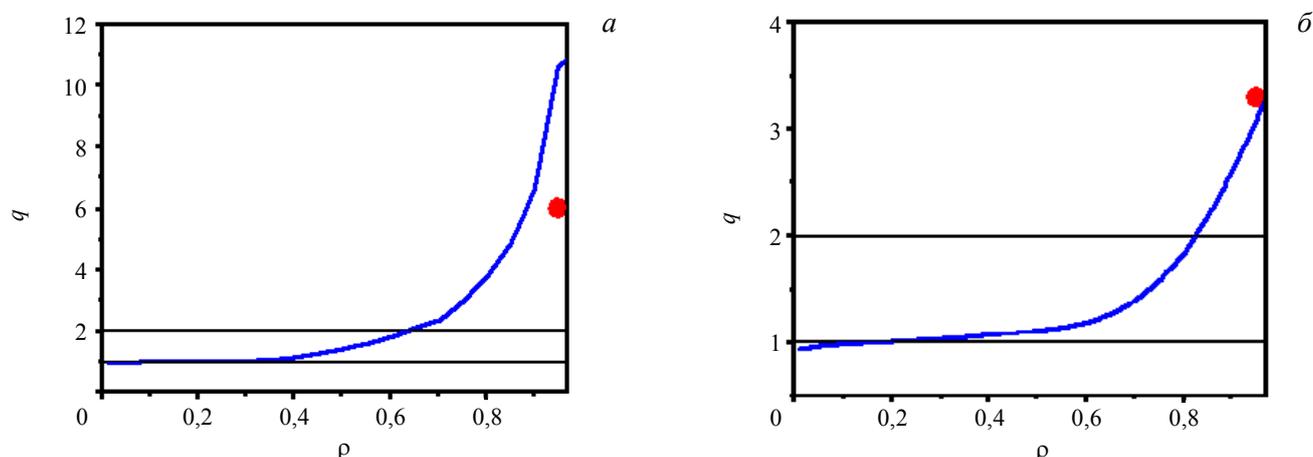


Рис. 3. Расчётное распределение коэффициента запаса устойчивости для ДЕМО-ТИН (а) и ДЕМО-С (б): ● — значение, полученное по формуле из [1]; — результат расчёта по коду ASTRA

дённых в табл. 2 (I_p , B_T , геометрические параметры), даёт несколько завышенное значение q на границе (см. рис. 3, а). Однако для оценки возможностей поглощения мощности, распределения мощности и закономерностей изменения генерируемого тока в области $q \leq 2$ это, по-видимому, не является существенным ограничением.

Задачи, перечисленные в табл. 1, показывают, что в установке реакторных масштабов комплекс ЭЦР-нагрева и генерации тока по возможности должен обеспечивать вклад мощности в довольно широком диапазоне. Профили $q(\rho)$ на рис. 3 показывают, что в установках ДЕМО-ТИН и ДЕМО-С это соответствует изменению положения зоны вклада мощности от центра плазменного шнура до $\rho \sim 0,6$ — $0,7$ (ДЕМО-ТИН) и $\rho \sim 0,85$ (ДЕМО-С).

Для того чтобы построить параметрические зависимости, дополнительно проводились изменения $T_e(0)$ и $n_e(0)$ при неизменной форме профиля.

В расчётах в плазму вводилась обыкновенная волна на первой гармонике ЭЦ-частоты со стороны слабого магнитного поля. Диапазон частот, рассматриваемый для установки ДЕМО-ТИН, составлял 138—185 ГГц, что при $B_T = 5$ Тл соответствовало вкладу мощности в области $0 \leq \rho \leq 0,66$, т.е. от центра плазменного шнура вплоть до поверхности $q = 2$ со смещением области вклада мощности на сторону сильного магнитного поля. Значения плотности отсечки составляют $2,36 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ для частоты 138 ГГц и $4,2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ для 185 ГГц. Смещение области ЭЦР-нагрева на сторону сильного магнитного поля при нецентральной нагреве/генерации тока является предпочтительным, поскольку экспериментальные исследования и теоретические расчёты показали [20], что благодаря снижению количества запертых частиц эффективность генерации ЭЦ-тока на стороне сильного поля оказывается в несколько раз выше, чем при вкладе мощности на той же магнитной поверхности на стороне слабого поля.

Для установки ДЕМО-С было рассмотрено распространение ЭЦ-волны в диапазоне частот $f = 203$ — 290 ГГц, что соответствовало сканированию области плазмы, лежащей внутри поверхности $q = 2$, от стороны слабого магнитного поля ($R > R_0$) до стороны сильного магнитного поля ($R < R_0$). Значения плотностей отсечки для частот в обсуждаемом диапазоне меняются от $5,1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ($f = 203$ ГГц) до $10 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ($f = 290$ ГГц), что существенно превышает ожидаемые значения плотности плазмы в рабочих режимах установки.

Источник волны (последнее зеркало) был расположен на $R = 425$ см для ДЕМО-ТИН и на $R = 950$ см для ДЕМО-С в экваториальной плоскости установки (вертикальная координата $z = 0$). Параметры пучка были следующие:

— полуширина пучка по уровню мощности e^{-1} на последнем зеркале задавалась одинаковой $D_w = 3,2$ см. Это согласуется с шириной пучков, используемой в современных экспериментах [21] и ожидаемой для ИТЭР [22] в рассматриваемом диапазоне частот ЭЦР-волн, а также с величиной, обычно используемой для расчётов зарубежных проектов ДЕМО [2];

— рассматривался параллельный пучок (без фокусировки), радиус кривизны волнового фронта $R_w = 1000$ см для ДЕМО-ТИН и $R_w = 5000$ см для ДЕМО-С.

В расчётах варьировались тороидальный и полоидальный углы ввода волны. Тороидальный угол ϕ_t определялся как угол между направлением распространения волны и большим радиусом установки в тороидальной плоскости сечения в точке расположения источника и менялся в диапазоне $\phi_t = 0$ — 20° . Полоидальный угол ввода ϕ_p определялся как угол в полоидальном сечении между направлением распространения волны и экваториальной плоскостью установки в точке расположения источника излучения и варьировался от 0 до 40° .

Для оценки величины эффективности генерации тока использовалась формула [1] (см. формулу в тексте: Глава 6, раздел 2.2.4, с. 2500):

$$\eta = \frac{I_{cd} \langle n_e \rangle R}{P_{ab}} \left[10^{20} \frac{\text{А}}{\text{Вт} \cdot \text{м}^2} \right], \quad (3)$$

где P_{ab} — величина поглощённой мощности, Вт; I_{cd} — величина генерируемого тока, А; $\langle n_e \rangle$ в 10^{20} м^{-3} .

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ ДЛЯ ДЕМО-ТИН

На рис. 4 показан результат расчёта профилей вложенной мощности и генерируемого тока для установки ДЕМО-ТИН в зависимости от частоты СВЧ-волны. Изменение частоты от 157 до 185 ГГц приводит к смещению области поглощения от центра камеры в сторону сильного магнитного поля. Для расчётов, показанных на рис. 4, тороидальный угол ввода мощности составлял $\phi_T = 20^\circ$ (тороидальный угол ввода мощности — угол наклона волнового вектора по отношению к большому радиусу в точке расположения зеркала).

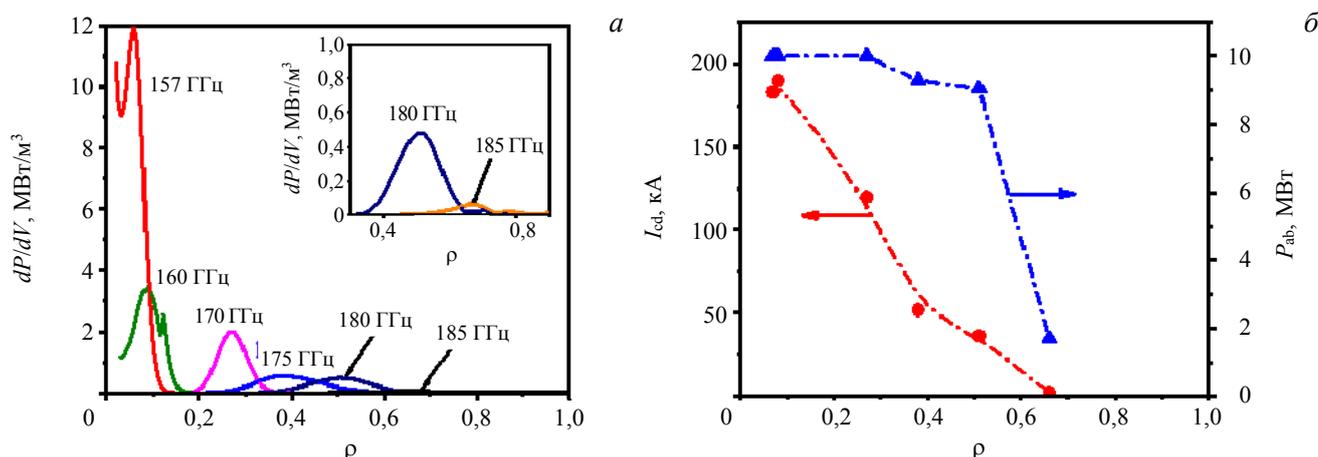


Рис. 4. Изменение профиля вложенной мощности (а) и величин генерируемого тока и поглощённой мощности (б) при смещении области поглощения за счёт изменения частоты СВЧ-волны в ДЕМО-ТИН. Смещение пика поглощения к большим значениям ρ соответствует смещению области резонанса на сторону сильного магнитного поля

На рис. 4 видно, что величина поглощённой мощности P_{ab} и величина генерируемого тока I_{cd} при нецентральной поглощении волны на внутреннем обводе тора снижаются по мере увеличения радиуса магнитной поверхности. Увеличение плотности и температуры плазмы приводит к увеличению доли однопроходного поглощения (рис. 5). Как было отмечено, в расчётах величина плотности и температуры плазмы менялась за счёт изменения центрального значения при сохранении формы профиля.

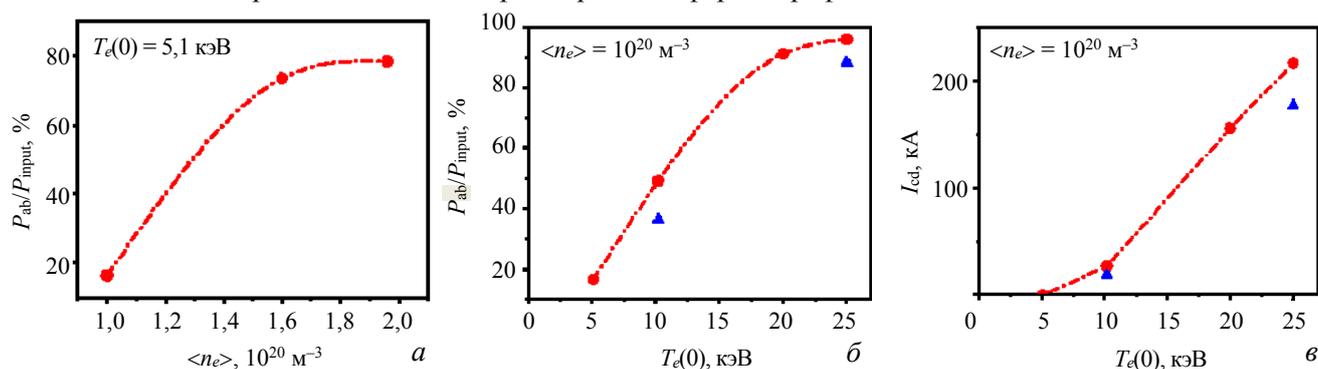


Рис. 5. Изменение доли поглощённой мощности при увеличении плотности (а) и температуры (б) плазмы; в — изменение величины генерируемого тока вблизи поверхности $q = 2$ в зависимости от величины температуры плазмы при $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ в установке ДЕМО-ТИН ($f = 185 \text{ ГГц}$), \bullet — $D_w = 3,2$, \blacktriangle — $D_w = 5,0 \text{ см}$

В рассмотренном диапазоне температуры полное однопроходное поглощение не достигается. Для проверки возможной роли нелинейных эффектов ширина профиля вложенной мощности была увеличена в 1,5 раза. Это не привело к увеличению доли поглощённой мощности, напротив, она уменьшилась (синие точки на рис. 5, б, в). Величина P_{ab}/P_{input} , по-видимому, может быть увеличена за счёт изменения геометрии ввода мощности с переходом к распространению волны по вертикали от источника, расположенного в верхней полуплоскости. Такой ввод мощности экспериментально был реализован в токамаке ДПП-D [23] и предлагается для реализации в ИТЭР [24]. Схема представляется интересной и для установок ДЕМО-С и ДЕМО-ТИН, однако её рассмотрение — тема для специального исследования.

На рис. 6 показаны первые результаты расчётов вклада мощности и величины генерируемого тока для случая, если поглощение мощности идёт в центральной области плазмы. Частота вводимой волны $f = 157$ ГГц. При величине магнитного поля 5 Тл центральный вклад мощности для данной частоты обеспечивается при тороидальном угле ввода мощности 20° . Во всех случаях при центральном вкладе мощности наблюдалось полное однопроходное поглощение. Плотность плазмы составляла $\langle n_e \rangle = 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

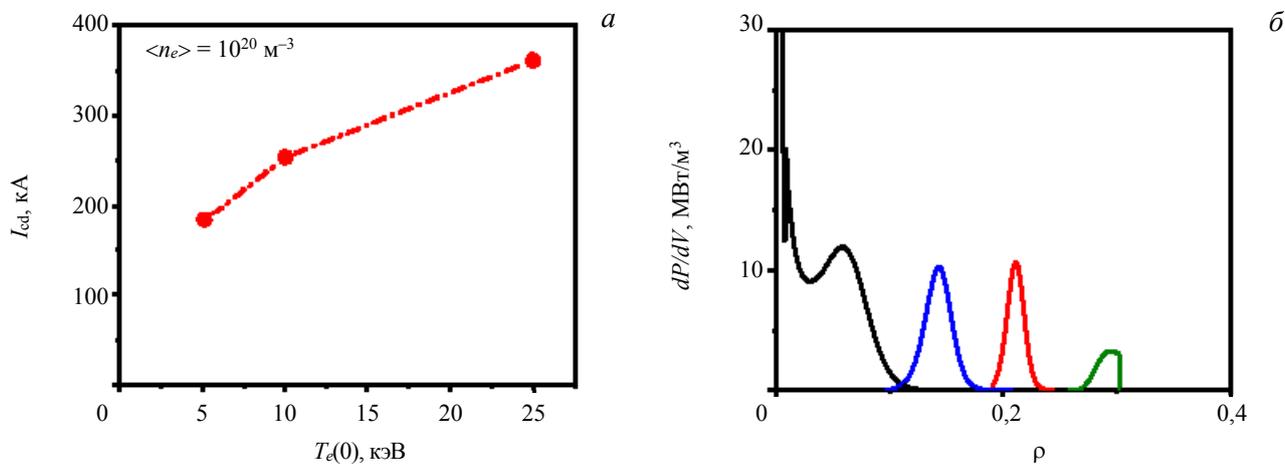


Рис. 6. Зависимость величины ЭЦ-тока от температуры плазмы, $\phi_T = 20^\circ$ (a); изменение профиля вложенной мощности при изменении тороидального угла ввода мощности (увеличение ρ соответствует смещению в сторону сильного поля): $\phi_T = 20^\circ$ (—), 15° (—), 10° (—), 0° (—) (б); $f = 157$ ГГц

На рис. 6, a показана зависимость величины генерируемого тока от центральной температуры плазмы. Величина генерируемого тока при введённой мощности 10 МВт составляет 185 кА. Это соответствует расчётной эффективности генерации тока $\eta = 0,06 \cdot 10^{20} \text{ А/Вт/м}^2$. При увеличении температуры плазмы до 25 кэВ величина тока возрастает до 360 кА ($\eta = 0,115 \cdot 10^{20} \text{ А/Вт/м}^2$). Расчётная эффективность генерации тока согласуется с величинами, приведёнными в [1] для ИТЭР для аналогичного диапазона частот ЭЦ-волны и температур плазмы. Нетрудно оценить, что при $T_e(0) \sim 25$ кэВ величина ЭЦ-тока становится сравнимой с током плазмы, текущим внутри поверхности $q = 1$ (см. рис. 3, a).

Как и следовало ожидать, при уменьшении тороидального угла профиль поглощённой мощности смещается (см. рис. 6, б). Он сдвигается на сторону сильного магнитного поля. При $\phi_T = 0^\circ$ мощность вкладывается в области $\rho = 0,3$, что для профиля, показанного на рис. 3, a, соответствует положению поверхности $q = 1$. Следует заметить, что при $\phi_T = 0^\circ$ пиковое значение поглощённой мощности оказывается существенно ниже, чем для больших углов ввода. Это соответствует снижению доли поглощённой мощности (только 49% от введённой мощности поглотилось) и не противоречит температурной зависимости, показанной на рис. 5, б.

Для центрального поглощения волны, вводимой строго вдоль большого радиуса, $\phi_T = 0^\circ$, частота волны должна быть уменьшена до ~ 140 ГГц (рис. 7).

Важно, что для установки ДЕМО-ТИН в области частот, требуемой для ЭЦРН/ЭЦГТ, с центральным вкладом мощности или близким к нему (в районе поверхности $q = 1$) уже существуют разработанные мощные (выходная мощность 1 МВт) гиротроны, работающие в длинном импульсе [25].

Для нецентрального нагрева и генерации тока вблизи поверхности $q = 3/2$ или $q = 2$ на стороне сильного магнитного поля нужны мощные источники излучения с более высокой частотой ($f \sim 180\text{—}190$ ГГц). Это выше, чем частота гиротронов, разработанных для ИТЭР. Вопрос о том, насколько технически трудным является такой шаг, — повод для дальнейших обсуждений.

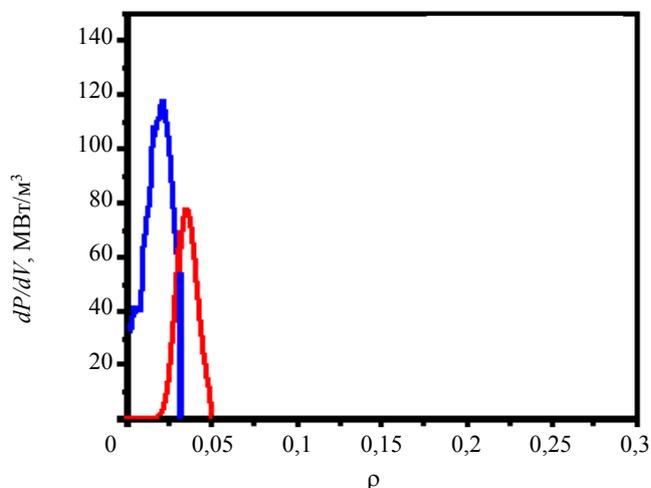


Рис. 7. Профиль вложенной мощности для частот $f = 140$ (—) и 141 ГГц (—) в установке ДЕМО-ТИН при вводе строго вдоль большого радиуса тора, $\phi_T = 0^\circ$. Расчёты для профилей температуры и плотности, показанных на рис. 1, a и 2, a

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЁТОВ ДЛЯ ДЕМО-С

Для установки ДЕМО-С с параметрами, приведёнными в табл. 1 и на рис. 1, б, 2, б, 3, б значение фактора запаса устойчивости на границе составляет $q_{95} \approx 3,5$. Положение поверхности $q = 2$ характеризуется нормализованным радиусом $\rho \sim 0,8$, положение поверхности $q = 3/2$ — радиусом $\rho \sim 0,7$. Это означает, что генерация ЭЦ-тока вблизи этих поверхностей при вкладе мощности в экваториальной плоскости на стороне сильного поля требует создания мощных гиротронов с частотами $f \sim 280\text{—}290$ ГГц (если рассматривать геометрию ввода мощности с $\phi_T = 20^\circ$), существенно превышающими доступный в настоящее время диапазон. Вклад мощности на стороне слабого поля мог бы снизить требуемую частоту ЭЦ-волны. Однако, как отмечалось, смещение области вклада мощности на сторону слабого поля приводит к уменьшению эффективности генерации тока за счёт усиления влияния запертых частиц. Тем не менее для того чтобы оценить потенциальную возможность снижения частоты нагрева в установке ДЕМО-С, были выполнены специальные расчёты (рис. 8, 9).

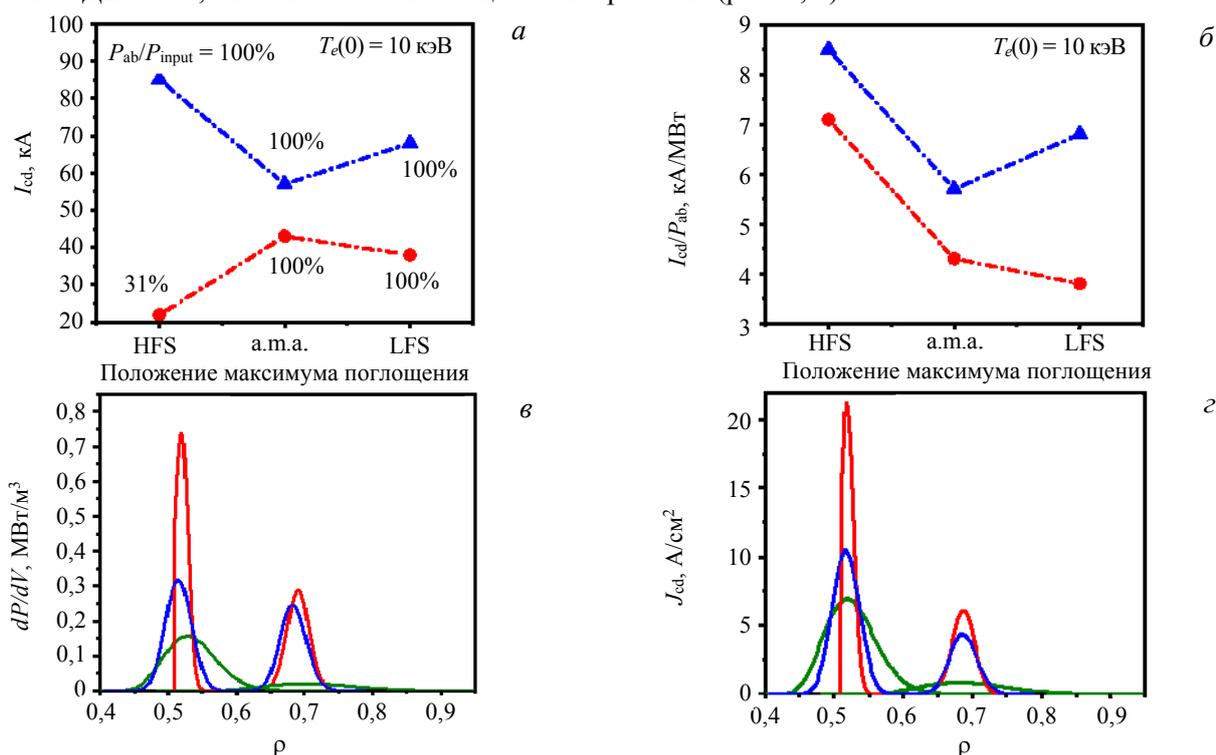


Рис. 8. Изменение эффекта генерации ЭЦ-тока при смещении области вклада мощности вдоль одной и той же магнитной поверхности ($\rho = 0,5$ (●) или $0,7$ (▲)) в ДЕМО-С: а — величина генерируемого тока, цифрами в поле рисунка показана доля однопроходного поглощения мощности; б — величина генерируемого тока на единицу поглощённой мощности, I_{cat}/P_{ab} ; в — профили вложенной мощности при поглощении на стороне сильного поля (—), над магнитной осью (—) и на стороне слабого поля (—); г — профили генерируемого тока, соответствующие профилям поглощённой мощности, приведённым на рисунке в. На рисунках а и б значение координаты на оси абсцисс HFS соответствует поглощению в экваториальной плоскости на стороне сильного поля, a.m.a. — над магнитной осью, LFS — в экваториальной плоскости на стороне слабого поля

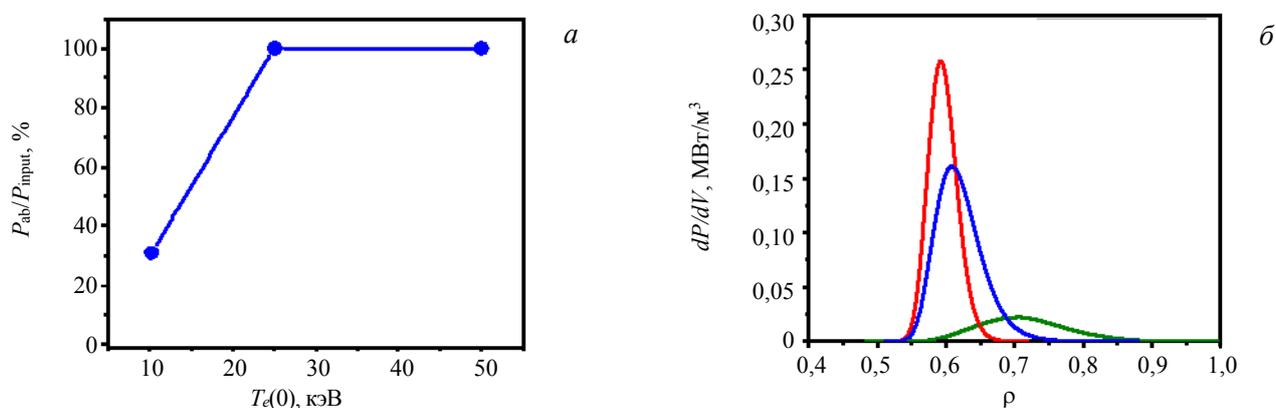


Рис. 9. Изменение поглощения мощности с ростом температуры плазмы для $f = 280$ ГГц при вкладе мощности в экваториальной плоскости на стороне сильного магнитного поля в ДЕМО-С: а — доля поглощённой мощности; б — профиль поглощённой мощности для разных значений центральной температуры: $T_e(0) = 10$ (—), 25 (—), 50 кэВ (—)

На рис. 8, а показано изменение величины генерируемого тока при нецентральной вкладке мощности на двух магнитных поверхностях $\rho = 0,5$ и $\rho = 0,7$ при центральной температуре плазмы 10 кэВ. Для вкладки мощности на стороне сильного поля частота вводимой волны составляла $f = 270$ ГГц для $\rho = 0,5$ и $f = 280$ ГГц для $\rho = 0,7$. Вклад мощности над магнитной осью требовал частоты 230 ГГц. Изменение положения вкладки мощности по ρ в этом случае обеспечивалось изменением угла ввода волны относительно экваториальной плоскости (30—40°, учитывая расположение источника волны в экваториальной плоскости установки). Для вкладки мощности на стороне слабого поля частота вводимой волны составляла $f = 212$ ГГц ($\rho = 0,5$) и $f = 203$ ГГц ($\rho = 0,7$). Во всех случаях тороидальный угол ввода мощности составлял 20° в точке расположения источника.

Для поверхности $\rho = 0,5$ изменение величины генерируемого тока при смещении со стороны сильного поля на сторону слабого поля соответствует теоретическим представлениям и экспериментальным результатам, изложенным в [20]. Однако на поверхности $\rho = 0,7$ величина генерируемого тока на стороне сильного поля оказывается намного ниже, чем на стороне слабого поля. Это связано с тем, что при $T_e(0) = 10$ кэВ из-за низкой температуры в области резонанса снижается доля однопроходного поглощения, профиль поглощённой мощности расширяется в сторону больших ρ . Тем не менее эффективность генерации тока на стороне сильного поля заметно выше, чем на стороне слабого поля и над магнитной осью (см. рис. 8, б), что согласуется с [20]. Увеличение температуры плазмы приводит к увеличению доли поглощённой мощности на стороне сильного поля и к сужению профиля, т.е. уменьшению ширины области поглощения (рис. 9).

Изменение величины генерируемого тока при смещении области вкладки мощности вдоль магнитной поверхности со стороны сильного поля на сторону слабого поля в расчётах с $T_e(0) = 50$ кэВ показано на рис. 10. Для вкладки мощности на стороне сильного поля на $\rho \sim 0,5$ использовалась волна с частотой $f = 275$ ГГц, на $\rho = 0,7$ использовалась волна с частотой $f = 287$ ГГц.

Видно, что в режимах с высокой температурой плазмы $T_e(0) \sim 50$ кэВ в установке ДЕМО-С величина ЭЦ-тока оказывается выше, если вклад мощности осуществляется на стороне сильного поля. Это не противоречит представлениям теории и результатам экспериментов на современных установках. Однако уменьшение температуры приводит к снижению доли однопроходного поглощения, а также расширению профиля вложенной мощности и генерируемого тока (как следствие снижения поглощения). Величина ЭЦ-тока и эффективность генерации неосевого тока на стороне слабого поля оказываются сопоставимыми с величинами, полученными при расположении зоны поглощения над магнитной осью на той же магнитной поверхности. Однако пиковое значение поглощённой мощности и плотности ЭЦ-тока при вкладке мощности над магнитной осью оказывается заметно выше, чем при поглощении на стороне слабого поля (см. рис. 8, в, з). Это может быть важно для алгоритмов контроля МГД-устойчивости.

Гиротроны 230 ГГц при вводе волны строго в экваториальной плоскости (угол между волновым вектором и экваториальной плоскостью $\phi_p = 0^\circ$) могут обеспечить нагрев, близкий к центральному

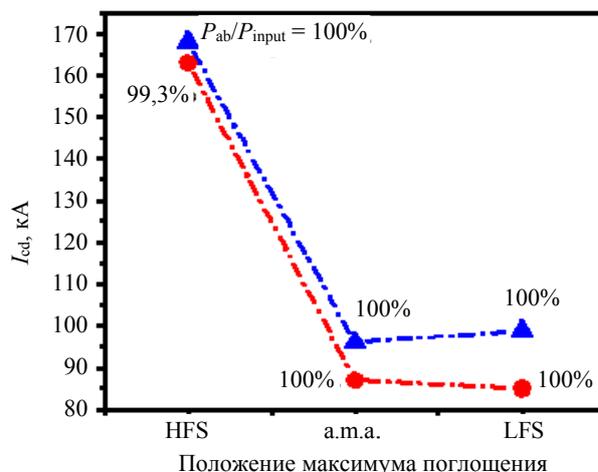


Рис. 10. Изменение величины генерируемого ЭЦ-тока при смещении области вкладки мощности вдоль одной и той же магнитной поверхности ($\rho = 0,5$ (▲) или $0,7$ (●)) со стороны сильного поля на сторону слабого поля в ДЕМО-С, $T_e(0) = 50$ кэВ. Доля поглощённой мощности показана в поле рисунка около каждой расчётной точки

(рис. 11, а). При тороидальном угле ввода мощности $\phi_T = 20^\circ$ величина генерируемого тока составляет ~ 180 кА (вводимая мощность 10 МВт, центральная температура плазмы 50 кэВ). Эффективность генерации тока составляет $\eta = 0,14 \cdot 10^{20}$ А/Вт/м².

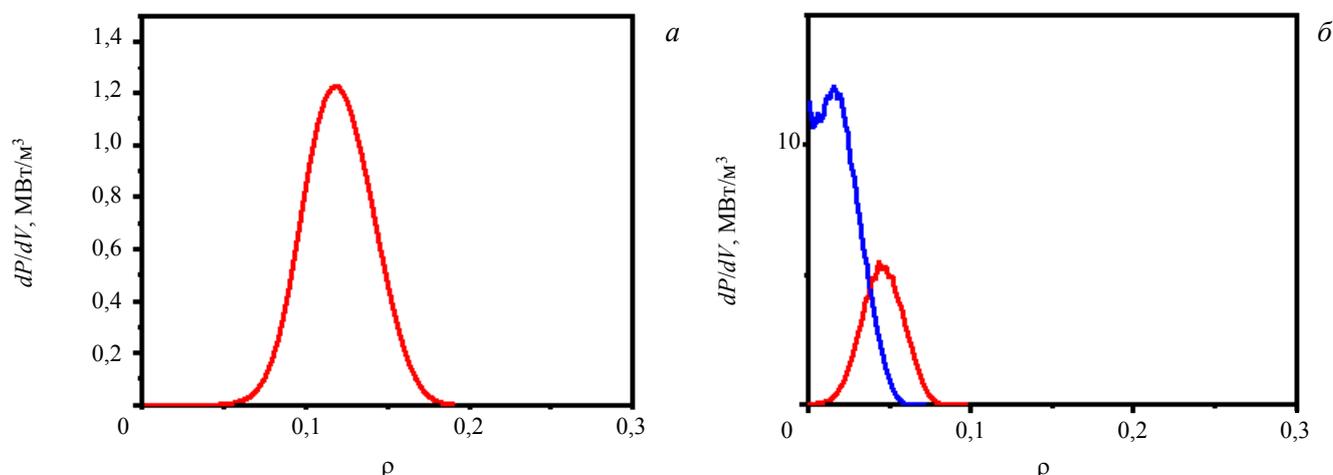


Рис. 11. Профиль вложенной мощности в ДЕМО-С: $f = 230$ ГГц, $T_e(0) = 50$ кэВ, $\phi_T = 20^\circ$ (а); $f = 215$ (—) и 216 ГГц (—), $T_e(0) = 10$ кэВ, $\phi_T = 0^\circ$ (б)

Сказанное означает, что в случае необходимости использования неосевой генерации ЭЦ-тока в установке ДЕМО-С схема с поглощением мощности над магнитной осью может быть более подходящей, поскольку:

- позволяет снизить используемую частоту ЭЦРН/ЭЦГТ;
- даёт возможность использовать единую частоту для центрального и далёкого нецентрального нагрева плазмы и создания неиндукционного тока;
- высокая доля однопроходного поглощения $\sim 100\%$ обеспечивается как на основной стадии работы, так и на стадии выхода на режим горения.

Если не задаваться целью создания ЭЦ-тока в центральной части шнура, то частоту ЭЦ-нагрева можно снизить до ~ 215 ГГц, сохранив при этом центральный вклад мощности, как показано на рис. 11, б. В соответствии с расчётом наблюдается полное однопроходное поглощение.

ВЫВОДЫ

Проведены первые расчёты поглощения электронно-циклотронной волны и генерации ЭЦ-тока в установках ДЕМО-ТИН и ДЕМО-С для проектных параметров установок.

Определены диапазоны частот, требуемые для центрального и нецентрального нагрева плазмы.

Для нагрева плазмы и генерации неиндукционного тока в центральной части плазменного шнура ($\rho \sim 0$) в токамаке ДЕМО-ТИН рабочий диапазон частот составляет ~ 140 — 160 ГГц:

- частота ~ 140 ГГц удовлетворяет условиям нагрева плазмы без генерации тока (ввод мощности строго вдоль направления R);

- для решения задач, связанных с созданием неиндукционного тока вблизи центра плазменного шнура, необходимо увеличить частоту вводимой волны. В случае ввода мощности с тороидальным углом 20° потребуются гиротроны с частотой ~ 157 ГГц.

Для указанного диапазона частот в настоящее время уже существуют мегаваттные гиротроны непрерывного действия [26].

Расчётная эффективность генерации тока вблизи оси плазменного шнура в установке ДЕМО-ТИН оказалась близкой к значениям, представленным в [1] для ИТЭР в аналогичном диапазоне частот ЭЦ-волны и температур плазмы (см. рис. 2 в Главе 6 в [1]). Величина генерируемого тока при температуре ~ 25 кэВ сопоставима с величиной тока плазмы, сосредоточенного внутри поверхности $q = 1$ для условий расчётов.

Для решения задач, связанных с центральным ЭЦР-нагревом и генерацией тока плазмы в установке ДЕМО-С, требуется разработка гиротронов с частотой ~ 215 ГГц (чистый нагрев) и 230 ГГц (нагрев и генерация тока). Разработки таких источников ведутся [25].

Реализация алгоритмов контроля МГД-устойчивости моды $m/n = 2/1$ в обеих установках в режимах с заданными параметрами требует нецентрального вклада мощности со смещением по ρ до $\sim 0,65$ в ДЕМО-ТИН и ρ до $\sim 0,8$ в ДЕМО-С. Расчёты показывают, что доля однопроходного поглощения и величина генерируемого тока существенно снижаются при смещении ЭЦ-резонанса от центра к поверхности $q = 2$ на стороне сильного поля в режимах с низкой температурой плазмы $T_e(0) \sim 5$ кэВ в ДЕМО-ТИН и $T_e(0) \sim 10$ кэВ в ДЕМО-С. Доля однопроходного поглощения растёт с ростом температуры плазмы и достигает 100% при $T_e(0) \sim 25$ кэВ в обеих установках. Отмеченное означает, что на стадии разряда с низкой температурой плазмы нецелесообразно применение ЭЦГТ для контроля МГД-устойчивости моды $m/n = 2/1$ в геометрии с поглощением в области $q = 2$ на стороне сильного магнитного поля вблизи экваториальной плоскости установки. Следует разрабатывать альтернативную схему ввода, например, с поглощением мощности на той же магнитной поверхности над/под магнитной осью шнура. Кроме того, в установке ДЕМО-С для обеспечения вклада ЭЦ-мощности вблизи $q = 2$ на стороне сильного поля потребуется создание источника на экстремально высоких частотах (>250 ГГц). Таким образом, применение ЭЦГТ для обеспечения и контроля МГД-устойчивости плазмы в области $q = 2$ — задача, требующая дополнительного специального рассмотрения и детальной проработки сценария разряда с расчётами МГД-устойчивости основных рабочих конфигураций плазмы.

Для следующего этапа расчётов необходима проработка концептуальных решений для системы ввода мощности: определение положения поворотных зеркал, доступного диапазона тороидальных и полоидальных углов ввода мощности ЭЦ-излучения, оптимизации поперечных размеров пучка.

Автор благодарит М.П. Грязневича и Б.В. Кутеева за полезные замечания, высказанные при обсуждении работы. Автор также благодарит А.Ю. Куянова за постоянную активную поддержку кода OGRAY и обеспечение технической возможности расчётов.

Работа выполнена при финансовой поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ITER Phys. Bas.** — Nucl. Fusion, 1999, vol. 39, p. 2137.
2. **Granucci G. et al.** — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, 116009.
3. **Erckmann V., Gasparino U.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, vol. 36, p. 1869.
4. **Progress in the ITER Phys. Bas.** — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, S1.
5. **Mikkelsen D.R. et al.** — Nucl. Fusion, 2018, vol. 58, 036014.
6. **Zhuang G. et al.** — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, 112010.
7. **Sakamoto K. et al.** — Fusion Eng. Design, 2006, vol. 81, p. 1263.
8. **Chen J. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2017, vol. 59, 075005.
9. **Wan Y.X. et al.** — In: Proc. of 26th FEC Conference. Kyoto, Japan, 17—22 October, 2016, OV3-4.
10. **Fujita T.** — Nucl. Fusion, 2010, vol. 50, 113001.
11. **Колбасов Б.Н. и др.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2007, вып. 4, с. 3.
12. **Борисов А.А. и др.** Основы концепции демонстрационного термоядерного реактора ДЕМО-С. — М.: РИЦ «Курчатовский институт», 2001.
13. **Kuteev B.V. et al.** — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, 076039.
14. **Zvonkov A.V. et al.** — Plasma Phys. Rep., 1998, vol. 24, p. 389.
15. **Переверзев Г.В. и др.** ASTRA — программный комплекс для анализа и моделирования транспортных процессов в токамаке: Препринт ИАЭ-5358/6. — М., 1991.
16. **Wiesen H. et al.** — Nucl. Fusion, 2005, vol. 45, L1.
17. **Litaudon X.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2006, vol. 48, A1.
18. **Zohm H. et al.** — Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, 073019.
19. **Hinton F.L., Hazeltine R.D.** — Rev. Mod. Phys., 1976, vol. 48, p. 239.
20. **Prater R. et al.** — In: Proc. of the 18th IAEA Fus. Energy Conf. Sorrento, Italy, 2000. — Vienna International Atomic Energy Agency, 2000, Paper EX8/1; доступно по ссылке https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp_008c/pdf/ex8_1.pdf.
21. **Кирнева Н.А. и др.** — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 3, с. 24.
22. **Ramponi G. et al.** — Nucl. Fusion, 2008, vol. 48, 054012.
23. **Chen X. et al.** — Nucl. Fusion, 2022, vol. 62, 054001.

24. **Omori T. et al.** — Fusion Eng. Design, 2011, vol. 86, p. 951.
25. **Denisov G.G. et al.** — Nucl. Fusion, 2022, vol. 62, 036020.
26. **Thumm M.K.A. et al.** — Nucl. Fusion, 2019, vol. 59, 073001.



Наталья Александровна Кирнева, начальник лаборатории, к.ф.-м.н., лауреат премий им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, Россия; доцент кафедры «Физика плазмы»; НИЯУ МИФИ, 115409 Москва, Каширское шоссе 31, Россия
Kineva_NA@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 26 сентября 2022 г.
После доработки 3 октября 2022 г.
Принята к публикации 5 октября 2022 г.
Вопросы атомной науки и техники.
Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4, с. 93—104.