

УДК 621.039.647

О ВЫБОРЕ ЧАСТОТЫ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОГО НАГРЕВА ДЛЯ УСТАНОВКИ Т-15МД

Н.А. Кирнева^{1,2}, Д.А. Кислов¹, И.Н. Рой¹¹НИИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия²Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия

Электронно-циклотронный нагрев рассматривается как один из методов дополнительного нагрева плазмы и создания неиндукционного тока в токамаке Т-15МД. Будут использоваться от одного до восьми гиротронов суммарной мощностью до 7 МВт на входе в токамак. Частота используемой СВЧ-волны зависит от параметров режимов, в которых будет использоваться комплекс нагрева, и от физических задач, для решения которых он предназначен. В данной статье приведено обоснование выбора частоты гиротронного комплекса $f_1 \cong 82,6$ ГГц для стадии физического пуска и начала работы установки, рассмотрена возможность использования этой частоты на стадии полномасштабных экспериментов. Для того чтобы обеспечить гибкость системы ЭЦР-нагрева установки Т-15МД, предлагается рассмотреть возможность создания гиротронного комплекса на основе двухчастотных гиротронов с $f_1 \sim 82,6$ ГГц и f_2 в диапазоне ~ 102 — 110 ГГц.

Ключевые слова: электронно-циклотронный нагрев, генерация тока, токамак Т-15МД, гиротронный комплекс.

ON THE SELECTION OF ELECTRON-CYCLOTRON HEATING FREQUENCY FOR T-15MD TOKAMAK

N.A. Kirneva^{1,2}, D.A. Kislov¹, I.N. Roy¹¹NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia³National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

Electron cyclotron heating is one of the methods of additional plasma heating and noninductive current drive in T-15MD tokamak. One to eight gyrotrons with a total power up to 7 MW will be used. The frequency of the microwave used depends on the parameters of the experimental scenarios in which the heating will be used and on the physical tasks for which it is intended. This article provides justification for the choice of the gyrotrons' frequency $f_1 \cong 82.6$ GHz for the start-up phase and for the first plasma experiments, and considers the possibility of using this frequency at the stage of full-scale experiments. In order to provide flexibility of the T-15MD ECRH system, it is proposed to consider the possibility of the development of a gyrotron complex based on two-frequency gyrotrons with $f_1 \sim 82.6$ GHz and f_2 in the range of ~ 102 — 110 GHz.

Key words: electron cyclotron heating, current drive, T-15MD tokamak, gyrotron complex.

DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-1-64-74

ВВЕДЕНИЕ

Установка Т-15МД — токамак D-образного сечения, который в настоящее время готовится к физическому пуску в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт». Параметры токамака и систем дополнительного нагрева [1]:

Ток плазмы I_p , МА . . .	2
Аспектное отношение . . .	2,2
Большой радиус R_0 , м . . .	1,48
Малый радиус a , м . . .	0,67
Вытянутость, k_{95} . . .	1,7—1,9
Треугольность, δ_{95} . . .	0,3—0,4
Тороидальное магнитное поле B_T , Тл . . .	2,0
Мощность дополнительного нагрева плазмы, МэВ:	
электронно-циклотронный нагрев . . .	~7
нейтральная инжекция . . .	8—10
нижнегибридный нагрев . . .	4
ионно-циклотронный нагрев . . .	6
Магнитная конфигурация . . .	Лимитерная, диверторная (однонулевая)
Рабочий газ . . .	Водород

Основные направления работ на Т-15МД связаны с созданием и поддержанием устойчивых квазистационарных разрядов для решения задач, актуальных для подготовки к пуску международного экспе-

риментального термоядерного реактора ИТЭР [2] и создания физической базы для выбора параметров и разработки сценариев установок следующего поколения — ДЕМО и ДЕМО-ТИН [3].

Электронно-циклотронный нагрев и генерация тока (ЭЦРН и ГТ) рассматриваются как один из методов дополнительного (к омическому) нагрева плазмы в Т-15МД и поддержания неиндукционного тока. Этот метод применяется практически на всех современных токамаках и планируется для применения в установках следующего поколения, поскольку позволяет обеспечить высокую локальность вклада мощности и возможность изменять область вклада даже без существенного изменения параметров плазменного разряда. Важное преимущество ЭЦРН и ГТ заключается в отсутствии материальных элементов, вносимых в плазму (как, например, антенны для ионно-циклотронного нагрева), возможности удаления источника нагрева за биозащиту, а также в отсутствии источника частиц, вносимого в плазму (как это происходит при использовании инжекционного нагрева).

Механизм ЭЦРН и ГТ связан с резонансным взаимодействием волны с электронами плазмы, скорость которых удовлетворяет условию [4]

$$\omega - \frac{s\omega_{ce}}{\gamma} = k_{\parallel}v_{\parallel}, \quad (1)$$

где ω — частота волны; s — номер гармоники; $\gamma = 1/\sqrt{1-v^2/c^2}$ — релятивистский форм-фактор; v и v_{\parallel} — скорость электронов, на которых происходит поглощение волны (резонансные электроны), и её компонент, параллельный магнитному полю; c — скорость света; ω_{ce} — электронная циклотронная частота; k_{\parallel} — параллельный направлению магнитного поля компонент волнового вектора СВЧ-волны.

Условие распространения электронно-циклотронной волны в плазме имеет вид

$$\begin{aligned} \omega_{pe}^2 &< s^2\omega_{ce}^2 \text{ — для обыкновенной волны;} \\ \omega_{pe}^2 &< s(s-1)\omega_{ce}^2 \text{ — для необыкновенной волны } (s \geq 2). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь ω_{pe} — электронная плазменная частота.

Это означает, что применение ЭЦРН и ГТ ограничено по плотности — $n_e < n_{cut-off}$, где $n_{cut-off}$ — плотность отсечки. Для обыкновенной волны на первой гармонике ЭЦР и необыкновенной волны на второй гармонике ЭЦР из условия (2) получаем значения плотности отсечки:

$$\begin{aligned} \text{1-я гармоника, О-мода} &\text{ — } n_{cut-off} = 1,24 \cdot 10^{-4} f^2; \\ \text{2-я гармоника, Х-мода} &\text{ — } n_{cut-off} = 6,2 \cdot 10^{-5} f^2, \end{aligned} \quad (3)$$

здесь $n_{cut-off}$, 10^{20} м^{-3} ; f — частота вводимой СВЧ-волны, ГГц.

Если СВЧ-волна вводится в плазму вдоль направления большого радиуса тора, то расхождение пучка, связанное с рефракцией, наблюдается при плотности, близкой к плотности отсечки (2,3). Если же ввод СВЧ-волны осуществляется под углом к большому радиусу, то рефракция наблюдается при более низких значениях плотности [5].

Традиционно ЭЦРН и ГТ используются в режимах с $n_e < n_{cut-off}$. Следует, однако, отметить, что экспериментально показана эффективность альтернативной схемы электронно-циклотронного нагрева, основанной на трансформации ЭЦ-волны в бернштейновскую в слое циклотронной отсечки [6, 7].

В данной статье обсуждаются возможности использования нагрева плазмы на частоте $f = 82,6$ ГГц, выбранной для гиротронного комплекса установки Т-15МД на стадии физического пуска и начала работы установки [8]. Рассматривается возможность использования ЭЦРН и ГТ на частоте $f = 82,6$ ГГц в последующих физических экспериментах. Обсуждается второй диапазон частот, необходимый в режимах с магнитным полем, близким к проектному значению ($B_T \sim 2$ Тл). Высказано предложение о создании комплекса ЭЦРН плазмы Т-15МД на основе двухчастотных гиротронов. В статье рассмотрены физические задачи, которые требуют использования ЭЦРН и ГТ в установке Т-15МД, представлена ожидаемая область рабочих параметров установки, обсуждаются ограничения частоты ЭЦРН в установке Т-15МД,

представлено физическое обоснование выбора частоты гиротронного комплекса на разных этапах работы токамака Т-15МД.

ФИЗИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ ДЛЯ ЭЦР-НАГРЕВА и ГЕНЕРАЦИИ ТОКА в УСТАНОВКЕ Т-15МД

В современных установках нагрев и ГТ с помощью электронно-циклотронных волн используются для решения следующих задач [2, 9]:

- оптимизация условий пробоя газа и стадии роста тока плазмы при вводе СВЧ-мощности на начальной стадии разряда;
- нагрев плазмы и получение разрядов с высоким газокинетическим давлением, включая разряды с высоким β_p (β_p — отношение газокинетического давления плазмы к давлению полоидального магнитного поля);
- ГТ для получения разрядов с высокой долей неиндукционного тока плазмы (вплоть до 100%);
- управление профилем полного тока плазмы с созданием областей слабого или отрицательного магнитного шира;
- управление МГД-активностью плазмы:
- управление частотой и амплитудой пилообразных колебаний;
- управление тиринг-неустойчивостями, включая неоклассическую тиринг-моду;
- управление частотой граничных локализованных мод [10];
- предотвращение срывов;
- изучение процессов переноса энергии и частиц, включая:
- управление профилем плотности основной плазмы и примесей;
- изучение механизма аномальных потерь энергии;
- изучение физики взаимодействия СВЧ-волн с плазмой для увеличения эффективности нагрева и ГТ;
- увеличение эффективности других методов нагрева плазмы (синергетический эффект).

Планируется, что перечисленные задачи будут рассматриваться на установке Т-15МД. Для этого желательно обеспечить возможность изменения области поглощения СВЧ-мощности в широком диапазоне по сечению плазменного шнура — от центра (нормализованный радиус магнитной поверхности $\rho \sim 0$) до периферийной области плазмы ($\rho \sim 0,95$).

Проектируемая система ввода СВЧ-мощности в Т-15МД [8] предусматривает использование зеркал, отклоняющих луч в полоидальном и тороидальном направлении. Система поворота зеркал в тороидальном направлении позволит использовать электронно-циклотронные волны не только в режиме нагрева, но и для создания неиндукционного тока в плазме.

ОБЛАСТЬ РАБОЧИХ ПАРАМЕТРОВ Т-15МД

Выбор частоты СВЧ-волны зависит от рабочего диапазона магнитных полей установки и плотности отсечки СВЧ-волны и определяется физическими задачами, в которых будут использованы ЭЦРН и ГТ.

Предполагается, что ввод установки Т-15МД в эксплуатацию будет осуществлён в несколько этапов:

- физический пуск, который должен продемонстрировать работоспособность всех систем установки;
- стадия работы с плазмой круглого сечения с малым радиусом $a = 0,67$ м (I);
- вытянутая плазма лимитерной конфигурации (II);
- работа в диверторной конфигурации (III).

Рассмотрим возможные границы рабочей области Т-15МД для двух предельных магнитных конфигураций — для круглого сечения шнура и для D-образного сечения с проектными значениями k и δ .

На рис. 1 показаны оценки величины тока плазмы, соответствующего разным значениям фактора запаса устойчивости на границе, при нескольких заданных значениях тороидального магнитного поля в центре вакуумной камеры для круглого (см. рис. 1, а) и вытянутого (см. рис. 1, б) сечения плазменного шнура. Фактор запаса устойчивости определялся по формуле [12]

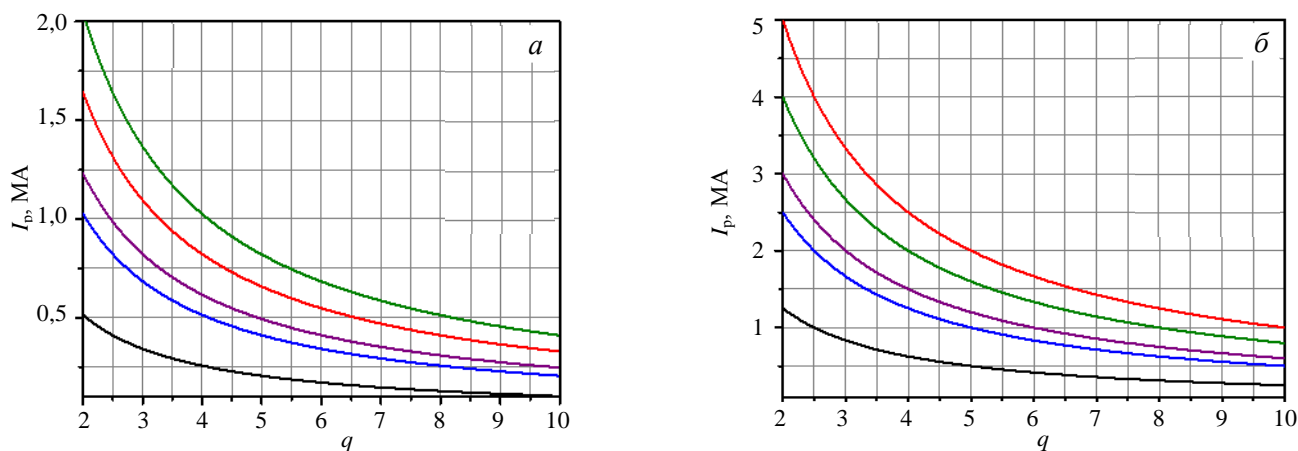


Рис. 1. Зависимость величины тока плазмы от фактора запаса устойчивости на границе плазмы при различных значениях тороидального магнитного поля: а — в круглой плазме; б — в плазме с $k = 1,8$, $\delta = 0,35$; $B_T = 2,0$ (—), $1,6$ (—), $1,2$ (—), $1,0$ (—), $0,5$ Тл (—)

$$q = q_{\text{cyl}} F(k, \delta, A); \tag{4}$$

где $q_{\text{cyl}} = \frac{5a^2 B_T}{I_p R}$; $F(k, \delta, A) = f_1(k, \delta) f_2(A)$ — тороидальная поправка:

$$f_1(k, \delta) = \frac{1 + k^2(1 + 2\delta^2 - 1,2\delta^3)}{2};$$

$$f_2(A) = \frac{1,17 - 0,65/A}{(1 - A^{-2})^2};$$

$$A = \frac{R}{a}.$$

При работе с круглым сечением плазменного шнура (см. рис. 1, а) может быть создана магнитная конфигурация с фактором запаса устойчивости на границе, изменяемым от $q \sim 2$ и выше во всём рабочем диапазоне магнитных полей и токов плазмы, предусмотренных техническим проектом установки Т-15МД [1]. В конфигурации с D-образным сечением (рассматривалась плазма с $k = 1,8$, $\delta = 0,35$, $a = 0,67$ м, $R = 1,5$ м) рабочий диапазон токов плазмы существенно расширяется (см. рис. 1, б) по сравнению с круглой конфигурацией. При величинах тороидального магнитного поля, превышающих 1 Тл, фактор запаса устойчивости $q = 2$ на границе плазменного шнура достигается при $I_p \geq 2,5$ МА.

На рис. 2 показана условная область рабочих параметров (диаграмма Хьюгилла) установки Т-15МД

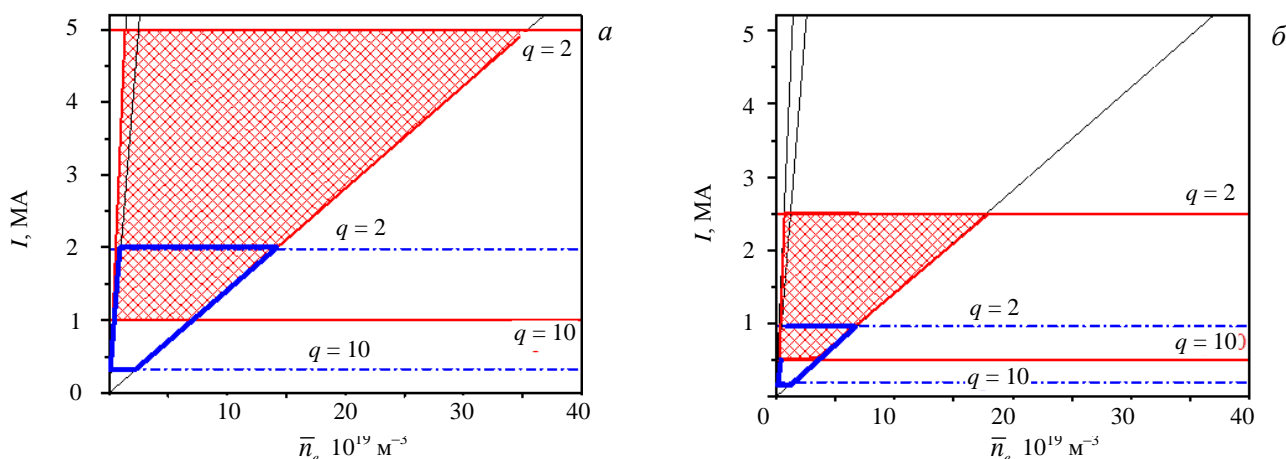


Рис. 2. Расчётная рабочая область установки Т-15МД для двух значений тороидального магнитного поля $B_T = 2$ Тл (а) и $B_T = 1$ Тл (б); — рабочая область для плазмы с $k = 1,8$, $\delta = 0,35$, синий цвет — для круглой плазмы. Во всех случаях $a = 0,67$ м, $R = 1,5$ м

для двух значений B_T : $B_T = 2$ Тл (см. рис. 2, а) и $B_T = 1$ Тл (см. рис. 2, б). Рассмотрена как плазма круглого сечения ($a = 0,67$ м, $R = 1,5$ м), так и плазма с вытянутым сечением с $k = 1,8$, $\delta = 0,35$, $a = 0,67$ м, $R = 1,5$ м. Границы рабочей области определялись следующим образом:

- ток плазмы ограничен сверху достижением $q = 2$ на границе плазмы;
- ток плазмы снизу на этих диаграммах условно ограничивался достижением $q = 10$;
- область низких плотностей ограничена пределом по убегающим электронам [12], $n_{Ra} = 0,07 \frac{I}{\pi k a^2}$;
- область высоких плотностей ограничена плотностью Гринвальда [13], $n_{Gr} = \frac{I}{\pi a^2}$.

Отметим, что плотность Гринвальда не является абсолютным пределом и может быть превышена при определённых условиях [2, 14], тем не менее она характеризует масштаб максимально достижимых значений плотности в установке.

На рис. 2 видно, что при магнитном поле 2 Тл и токе плазмы 2 МА рабочий диапазон плотности плазмы составляет $0,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} \leq \bar{n}_e \leq 1,4 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ при D-образном сечении плазменного шнура. В плазме круглого сечения при магнитном поле 2 Тл и токе плазмы 1,65 МА рабочий диапазон плотности плазмы составляет $1 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} \leq \bar{n}_e \leq 1,15 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$. При $B_T = 1$ Тл и $I_p = 2$ МА ожидаемые границы рабочей области по плотности составляют $0,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3} \leq \bar{n}_e \leq 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ в плазме D-образного сечения.

ОЦЕНКА ОГРАНИЧЕНИЙ, НАКЛАДЫВАЕМЫХ НА ЧАСТОТУ ГИРОТРОННОГО КОМПЛЕКСА

На рис. 3 показано изменение величины тороидального магнитного поля вдоль большого радиуса тороидального магнитного поля в центре вакуумной камеры установки. Левая граница рисунка соответствует положению стенки камеры на внутреннем обводе тора, правая граница — положению стенки камеры на внешнем обводе тора в экваториальной плоскости установки.

На рис. 4 показаны значения частоты электронно-циклотронного резонанса на первой и второй гармониках в зависимости от величины тороидального магнитного поля.

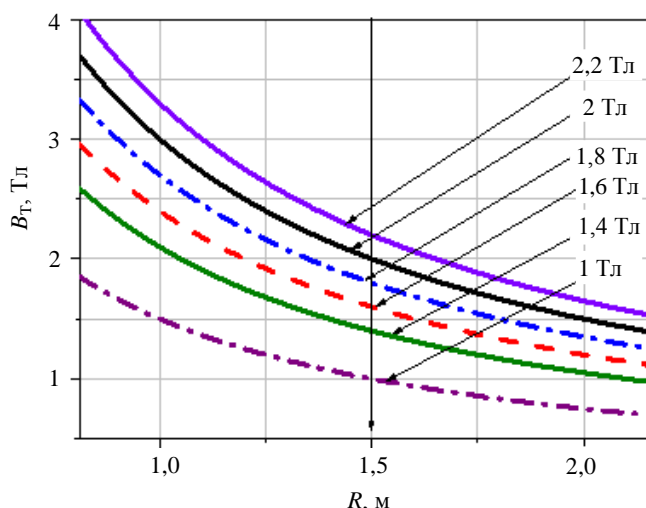


Рис. 3. Изменение значения тороидального магнитного поля вдоль большого радиуса установки Т-15МД для различных значений B_T в центре вакуумной камеры. Вертикальной стрелкой показано положение центра вакуумной камеры

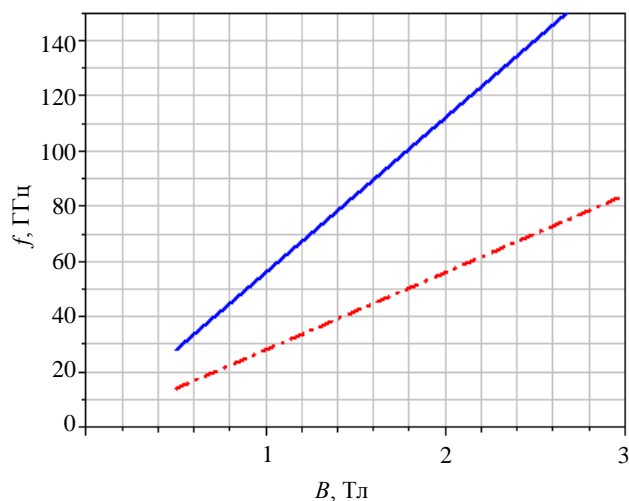


Рис. 4. Значение частоты электронно-циклотронного резонанса для различных значений магнитного поля: — первая гармоника ЭЦР; — вторая гармоника ЭЦР

Магнитному полю $B_T = 2$ Тл соответствует частота 56 ГГц первой гармоники ЭЦР и $f = 112$ ГГц второй гармоники ЭЦР. Особенности ЭЦРН и ГТ в Т-15МД на этих частотах подробно рассмотрены в [15]. Для $f = 112$ ГГц (необыкновенная волна, вторая гармоника ЭЦР) плотность отсечки при вводе волны вдоль большого радиуса составляет $7,8 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$, для СВЧ-волны с частотой 56 ГГц (обыкновенная волна на первой гармонике ЭЦР) $n_{\text{cut-off}} \cong 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ — это локальные значения плотности

(рис. 5). Если необходимо обеспечить поглощение СВЧ-волны в центре плазменного шнура, то плотность плазмы по всему сечению должна быть меньше плотности отсечки. Это означает, что среднее хордовое значение плотности заведомо не должно превышать $n_{\text{cut-off}}$. Из сопоставления с рис. 2 видно, что эти значения плотности лежат внутри расчётной рабочей области установки.

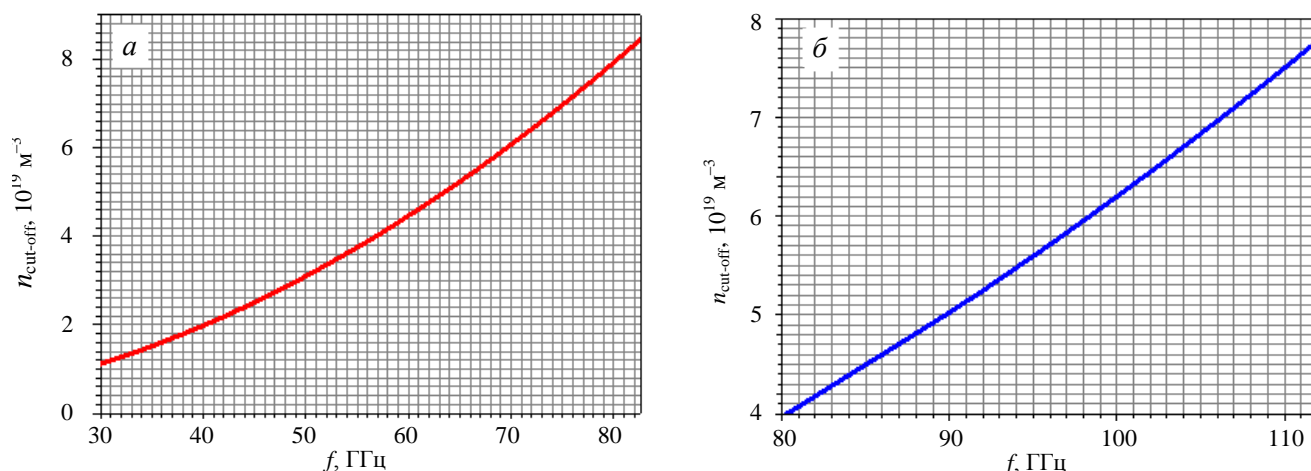


Рис. 5. Зависимость плотности отсечки от частоты для обыкновенной СВЧ-волны на первой (а) и необыкновенной волны на второй (б) гармонике ЭЦ-частоты

Таким образом, для задач, связанных с ЭЦРН плазмы в установке Т-15МД, вблизи центра при $B_T \sim 2$ Тл использование электронно-циклотронной волны на первой гармонике ЭЦР при традиционной схеме нагрева (не О—Х—В-трансформация) возможно только в режиме относительно низких плотностей. Это ограничивает возможность применения СВЧ-волны на первой гармонике в физических программах установки. Значит, рассматривать частоту 56 ГГц в качестве основной частоты для ЭЦРН в установке Т-15МД представляется нецелесообразным. Существует ряд задач, для которых может представлять интерес нагрев плазмы и генерация ЭЦ-тока со смещением центра камеры в сторону сильного магнитного поля ($R < R_0$). Для таких задач подходит диапазон частот $f \sim 65\text{—}70$ ГГц. Для этих частот величина резонансного магнитного поля на первой гармонике составляет $\sim 2,25\text{—}2,5$ Тл. Эти частоты позволяют работать при более высоких плотностях плазмы, чем $f = 56$ ГГц (см. рис. 5). Однако в условиях Т-15МД ($B_T \leq 2$ Тл) вклад мощности в центре шнура и на стороне слабого магнитного поля для СВЧ-волны такой частоты будет невозможен.

ВЫБОР ЧАСТОТЫ ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ Т-15МД НА РАЗНЫХ ЭТАПАХ РАБОТЫ УСТАНОВКИ

Стадия физического пуска и начала работы установки. Основная задача для ЭЦРН на стадии физического пуска — обеспечение СВЧ-пробоя.

Для проектного значения тороидального магнитного поля частота, соответствующая вкладу СВЧ-мощности в центре разрядной камеры, составляет 112 ГГц. Однако необходимо учесть, что тороидальное магнитное поле, которое будет получено в первых режимах, возможно, будет ниже проектного значения. Заранее неизвестно, каким будет распределение рассеянных магнитных полей, в какой области (центр камеры, сторона сильного поля, сторона слабого поля) будут достигаться оптимальные для СВЧ-пробоя условия. Поэтому частота гиротрона должна быть такой, чтобы при изменении магнитного поля в рабочем диапазоне вклад мощности мог быть осуществлён в широком диапазоне: $R - a \leq R_{\text{ECR}} \leq R + a$.

Этому условию удовлетворяют частоты СВЧ-нагрева ~ 80 ГГц при использовании СВЧ-волны на второй гармонике ЭЦР (рис. 6) и ~ 40 ГГц — на

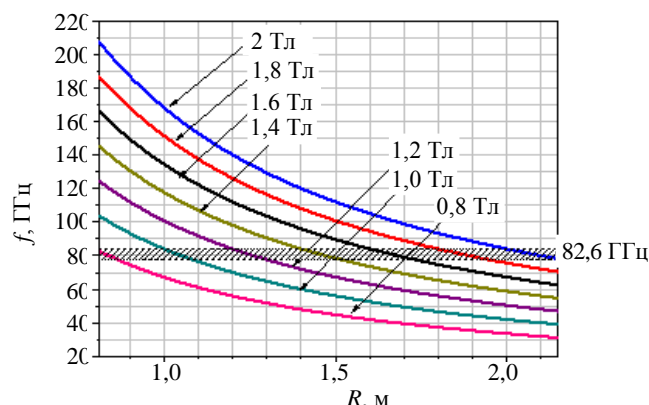


Рис. 6. Распределение частот второй гармоники ЭЦ-резонанса вдоль большого радиуса установки Т-15МД для нескольких значений B_T в центре камеры. Штриховкой показан диапазон частот, выбранный для гиротронов на стадии физического пуска установки

первой. Для этих частот существует область резонанса внутри вакуумной камеры Т-15МД для режимов с тороидальным магнитным полем, варьируемым в диапазоне 0,8 — 2 Тл. При таком изменении магнитного поля положение слоя ЭЦР сканирует практически весь шнур от $R_0 - a$ до $R_0 + a$.

Однако в силу условия (2) диапазон рабочих плотностей для частоты $f \sim 80$ ГГц шире (см. рис. 5). Поэтому, учитывая существующие разработки отечественных производителей гиротронов (фирма «ГИКОМ», Нижний Новгород [16]), была выбрана частота 82,6 ГГц.

Отметим, что поскольку установка Т-15МД — токамак с низким аспектным отношением, то при некоторых значениях магнитного поля в плазме одновременно с резонансом на второй гармонике

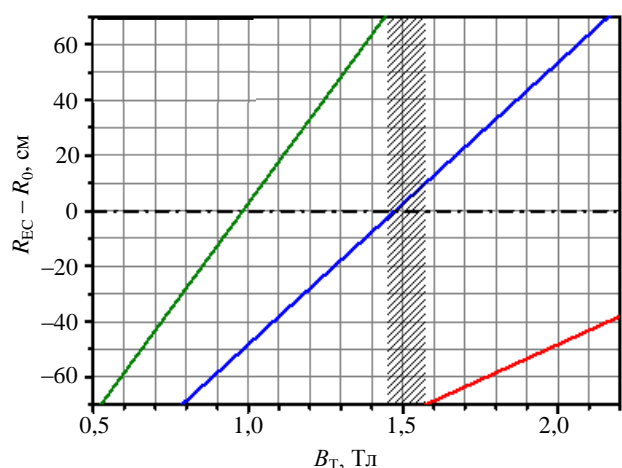


Рис. 7. Расположение областей резонанса на первой (—), второй (—) и третьей гармонике (—) для частоты $f = 82,6$ ГГц в зависимости от величины магнитного поля в центре вакуумной камеры: ▨ — область магнитных полей, при которых внутри вакуумной камеры находится только резонанс на второй гармонике

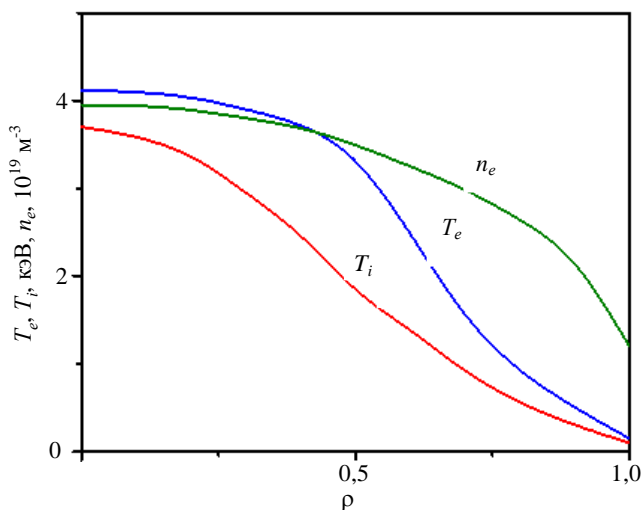


Рис. 8. Профили температуры электронов, ионов и плотности плазмы из [18], для которых выполнялись расчёты по коду OGRAY

нально менялся ток плазмы, чтобы сохранить неизменной величину q на границе.

В расчётах электронно-циклотронная волна необыкновенной поляризации с частотой $f = 82,6$ ГГц инжектировалась в плазму в экваториальной плоскости со стороны слабого магнитного поля. Вкладываемая мощность составляла 1 МВт. Результаты расчётов профиля вложенной мощности показаны на рис. 9. Для удобства восприятия пространственная координата умножена на знак разности $R_{\max} - R_0$, где R_{\max} — положение максимума поглощения, $R_0 = 1,5$ м — положение центра камеры. В этом случае отри-

могут присутствовать области резонанса для первой или для третьей гармоники (рис. 7). Для частоты $f = 82,6$ ГГц в узком диапазоне магнитных полей $B_T \sim 1,5$ Тл в камере присутствует только резонанс на второй гармонике. При снижении магнитного поля $B_T \sim 1,5$ Тл внутри камеры появляется область резонанса для третьей гармоники. При увеличении B_T появляется слой резонанса на первой гармонике.

Возможность использования частоты 82,6 ГГц на стадии полномасштабных экспериментов. Частота 82,6 ГГц обеспечивает центральный нагрев плазмы при $B_T = 1,4—1,6$ Тл (см. рис. 6). При $B_T = 2$ Тл вклад мощности будет происходить на периферии плазмы на стороне слабого поля. При $B_T = 1$ Тл резонансный слой находится на периферии плазмы на стороне сильного магнитного поля.

Для оценки смещения положения зоны ЭЦР при изменении магнитного поля с учётом шафрановского смещения были сделаны расчёты поглощения мощности и величины генерируемого тока по коду OGRAY [17]. Расчёты проведены для модельных распределений параметров плазмы, приведённых в [18] для режима с низкой плотностью плазмы $\bar{n}_e = 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Используемые профили электронной T_e и ионной температуры T_i и плотности показаны на рис. 8. Эффективный заряд плазмы в соответствии с [18] $Z_{\text{эф}} = 1,6$. Тороидальное магнитное поле $B_T = 1,5$ Тл, ток плазмы $I_p = 1$ МА, расчётное значение шафрановского смещения магнитной оси составило $\Delta_{\text{ш}} \sim 8$ см. При изменении тороидального магнитного поля пропорцио-

цательная координата соответствует вкладу мощности на стороне сильного поля, положительная — вкладу мощности на стороне слабого поля. При $B_T = 1,5$ Тл шафрановское смещение приводит к тому, что вклад мощности для гиротрона с $f = 82,6$ ГГц хотя и остаётся центральным, но оказывается слегка смещённым в сторону сильного поля (см. рис. 9, а). При $B_T = 2,0$ Тл вклад мощности смещается в сторону слабого поля, $\rho \sim 0,75$ для данного режима.

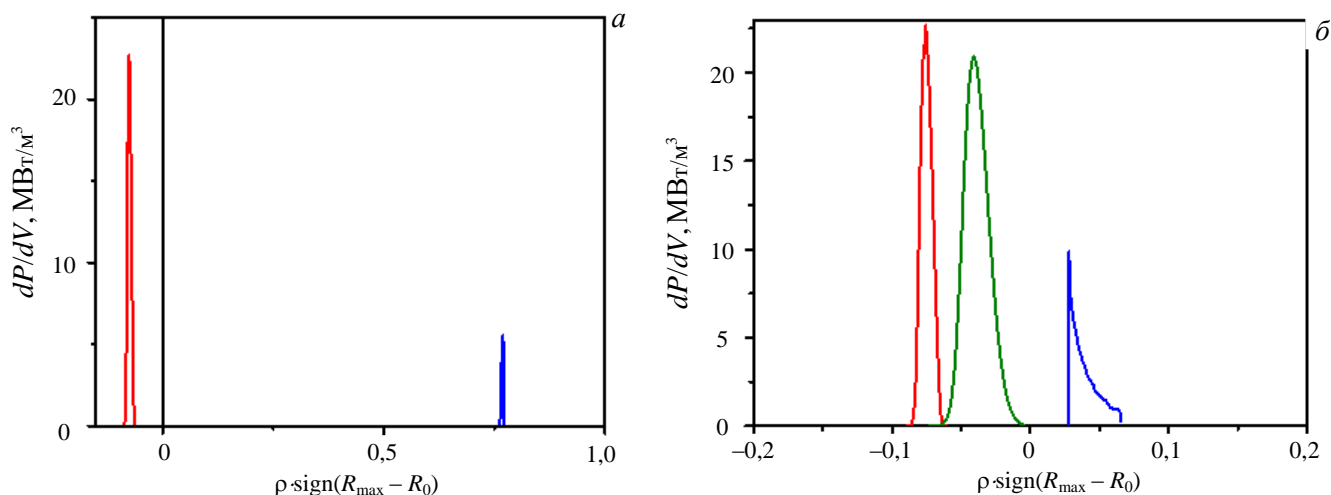


Рис. 9. Расчётные профили вложенной мощности необыкновенной ЭЦР-волны на второй гармонике с $f = 82,6$ ГГц при вводе мощности вдоль большого радиуса токамака для двух значений тороидального магнитного поля: — 1,5 Тл; — 2,0 Тл (а); для случая с $B_T = 1,5$ Тл при изменении угла ввода СВЧ-волны по отношению к направлению большого радиуса $\phi_T = 0^\circ$ (—), 10° (—), 15° (—) (б)

При вводе СВЧ-волны под углом к большому радиусу тора вклад мощности смещается в сторону слабого магнитного поля. На рис. 9, б показано расчётное изменение профиля вложенной мощности для случая $B_T = 1,5$ Тл при увеличении тороидального угла ввода мощности ϕ_T . Поскольку значение плотности в центре близко к плотности отсечки для данной волны, то при увеличении ϕ_T начинает проявляться рефракция, это приводит к снижению доли поглощённой мощности и уменьшению ожидаемой величины генерируемого тока (рис. 10). При уменьшении плотности плазмы на 20% влияние рефракции (ожидаемое на основании расчётов) становится малым, величина генерируемого тока возрастает до 90 кА (см. рис. 10, б). При вводе мощности вдоль большого радиуса ($\phi_T = 0^\circ$) полное однопроходное поглощение ожидается вплоть до $n_e \sim n_{\text{cut-off}}$, что не противоречит результатам, ранее полученным на токамаке Т-10 [5].

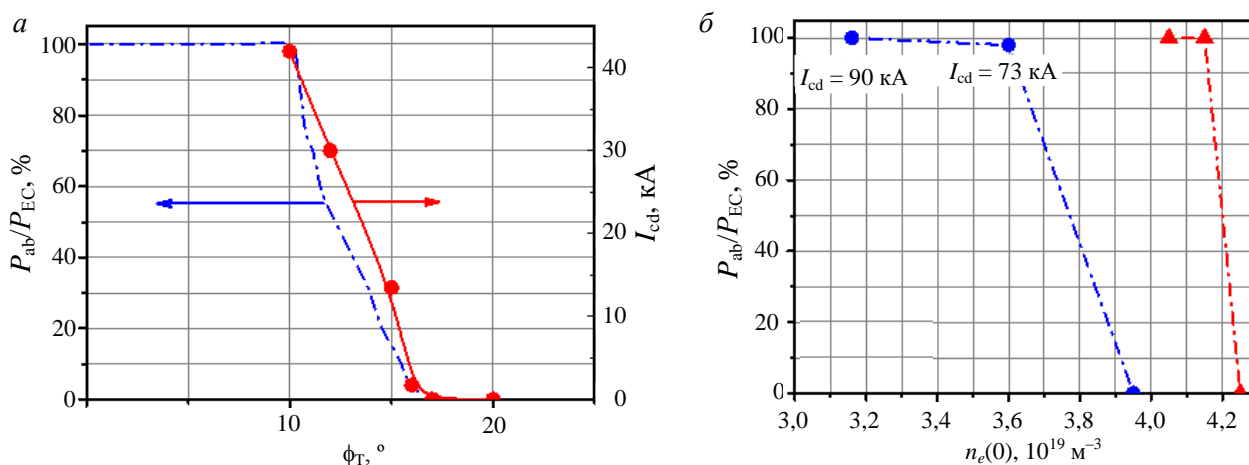


Рис. 10. Влияние рефракции на долю поглощённой мощности и величину генерируемого тока при изменении тороидального угла ввода СВЧ-мощности (а) и при изменении плотности плазмы $\phi_T = 20^\circ$ (●), 0° (▲) (б). Расчёты, представленные на рис. 10, а, выполнены в предположении профиля плотности, показанного на рис. 8: P_{ab} — расчётное значение поглощённой мощности; $P_{\text{EC}} = 1$ МВт — вводимая в плазму мощность

Таким образом, гиротроны с частотой $f = 82,6$ ГГц могут быть использованы на стадии полномасштабных экспериментов для нагрева плазмы и генерации тока в центре плазменного шнура в режимах с плотностью $n_e(0) < 4 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ при $B_T \sim 1,5$ Тл. При других значениях магнитного поля (см. рис. 6) смещение вклада СВЧ-мощности позволяет использовать эти гиротроны для нецентрального нагрева и контроля МГД-активности плазмы. Отметим, что в случае получения режимов с высокими полоидальными β_p и l_i (высокими шафрановскими смещениями) вклад мощности гиротронов с $f = 82,6$ ГГц может стать близким к центральному даже при $B_T \sim 2$ Тл.

Использование частоты 82,6 ГГц делает возможными исследования альтернативной схемы нагрева плазмы при плотностях, превосходящих плотность циклотронной отсечки. Речь идёт о так называемой О—Х—В-трансформации ЭЦР-волны [19]. Обыкновенная волна на второй гармонике ЭЦР инжектируется в плазму со стороны слабого магнитного поля под углом к тороидальному магнитному полю, достигает слоя циклотронной отсечки (плотность отсечки $n_{\text{cut-off}} \cong 8,6 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для частоты 82,6 ГГц), в котором превращается в необыкновенную волну. Необыкновенная волна распространяется в обратном направлении до слоя верхнего гибридного резонанса, где преобразуется в электростатическую бернштейновскую волну, которая распространяется к центру плазмы, где поглощается вблизи циклотронных гармоник. На установке TCV в режимах с Н-модой была получена эффективность поглощения мощности (обыкновенная волна, вторая гармоника ЭЦР) $\sim 60\%$ при вводе СВЧ-волны со стороны слабого поля под углом 26° к направлению магнитного поля [6]. В аналогичных экспериментах на стеллараторе W7-AS оптимальный тороидальный угол инжекции составлял 40° к направлению магнитного поля [7]. Следует отметить, что опыт TCV и W7-AS показывает, что эффективность нагрева плазмы с помощью такой схемы сильно зависит от градиента плотности в области О—Х-трансформации и флуктуаций плотности. Это означает, что реализация схемы нагрева, основанной на О—Х—В-трансформации, — кропотливая задача, требующая достаточного экспериментального времени, соответствующих расчётных кодов и развитых диагностик.

Выбор второй частоты СВЧ-нагрева. Существует круг задач, для которых желательно иметь возможность ввода СВЧ-волны на более высокой частоте $f > 82,6$ ГГц:

- для нагрева плазмы в центральной области ($\rho < 0,2\text{—}0,3$) при тороидальном магнитном поле, близком к проектному значению, $B_T \sim 2$ Тл;
- для нецентрального нагрева и генерации тока плазмы на стороне сильного поля при $B_T \sim 1,5$ Тл;
- для ЭЦРН плазмы при плотности $\bar{n}_e > 3 \cdot 10^{19} \text{ м}^{-3}$.

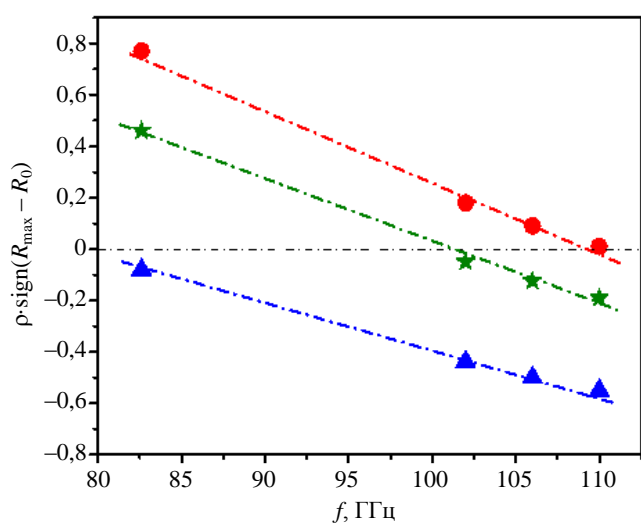


Рис. 11. Результаты расчёта по коду OGRAY положения вклада мощности для различных частот ЭЦ-волны (необыкновенная волна, вторая гармоника ЭЦР, ввод со стороны слабого поля, $\phi_T = 0^\circ$) для модельного режима: \blacktriangle — 1,5 Тл; \star — 1,8 Тл; \bullet — 2 Тл

Отметим, что для одновременного центрального и нецентрального нагрева и генерации тока плазмы желательно иметь две частоты гиротронов.

Тороидальному магнитному полю 2 Тл соответствует частота 112 ГГц (см. рис. 4). Однако необходимо учитывать влияние шафрановского смещения центра плазменного шнура. В рассмотренных режимах при $\beta_p \sim 1$ и внутренней индуктивности плазмы $l_i \sim 0,7$ шафрановское смещение составляло 8—10 см. Однако при увеличении β_p и l_i можно ожидать заметного увеличения шафрановского смещения. В этом случае при частоте ЭЦ-волны ~ 112 ГГц невозможно будет обеспечить вклад мощности вблизи магнитной оси. На рис. 11 показаны результаты расчёта положения области резонанса для различных частот ЭЦРН ($\phi_T = 0^\circ$) при различных значениях B_T для модельного режима.

Видно, что комбинация частот $f_1 \sim 82,6$ ГГц и f_2 в диапазоне 102—110 ГГц позволит варьировать вклад мощности в широких пределах, позволяя обеспечить одновременно центральный и нецентральный нагрев плазмы. Кроме того, для частот 102—110 ГГц плотность отсечки $n_{\text{cut-off}} \cong (6,4—7,5)10^{19} \text{ м}^{-3}$. Это существенно расширяет плотностной диапазон экспериментов с использованием ЭЦРН и ГТ.

Таким образом, увеличить гибкость системы СВЧ-нагрева в установке Т-15МД могло бы использование двухчастотных гиротронов, которые могли бы работать в двух диапазонах: $f_1 \sim 82,6$ ГГц и f_2 в диапазоне 102—110 ГГц. В этом случае появляется возможность быстрого (в пределах экспериментального дня) перераспределения мощности центрального и нецентрального нагрева в зависимости от задачи эксперимента. Двухчастотные гиротроны уже используются на токамаках ASDEX Upgrade [20], KSTAR [16], опубликован проект системы для токамака TCV [21]. Особенность комплекса СВЧ-нагрева в этом случае заключается в том, что линия передачи должна пропускать обе частоты с малыми потерями. Перестройка системы (гиротрон + линия передачи) с одной частоты на другую должна происходить за время не более, чем несколько рабочих смен.

ВЫВОДЫ

В данной статье проведено обоснование выбора частоты $f = 82,6$ ГГц гиротронного комплекса установки Т-15МД для начального этапа работы (физический пуск, получение первых разрядов).

Показано, что нагрев на частоте $f = 82,6$ ГГц может быть использован для центрального и нецентрального нагрева плазмы и генерации ЭЦ-тока на стадии полномасштабных экспериментов.

Для того чтобы обеспечить гибкость системы ЭЦРН установки Т-15МД, предлагается рассмотреть возможность создания гиротронного комплекса на основе двухчастотных гиротронов с $f_1 \sim 82,6$ ГГц и f_2 в диапазоне $\sim 102—110$ ГГц.

Работа выполнена при поддержке Госкорпорации «Росатом».

REFERENCES

1. **Khvostenko P.P., Anashkin I.O., Bondarchuk E.N. et al.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2019, vol. 42, issue 1, p. 15 (in Russian).
2. **Progress in the ITER.** Phys. Bas. — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, p. S1.
3. **Kuteev B.V., Shpanskiy Yu.S. and DEMO-FNS Team.** — Nucl. Fusion, 2017, vol. 57, p. 076039.
4. **Erckmann V., Gasparino U.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 1994, vol. 36, p. 1869.
5. **Esipchuk Yu.V. et al.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2003, vol. 45, p. 793.
6. **Pochelon A., Mueck A., Curchod L. et al.** — Nucl. Fusion, 2007, vol. 47, pp. 1552—1558.
7. **Laqua H.P., Erckmann V., Hartfuss H.J. et al.** — Phys. Rev. Lett., 1997, vol. 78, p. 3467.
8. **Roy I.N., Anashkin I.O., Kirneva N.A. et al.** — EPJ Web of Conf., 2017, vol. 149, p. 03021.
9. **Kirneva N.A.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 2001, vol. 43, p. A195.
10. **Felici F., Rossel J.X., Duval B.P. et al.** — Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, p. 113018.
11. **Melnikov A.V., Sushkov A.V., Belov A.V. et al.** — Fus. Eng. and Design, 2015, vol. 96—97, p. 306.
12. **Glukhikh V.A., Belyakov V.A., Mineev A.B.** Physical and technical fundamentals of controlled thermonuclear fusion. Tutorial. — StPb: Pub.house of Politechnical University, 2006 (in Russian).
13. **Greenwald M. et al.** — Nuclear Fusion, 1988, vol. 28, p. 2199.
14. **ITER Phys. Bas.** — Nucl. Fus., 1999, vol. 39, p. 2137.
15. **Minashin P.V., Kukushkin A.B., Harvey R.W.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2017, vol. 40, issue 2, p. 65
16. **Company «GYCOM»,** official site <http://www.gycom.ru/products/pr1.html> (in Russian).
17. **Zvonkov A.V. et al.** — Plasma Phys. Rep., 1998, vol. 24, p. 389.

18. **Leonov V.M.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2016, vol. 39, issue 3, p. 73 (in Russian).
19. **Hansen F.R., Lynov J.P., Michelsen P.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 1985, vol. 27, p. 1077.
20. **Wagner D., Stober J., Kircher M. et al.** — EPJ Web of Conf., 2017, vol. 149, p. 03004.
21. **Alberti S., Genoud J., Goodman T. et al.** — Ibid., vol. 157, p. 03001.

AUTHORS

Kirneva N.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; Kirneva_NA@nrcki.ru

Kislov D.A. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Kislov_DA@nrcki.ru

Roy I.N. NRC «Kurchatov Institute», pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Roy_IN@nrcki.ru

Received 10 December 2019

Revised 27 December 2019

Accepted 30 December 2019

Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2020, vol. 43, issue 1, pp. 64—74