УДК 621.039.647

ВОЗМОЖНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТЫ 140 ГГЦ ДЛЯ ЭЦР-НАГРЕВА ПЛАЗМЫ В ТОКАМАКЕ Т-15МД

Н.А. Кирнева[1, 2], А.А. Борщеговский[1], А.Ю. Куянов[1], И.С. Пименов[1], И.Н. Рой[1]

[1]*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*
[2]*Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Москва, Россия*

Электронно-циклотронный нагрев является одним из методов дополнительного нагрева плазмы в токамаке Т-15МД. В статье рассмотрена возможность нагрева плазмы с использованием необыкновенной волны на третьей гармонике электронно-циклотронного резонанса на частоте 140 ГГц. Показано, что в соответствии с расчётами по квазилинейному коду OGRAY можно ожидать высокой доли поглощённой мощности (вплоть до 96%) даже при включении ЭЦР-нагрева на омическом фоне. С ростом температуры плазмы доля однопроходного поглощения увеличивается в соответствии с теорией. Показано, что наиболее привлекательным является ввод мощности по вертикали. Предложены возможные инженерные решения реализации такой схемы ввода СВЧ-мощности.

Ключевые слова: электронно-циклотронный нагрев, однопроходное поглощение, поглощённая мощность, третья гармоника.

POSSIBILITY OF USING THE 140 GHZ FREQUENCY FOR ECR PLASMA HEATING IN THE T-15MD TOKAMAK

N.A. Kirneva [1, 2], A.A. Borshchegovskii[1], A.Yu. Kuyanov[1], I.S. Pimenov[1], I.N. Roi[1]

[1]*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*
[2]*National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

Electron-cyclotron heating is one of the methods of additional plasma heating in the T-15MD tokamak. The article considers the possibility of plasma heating using an extraordinary wave on the third harmonic of electron-cyclotron resonance at a frequency of 140 GHz. It has been shown that in accordance with the calculations by quasi-linear OGRAY code, a high fraction of single-pass absorption (up to 96%) can be expected even when the ECR is turned on with an ohmic background. Increase of this fraction with the increase in plasma temperature agrees with the theoretical predictions. Vertical power launch seems to be most attractive. Possible engineering solutions for implementation of such a scheme are proposed.

Key words: electron-cyclotron heating, single-pass absorption, absorbed power, third harmonic.

DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-3-24-36

ВВЕДЕНИЕ

Электронно-циклотронный нагрев рассматривается как один из методов дополнительного нагрева плазмы и создания неиндукционного тока в токамаке Т-15МД [1]. Уже на первом этапе работы установки (физический пуск и получение разряда) для осуществления пробоя будет использован один гиротрон с частотой 82,6 ГГц мощностью 1 МВт [2]. Предполагается, что в дальнейшем этот гиротрон может быть использован для нагрева плазмы и генерации тока с использованием необыкновенной волны на второй гармонике электронно-циклотронного резонанса (ЭЦР) [3].

Возможность нагрева плазмы будет ограничиваться режимами с плотностью, не превышающей плотности отсечки, которая определяется условием

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

Здесь ω_{pe} — электронная плазменная частота; ω_{ce} — электронная циклотронная частота (ЭЦЧ); s — номер гармоники.

После подстановки ω_{pe} [рад/с] = $1{,}78\cdot10^{11}\, n_e^{0,5}$ и ω_{ce} [рад/с] = $1{,}76\cdot10^{11}B$ (здесь плотность n_e в 10^{19} м$^{-3}$, магнитное поле B в Тл) получим выражения для плотности отсечки

$$n_{\text{cut-off}}\,[10^{19}\text{ м}^{-3}] = 0{,}98s^2B^2 \text{ — для обыкновенной волны;}$$
$$n_{\text{cut-off}}\,[10^{19}\text{ м}^{-3}] = 0{,}98s(s-1)B^2 \text{ — для необыкновенной волны.} \quad (2)$$

Для необыкновенной волны с частотой f = 82,6 ГГц на второй гармонике ЭЦР плотность отсечки составляет $n_{\text{cut-off}} = 4{,}2\cdot10^{19}$ м$^{-3}$ при вводе СВЧ-волны вдоль большого радиуса тора R и снижается при вводе волны под углом к R. Отметим, что это локальное значение плотности плазмы (не среднее по объёму или по линии наблюдения). В то же время, как показано в работах [3, 4], рабочая область токамака Т-15МД по плотности существенно шире. При токе плазмы 1 МА предельное значение средней плотности по Гринвальду [5] составляет $n_{\text{Gw}} = 7{,}1\cdot10^{19}$ м$^{-3}$ в расчёте на малый радиус плазмы a = 0,67 м, при токе плазмы

1,5 МА $n_{Gw} = 10 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$ и при токе плазмы 2 МА $n_{Gw} = 14 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$. Это означает, что для использования СВЧ-нагрева плазмы в полномасштабных экспериментах токамака Т-15МД необходимо предусмотреть возможность увеличения частоты гиротронов и/или изменение типа используемой волны.

На установке TCV для нагрева плазмы с высокой плотностью используется необыкновенно поляризованная электронно-циклотронная волна на третьей гармонике ЭЦЧ [6]. Комплекс электронно-циклотронного нагрева на TCV состоит из двух групп гиротронов. Частота 82,7 ГГц используется для нагрева на второй гармонике, частота 118 ГГц — для нагрева на третьей гармонике ЭЦР. Планируется расширение комплекса ЭЦР-нагрева, которое предполагает добавление гиротронов с частотой 126 ГГц для нагрева на третьей гармонике ЭЦЧ [7]. Поскольку оптическая плотность плазмы зависит от температуры [8, 9], на современных установках доля однопроходного поглощения ЭЦР-волны на третьей гармонике оказывается меньше, чем на второй. Для увеличения доли поглощённой мощности ввод СВЧ-волны на TCV осуществляется по вертикали, почти вдоль линии циклотронного резонанса [6]. В установке ASDEX Upgrade для нагрева плазмы высокой плотности при пониженном значении магнитного поля наряду с нагревом на необыкновенной волне на третьей гармонике используется обыкновенная волна на второй гармонике [10]. При нагреве на третьей гармонике увеличение доли поглощённой мощности происходит за счёт так называемого «бутстреп-эффекта» [11]. На начальной стадии нагрева волна поглощается на внутреннем обводе тора на второй гармонике, что приводит к образованию пьедестала и формированию H-моды. Температура плазмы увеличивается, что приводит к возрастанию поглощения на третьей гармонике. Нагрев на обыкновенной волне на второй гармонике менее удобен, поскольку для увеличения поглощения требует установки отражательного элемента на стенке камеры на внутреннем обводе для обеспечения прохождения волны и поглощения её за второй проход [10]. Нагрев на обыкновенной волне на второй гармонике также используется на стеллараторе LHD [12]. ЭЦР-нагрев на необыкновенной волне на третьей гармонике используется на токамаке KSTAR [13] в экспериментах по стабилизации МГД-неустойчивостей плазмы.

Аналогичным образом на установке Т-15МД для ЭЦР-нагрева плазмы при плотностях, превышающих плотность отсечки для необыкновенной волны на второй гармонике ЭЦЧ, может быть использована обыкновенная волна на второй гармонике ЭЦЧ и необыкновенная волна на третьей гармонике. Для нагрева на третьей гармонике могут быть использованы уже существующие мегаваттные гиротроны установки Т-10 (f = 140 ГГц). В табл. 1 приведены значения резонансного магнитного поля B_{res} [Тл] = f [ГГц]/(28·s) и плотности отсечки $n_{cut\text{-}off}$ для волны различной поляризации на частоте 82,6 и 140 ГГц. В соответствии с общепринятыми обозначениями «X» соответствует необыкновенно поляризованной волне, «O» — волне обыкновенной поляризации. Цифрой обозначен номер гармоники. В соответствии с данными табл. 1 использование волны O2 на частоте 82,6 ГГц позволяет увеличить рабочее значение плотности плазмы вдвое по сравнению с волной X2 на той же частоте. Использование волны X3 на частоте 140 ГГц позволяет гораздо значительнее расширить рассматриваемый диапазон плотностей. При распределении плотности плазмы, близком к параболическому при $n_e(0) = 1{,}6 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$, значение средней плотности будет близко к $1 \cdot 10^{20}$ м$^{-3}$, что соответствует плотности Гринвальда для I_p = 1,5 МА.

Т а б л и ц а 1. **Плотности отсечки и значения резонансного магнитного поля для ЭЦ-волны разной поляризации**

Частота волны, ГГц	Тип волны и номер гармоники	B_{res}, Тл	$n_{cut\text{-}off}$, 10^{19} м$^{-3}$
82,6	X2	1,47	4,2
	O2	1,47	8,4
	X3	0,98	5,6
140	X3	1,67	16

Доля мощности, поглощённой за один проход, зависит от температуры плазмы следующим образом:

$$\frac{P_{ab}}{P_{inj}} = (1 - \exp(-\tau)); \qquad \tau \sim \left(\frac{T_e}{m_e c^2} \right)^{\alpha}, \tag{3}$$

где P_{ab} и P_{inj} — поглощённая и введённая мощность соответственно; T_e — температура электронов в кэВ; m_e — масса электрона; c — скорость света в вакууме; $m_e c^2$ = 511 кэВ; τ — оптическая толщина. Для необыкновенно поляризованной волны $\alpha = s - 1$, ($s \geq 2$), для обыкновенно поляризованной волны $\alpha = s$.

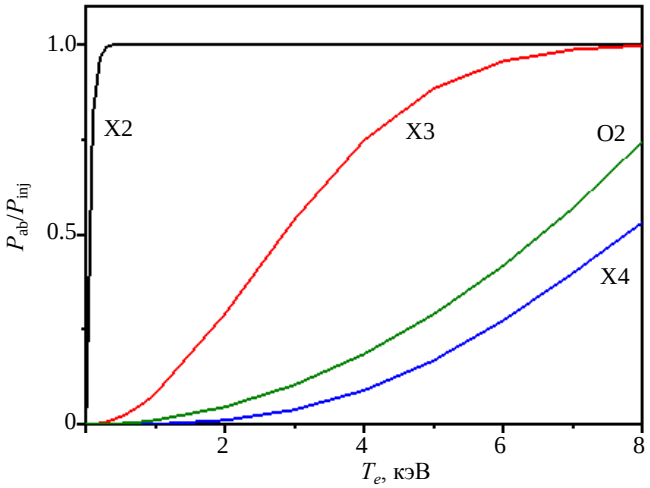

Рис. 1. Доля поглощённой мощности в зависимости от температуры плазмы для электронно-циклотронной волны разной поляризации на гармониках электронно-циклотронной частоты

На рис. 1 приведены оценки доли поглощённой мощности для необыкновенной волны на второй, третьей и четвёртой гармонике и обыкновенной волны на второй гармонике в зависимости от электронной температуры плазмы для $n_e = 3 \cdot 10^{19}$ м$^{-3}$, $B_T = 1{,}5$ Тл, для значения большого радиуса установки $R_0 = 1{,}5$ м. Рассматривалась волна, распространяющаяся вдоль большого радиуса установки. Оптическая толщина плазмы рассчитывалась по формулам, приведённым в [9] (формула (25) и табл. 4 из [9]). Приведённые оценки не противоречат экспериментально наблюдаемому снижению однопроходного поглощения в современных установках при переходе от X2 на волну X3. Однако для ожидаемых в Т-15МД значений $T_e \sim 4$ кэВ [4] при использовании волны X3 доля мощности, поглощённой за один проход, оказывается более чем в 2 раза выше, чем для волны O2. Кроме того, как упоминалось, опыт работы на токамаке ASDEX Upgrade [10, 11] показал, что использование волны X3 не требует применения дополнительных внутрикамерных элементов для увеличения однопроходного поглощения в отличие от волны O2.

Таким образом, кажется целесообразным рассмотреть возможность использования гиротронов с частотой $f = 140$ ГГц для нагрева плазмы в Т-15МД на третьей гармонике электронно-циклотронной частоты с использованием необыкновенно поляризованной волны. Благоприятным для этого является то, что в НИЦ «Курчатовский институт» сохранились два гиротрона мощностью 1 МВт каждый, которые могут быть модернизированы для работы на установке Т-15МД в длинном импульсе (до 10 с). Если это возможно, то комплекс ЭЦР-нагрева может быть оснащён дополнительной мощностью 2 МВт уже на более ранней стадии работы установки.

В этой работе будет рассмотрена возможность использования гиротронов с частотой 140 ГГц для нагрева плазмы в Т-15МД:

— будут рассмотрены различные инженерные варианты ввода мощности на третьей гармонике;

— с помощью кода OGRAY [14] будет проанализирована возможность обеспечения высокой доли однопроходного поглощения для волны X3 с частотой 140 ГГц в различной геометрии ввода и в различных режимах работы установки.

УСЛОВИЯ ЦИКЛОТРОННОГО РЕЗОНАНСА ДЛЯ ЭЦ-ВОЛНЫ С ЧАСТОТОЙ 140 ГГЦ В Т-15МД

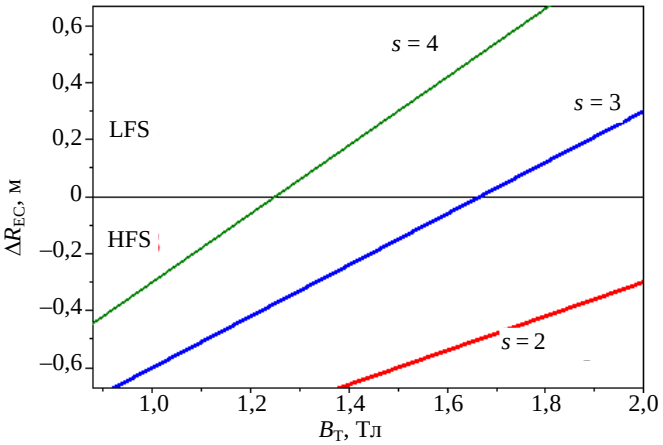

Рис. 2. Смещение положения ЭЦ-резонанса на второй, третьей и четвёртой гармонике относительно центра вакуумной камеры установки Т-15МД для гиротронов с частотой 140 ГГц при разных значениях B_T: LFS — сторона слабого поля; HFS — сторона сильного магнитного поля

Как уже многократно отмечалось [1, 2], отличительная особенность установки Т-15МД заключается в малой величине аспектного отношения $A = R_0/a$. С точки зрения реализации электронно-циклотронного нагрева это приводит к тому, что при некоторых значениях магнитного поля в плазме могут присутствовать слои электронно-циклотронного резонанса на нескольких гармониках (рис. 2). На рис. 2 показано расположение слоёв циклотронного резонанса на второй, третьей и четвёртой гармониках для волны с частотой 140 ГГц. Величина ΔR_{EC} характеризует смещение резонансного слоя относительно центра вакуумной камеры, т.е. $\Delta R_{EC} = R_{res} - R_0$, где $R_{res} = 28 s B_T[\text{Тл}] R_0[\text{м}]/f\,[\text{ГГц}]$.

Для частоты 140 ГГц при значении тороидального магнитного поля B_T = 1,5 Тл внутри вакуумной камеры одновременно существуют области, резонансные на второй, третьей и четвёртой гармонике.

Области резонанса на третьей и четвёртой гармонике частоты 140 ГГц одновременно присутствуют внутри вакуумной камеры Т-15МД в широком диапазоне значений магнитного поля B_T = 0,9—1,8 Тл. Если тороидальное магнитное поле B_T = 1,4—2 Тл, то на стороне сильного магнитного поля появляется резонансный слой на второй гармонике.

ВОЗМОЖНЫЕ СХЕМЫ ВВОДА СВЧ-МОЩНОСТИ В Т-15МД

Система ввода СВЧ-излучения для ЭЦР-нагрева и генерации тока должна удовлетворять следующим требованиям:

— чтобы избежать пробоев в волноводном тракте, СВЧ-излучение до входа в плазму не должно пересекать область магнитного поля, резонансного для вводимого излучения;

— система СВЧ-ввода должна соответствовать габаритам используемого патрубка;

— необходимо обеспечить низкие дифракционные потери (желательно, чтобы суммарные потери за счёт расширения пучка не превышали 1%).

В установке Т-15МД предполагается использование восьми гиротронов в двух тороидальных сечениях. В каждом сечении существует возможность ввода мощности по вертикали, через верхний наклонный патрубок и через экваториальный патрубок (рис. 3, *а*, схемы 1, 2 и 3 соответственно). Ввод мощности по вертикали может быть организован через верхний вертикальный патрубок (рис. 3, *б*, схема 1') и верхний горизонтальный патрубок (рис. 3, *б*, схема 1).

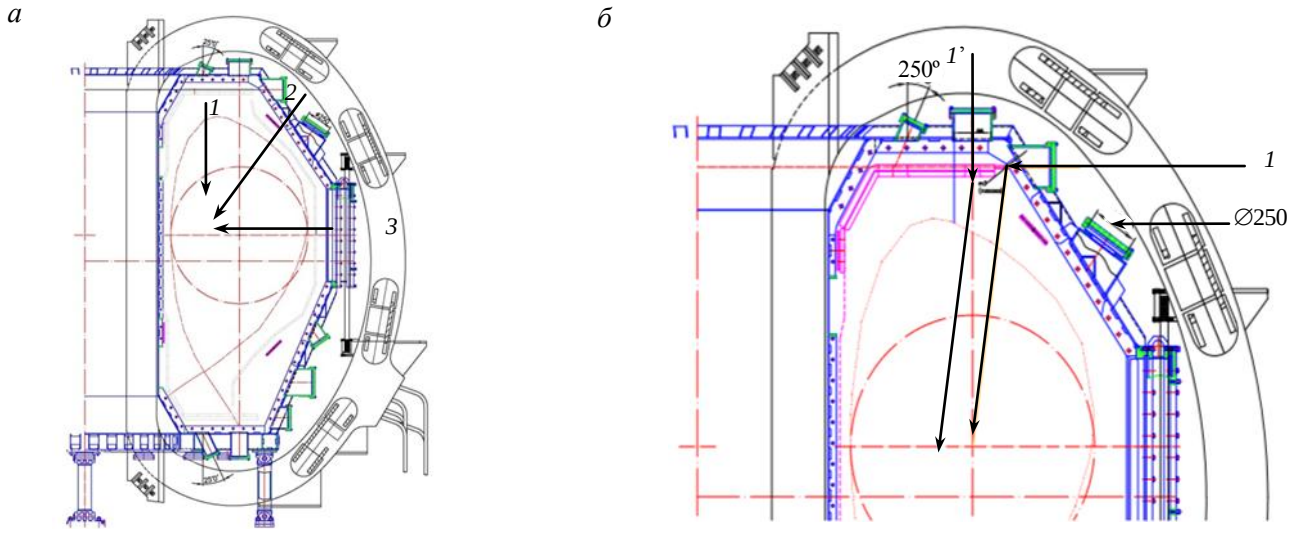

Рис. 3. Полоидальное сечение установки Т-15МД. Стрелками показаны возможные принципиальные схемы ввода СВЧ-мощности: *1*— вертикальный ввод, *2* — ввод через верхний 55° патрубок, *3* — ввод через экваториальный патрубок (*а*); разные возможные схемы ввода СВЧ-мощности по вертикали (*б*)

Отметим, что в статье будут рассмотрены исключительно зеркальные системы СВЧ-ввода с подвижным последним зеркалом.

Рассмотрим схемы 1 и 1' более подробно.

Схема 1'. Ввод СВЧ-излучения через верхний вертикальный патрубок. Исходя из того, что СВЧ-пучок изначально входит в патрубок в вертикальном положении и чтобы обеспечить распространение пучка исключительно в полоидальном сечении, надо будет применять достаточно большое по габаритам последнее сканирующее зеркало, так как угол между пучком и зеркалом будет достаточно мал. Поэтому для данной схемы целесообразно придать пучку тороидальный угол.

Вертикальная ось симметрии верхнего патрубка проходит через центр вакуумной камеры. Диаметр патрубка в сечении составляет 200 мм. В соответствии с приведёнными требованиями к системе ввода это означает, что данная схема не может быть использована при B_T = 1,56—1,78 Тл. Конечно, с точки зрения ввода излучения в плазму правильнее было бы рассматривать результирующее магнитное поле от всех источников (тороидальные катушки, поле тока плазмы, поле управляющих катушек) в той области, где

проходит пучок. На пути следования пучка не должно быть зоны резонансного магнитного поля и его гармоник, которые соответствуют частоте вводимого излучения. В первом приближении, если брать в расчёт только поле от тороидальных катушек, считая, что поле тока плазмы и поле управляющих витков дадут малую поправку, то резонансное магнитное поле должно быть смещено в сторону сильного магнитного поля относительно внутреннего края рассматриваемого патрубка, т.е. $B_T < 1{,}56$ Тл. Следовательно, в этой конфигурации в условиях небольших шафрановских смещений, когда положение магнитной оси близко к геометрическому центру камеры токамака, невозможен вклад мощности в центр плазменного шнура.

Схема 1. Ввод СВЧ-излучения через верхний горизонтальный патрубок. С точки зрения инженерной реализации в этом случае можно применить систему ввода СВЧ-излучения, аналогичную предложенной на токамаке TCV [6]. Чтобы менять область вклада при сохранении большого полоидального угла, здесь предусмотрено перемещение зеркала вдоль большого радиуса установки *R*. Также это позволяет избежать попадания зеркала в область ЭЦ-резонанса. В данном случае максимально допустимое магнитное поле составляет $B_T = 1{,}78$ Тл. Таким образом, схема 1 оказывается предпочтительной, так как в ней оказывается возможным центральный вклад мощности.

В обеих рассмотренных конфигурациях (схемы 1 и 1') квазиоптическая схема системы СВЧ-ввода рассчитывалась таким образом, чтобы минимизировать размеры зеркал. Во-первых, это значительно упрощает механизм поворота последнего зеркала (из-за того, что зеркало по сравнению с неоптимизированными случаями имеет меньшую массу), а во-вторых, мы ограничены размером патрубка. Предполагалось, что в обоих случаях используется двухзеркальная система ввода: первое (по ходу волны от гиротрона) зеркало является фокусирующим, последнее зеркало (плоское), вращается вокруг оси симметрии патрубка, обеспечивая заданные тороидальный и полоидальный углы распространения СВЧ-волны до плазмы.

На основании проведённого анализа были выбраны следующие параметры фокусировки, которые в дальнейшем были использованы в расчётах по коду OGRAY:

— радиус кривизны волнового фронта 284 см;

— полуширина пучка по уровню e^{-1} по мощности составляет 3,12 см;

— полуширина пучка по уровню e^{-1} составляет 2,2 см в области перетяжки в вакуумных условиях.

Геометрическое положение зеркала для трёх схем ввода, использованных в расчётах OGRAY, приведено в табл. 2.

Т а б л и ц а 2. **Геометрическое положение последнего зеркала для различных возможных схем СВЧ-ввода**

Номер схемы	Высота зеркала над экваториальной плоскостью, см	Положение зеркала по *R*, см
1	141,8	169,2
2	84,0	208,7
3	0	240,0

РАСЧЁТ ПОГЛОЩЕНИЯ МОЩНОСТИ НА ТРЕТЬЕЙ ГАРМОНИКЕ ЭЛЕКТРОННО-ЦИКЛОТРОННОЙ ЧАСТОТЫ В ТОКАМАКЕ Т-15МД

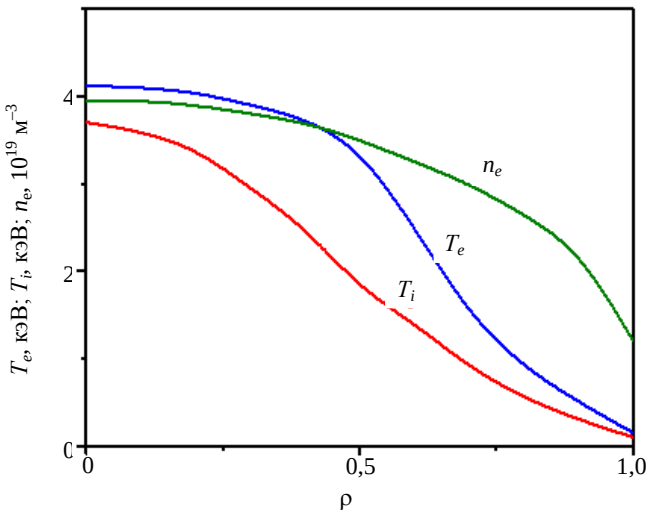

Рис. 4. Профили температуры электронов, ионов и плотности плазмы из [4], для которых выполнялись расчёты по коду OGRAY

Оценки возможности нагрева плазмы с использованием СВЧ-волны с частотой 140 ГГц были выполнены с помощью кода OGRAY для базового режима [4] с высокой мощностью нагрева плазмы и высокой вытянутостью (κ = 1,75). Наряду с этим тестовые расчёты проведены для умеренной вытянутости плазмы κ = 1,3 на фоне омического нагрева и дополнительного нагрева малой мощности 1 и 3 МВт. Рассматривалась необыкновенно поляризованная волна мощностью 1 МВт на третьей гармонике ЭЦЧ.

Режим с высокой вытянутостью и треугольностью. Профили плотности и температуры плазмы для этого режима показаны на рис. 4. Параметры режима соответствуют параметрам, приведённым в [4]:

— большой радиус плазмы R = 1,5 м;

— малый радиус плазмы a = 0,67 м;

— ток плазмы I_p = 1 МА при тороидальном магнитном поле B_T = 1,5 Тл; при изменении магнитного поля ток плазмы менялся, чтобы сохранить значение фактора запаса устойчивости q_L на границе;

— вытянутость плазмы к = 1,75, треугольность δ = 0,35;

— рабочий газ — водород;

— эффективный заряд плазмы $z_{эф}$ = 1,6.

Для этих условий с помощью кода OGRAY были выполнены расчёты распространения СВЧ-волны для схем ввода мощности 1—3, показанных на рис. 3. Во всех случаях рассматривалось распространение волны вдоль R, тороидальный угол ввода мощности задавался малым, $\varphi_T = 1^o$. Полоидальный угол ввода мощности φ_p определялся как угол по отношению к горизонтальной плоскости (рис. 5).

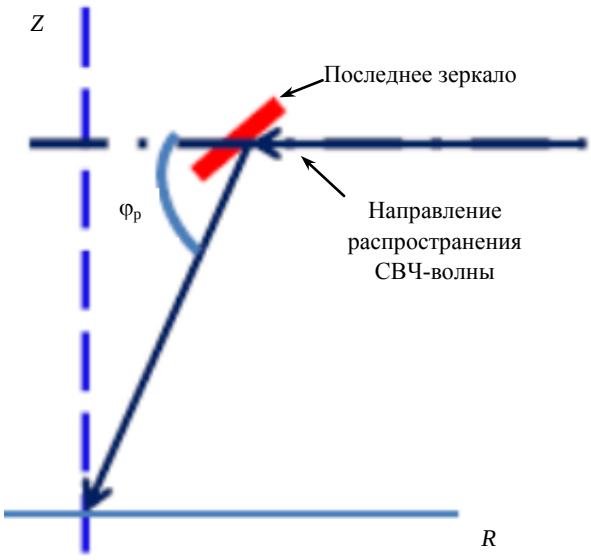

Рис. 5. Определение полоидального угла ввода СВЧ-мощности

На рис. 6 показаны расчётные профили поглощённой мощности (см. рис. 6, *а*) и поглощение мощности по направлению распространения луча (см. рис. 6, *б*) при вертикальном вводе СВЧ-мощности (схема 1) в зависимости от величины тороидального магнитного поля в центре камеры токамака. Полоидальный угол ввода мощности определялся из условия, чтобы луч, идущий вдоль направления распространения волны, пересекал слой резонанса вблизи экваториальной плоскости. При магнитном поле B_T = 1,76 Тл положение резонанса для волны на третьей гармонике (f = 140 ГГц) смещается на R = 158 см, что с учётом шафрановского смещения (~10 см) для рассматриваемого режима близко к положению магнитной оси. В этом случае профиль поглощённой мощности оказывается наиболее широким и захватывает центр плазмы. При меньших значениях B_T область резонанса смещается в сторону сильного магнитного поля, профиль вклада мощности становится более локализованным (луч пересекает слой резонанса под меньшим углом) и не захватывает центр плазменного шнура.

Как видно на рис. 6, *б*, для всех трёх значений магнитного поля наблюдается полное однопроходное поглощение мощности СВЧ-волны.

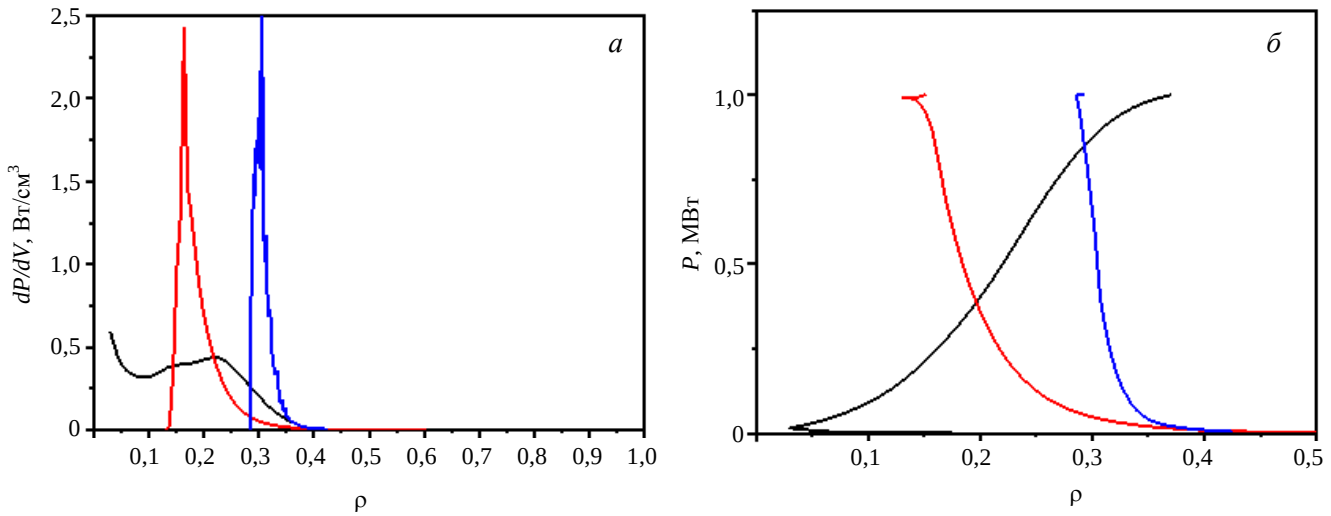

Рис. 6. Зависимость поглощённой СВЧ-мощности от тороидального магнитного поля в схеме 1: *а* — профили поглощённой мощности; *б* — изменение мощности по лучу; — — B_T = 1,76 Тл, φ_p = 85,6°; — — B_T = 1,60 Тл, φ_p = 81°; — — B_T = 1,50 Тл, φ_p = 76,4°

На рис. 7 показано изменение профиля вложенной мощности при изменении полоидального угла ввода мощности в режиме с B_T = 1,6 Тл. Область резонанса смещена на сторону сильного магнитного поля на R = 1,44 м. Наиболее центральному вкладу мощности соответствуют полоидальные углы 80° и 81°. Во всех случаях, кроме $\varphi_p = 82°$, доля однопроходного поглощения мощности превышает 95% (см. рис. 7, *б* и 8). При $\varphi_p = 82°$ для заданного положения последнего зеркала электронно-циклотронная волна вблизи резонансного слоя идёт по касательной к нему (рис. 7, *в*). Из-за конечной ширины пучка зона пересечения пучка с ЭЦ-резонансом оказывается широкой. Это приводит к значительному уширению профиля поглощённой мощности. В то же время из-за конечного поперечного размера пучка значительная часть СВЧ-мощности до поглощения проходит в область с более низкой температурой плазмы, т.е. меньшей оптической толщиной, что приводит к относительному снижению доли однопроходного поглощения.

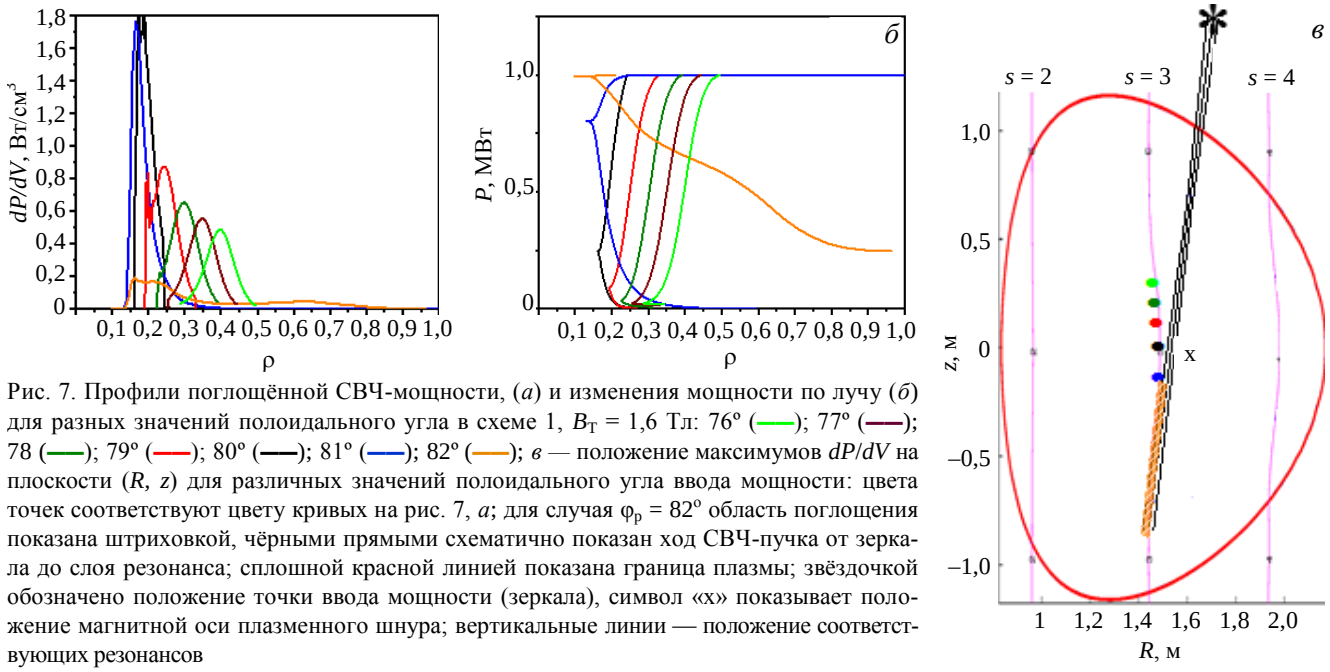

Рис. 7. Профили поглощённой СВЧ-мощности, (*а*) и изменения мощности по лучу (*б*) для разных значений полоидального угла в схеме 1, B_T = 1,6 Тл: 76° (—); 77° (—); 78 (—); 79° (—); 80° (—); 81° (—); 82° (—); *в* — положение максимумов *dP*/*dV* на плоскости (*R*, *z*) для различных значений полоидального угла ввода мощности: цвета точек соответствуют цвету кривых на рис. 7, *а*; для случая $\varphi_p = 82°$ область поглощения показана штриховкой, чёрными прямыми схематично показан ход СВЧ-пучка от зеркала до слоя резонанса; сплошной красной линией показана граница плазмы; звёздочкой обозначено положение точки ввода мощности (зеркала), символ «x» показывает положение магнитной оси плазменного шнура; вертикальные линии — положение соответствующих резонансов

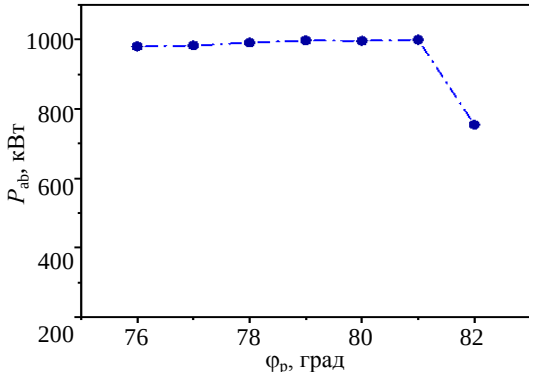

Рис. 8. Зависимость величины поглощённой СВЧ-мощности от полоидального угла в схеме 1

Таким образом, в условиях вертикального ввода мощности (схема 1 на рис. 3) в рассматриваемом режиме можно ожидать эффективного нагрева плазмы на необыкновенной волне на третьей гармонике ЭЦР на частоте 140 ГГц в широком диапазоне полоидальных углов ввода.

Сравним возможности нагрева плазмы на частоте 140 ГГц в схемах 1, 2, 3 (см. рис. 3). Расчёты по OGRAY были сделаны для двух значений магнитного поля: B_T = 1,76 и B_T = 1,5 Тл.

Результаты расчётов для B_T = 1,76 Тл приведены на рис. 9. Это поле соответствует положению СВЧ-резонанса

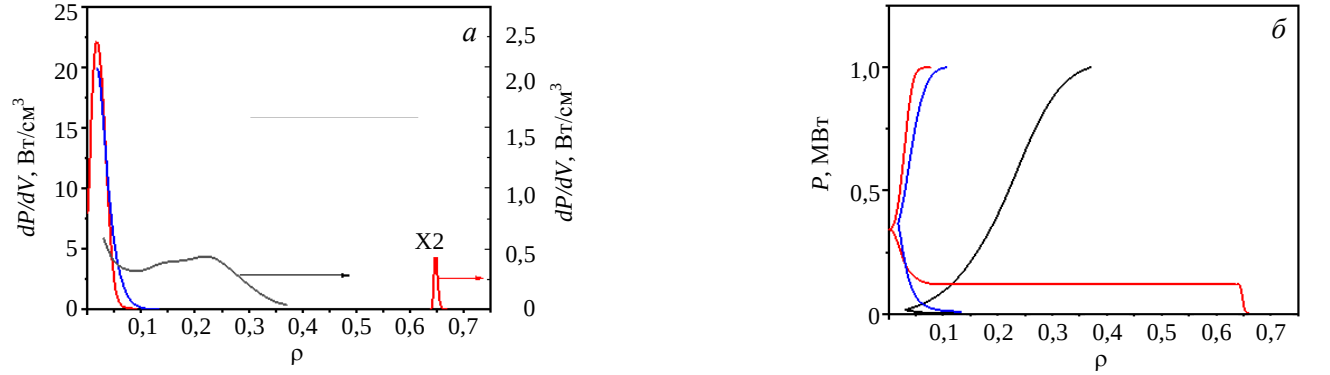

Рис. 9. Сравнение схем 1, 2, 3 для B_T = 1,76 Тл: *а* — профили поглощённой мощности; *б* — изменение мощности по лучу; — схема 1, $\varphi_p = 85{,}6°$; — схема 2, $\varphi_p = 59°$; — схема 3, $\varphi_p = 0°$

вблизи магнитной оси, т.е. вблизи центра плазменного шнура. Поскольку в случае вертикального ввода луч идёт почти по касательной к резонансному слою, то профиль поглощённой мощности оказывается широким. При вводе мощности через экваториальный (схема 3) или верхний наклонный (схема 2) патрубок вклад мощности узко локализован в центре плазменного шнура. Вертикальный ввод позволяет добиться полного однопроходного поглощения мощности (P_{ab}/P_{inj} = 1). При вводе мощности через экваториальный патрубок в области резонанса на третьей гармонике поглощается 88% введённой мощности (P_{ab}/P_{inj} = 0,88). Однако при этом значении магнитного поля на стороне сильного поля появляется область, соответствующая резонансу на второй гармонике электронно-циклотронной частоты (R_{res} = 1,06 м). Можно ожидать, что мощность, не поглощённая в области резонанса на третьей гармонике, поглотится на второй, аналогично тому, как получается в режимах на токамаке ASDEX Upgrade [10, 11]. Расчёт по коду OGRAY подтверждает возможность поглощения оставшихся 120 кВт в слое резонанса на второй гармонике (см. рис. 9, *а*).

При B_T = 1,5 Тл вклад мощности локализован вблизи ρ = 0,3 для всех трёх рассматриваемых схем ввода СВЧ-мощности (рис. 10). Наибольшая доля поглощённой мощности (99%) наблюдается при вер-

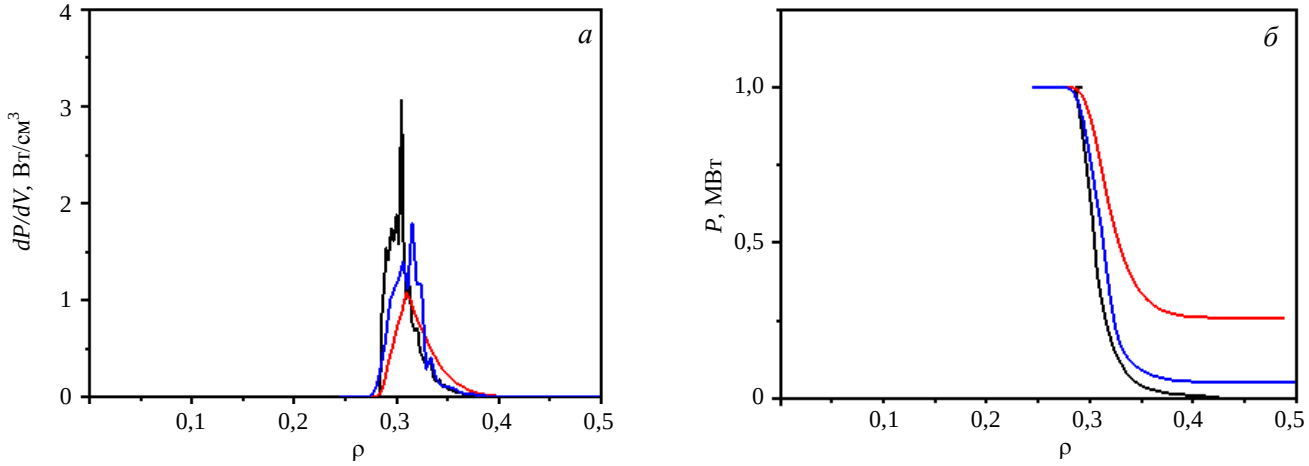

Рис. 10. Сравнение схем 1, 2, 3 для B_T = 1,5 Тл: *а* — профили поглощённой мощности; *б* — изменение мощности по лучу; — — схема 1, φ_p = 76,4°; — — схема 2, φ_p = 48°; — — схема 3, φ_p = 0°

тикальном вводе (схема 1), при вводе по схеме 2 доля поглощённой мощности составляет 95% и 74% при вводе по схеме 3. Однако резонансный слой для второй гармоники оказывается на границе плазмы и поглощения мощности в нём не происходит в отличие от предыдущего случая.

Режимы с умеренными κ и δ. Рассмотрим возможность нагрева плазмы на частоте 140 ГГц в режимах с более умеренными параметрами: с меньшей, чем в [4], суммарной мощностью нагрева и с меньшими значениями вытянутости и треугольности плазмы (κ = 1,3, δ = 0,2).

Для определения температуры и плотности в таких режимах были проведены расчёты в коде ASTRA [15] по модели канонических профилей в редакции 1995 г. [16], которая успешно использовалась для анализа разрядов Т-10 [17] и TCV [18]. Моделирование проводилось для режимов со следующими параметрами: I_p = 1 МА, B_T = 1,5 и 1,76 Тл, линейная средняя плотность $\langle n_e \rangle = 3\cdot10^{19}$ м$^{-3}$, $z_{эф}$ = 2,5. Были рассчитаны профили температуры электронов и плотности в омическом режиме и при дополнительном нагреве (табл. 3). Предполагается, что дополнительный нагрев может быть осуществлён с помощью одного или трёх гиротронов с мощностью 1 МВт на гиротрон. Один гиротрон с частотой 82,6 ГГц уже имеется в наличии на Т-15МД, т.е. режим с комбинацией омического нагрева и дополнительного нагрева мощностью 1 МВт может быть получен на самой ранней стадии работы установки. Мощность дополнительного нагрева и область вклада мощности ρ_{dep}, для которых были рассчитаны профили температуры и плотности плазмы, приведены в табл. 3.

Т а б л и ц а 3. **Величины мощности ЭЦ-нагрева и область вклада мощности, использованные в расчёте по коду ASTRA**

Номер расчёта	Мощность дополнительного нагрева, МВт	B_T, Тл	ρ_{dep}
A1	0	1,76	—
A2	1		0,3
A3	3		0,3
A4	0	1,5	—
A5	1		0

Полученные в расчётах профили температуры и плотности плазмы приведены на рис. 11 и 12.

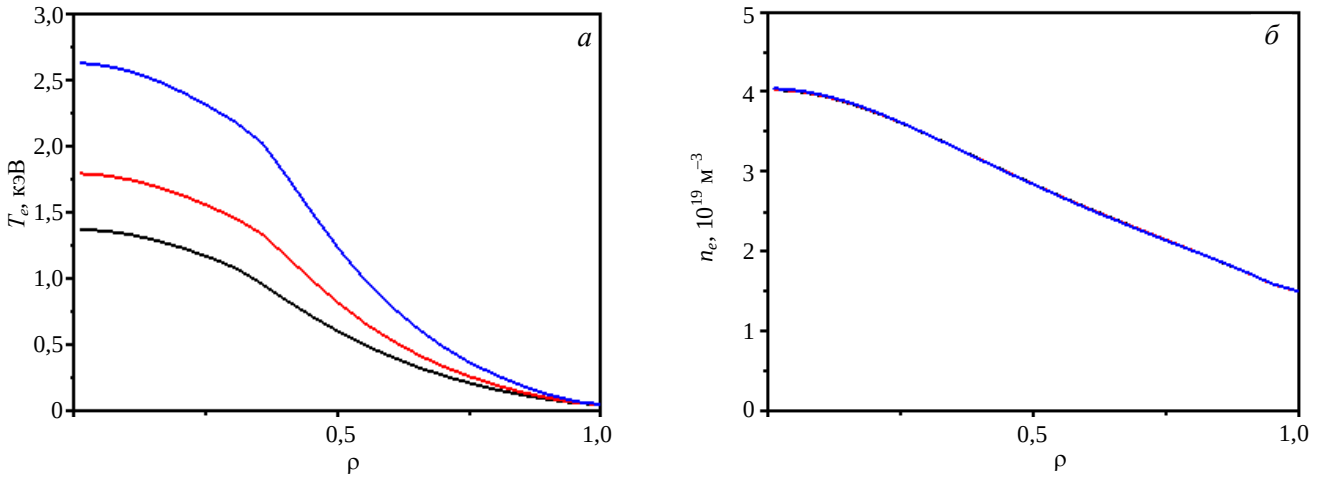

Рис. 11. Результаты расчётов А1—А3. Расчётные профили электронной температуры: — — ОН, — — ОН + 1 МВт (ρ ~ 0,3), — — ОН + 3 МВт (ρ ~ 0,3) (*а*) и плотности плазмы (*б*) для режимов Т-15МД с умеренной вытянутостью и треугольностью плазмы при магнитном поле B_T = 1,76 Тл в омическом режиме и при СВЧ-нагреве разной мощности, локализованном на ρ ~ 0,3

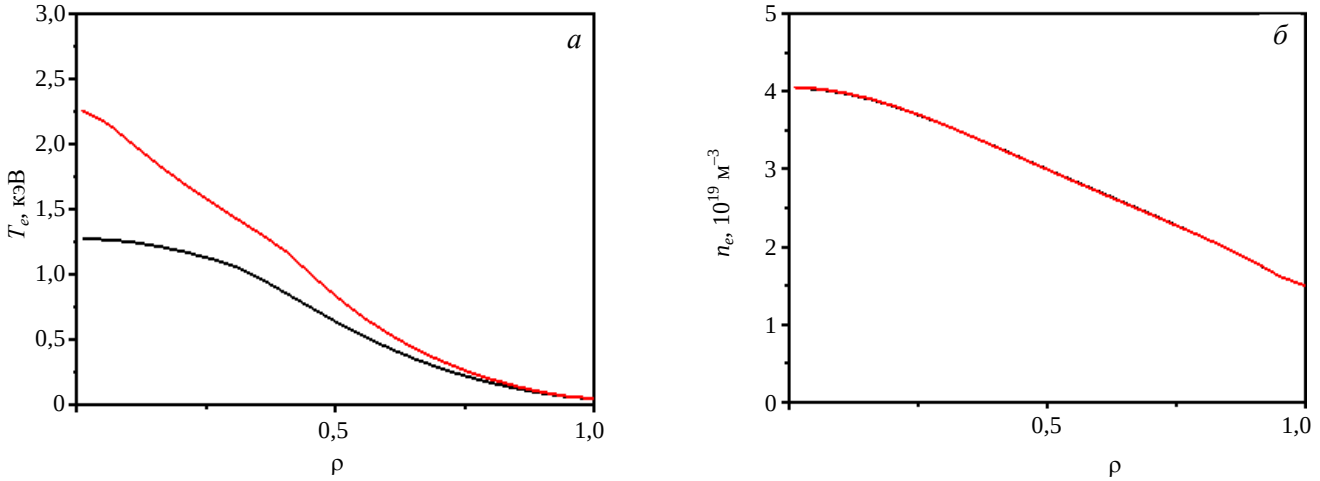

Рис. 12. Результаты расчётов А4—А5. Расчётные профили электронной температуры: — — ОН, — — ОН + 1 МВт (ρ = 0) (*а*) и плотности плазмы (*б*) для режимов Т-15МД с умеренной вытянутостью и треугольностью плазмы при магнитном поле B_T = 1,5 Тл в омическом режиме и при центральном СВЧ-нагреве мощностью 1 МВт

На рис. 13 приведены результаты расчётов по коду OGRAY для профилей температуры и плотности плазмы, полученных в расчёте А1. Из-за меньшей температуры плазмы, чем в рассмотренном случае, профиль поглощённой СВЧ-мощности оказывается более широким. При полоидальном угле ввода мощности 87° достигается наибольшая доля однопроходного поглощения $P_{ab}/P_{inj} \approx 97\%$.

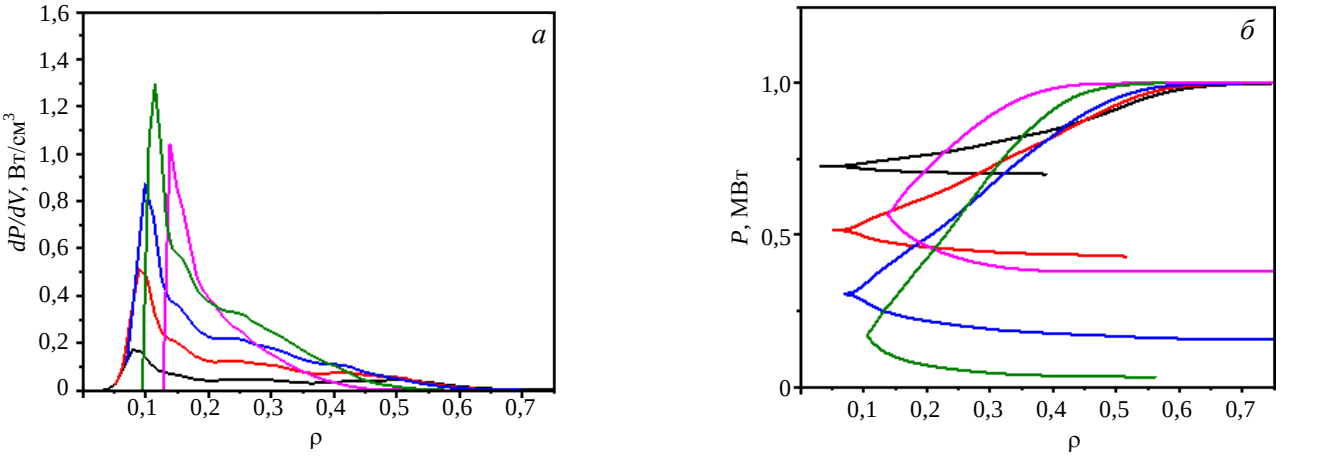

Рис. 13. Профили поглощённой СВЧ-мощности: φ_p = 85° (——), 85,5° (——), 86° (——), 87° (——), 88° (——) (*а*) и изменения мощности по лучу (*б*) для разных значений полоидального угла при вертикальном вводе мощности в режиме с умеренной вытянутостью и треугольностью плазмы. Исходный режим — омический (А1), B_T = 1,76 Тл

Увеличение температуры плазмы, как и следовало ожидать (см. рис. 1), приводит к улучшению поглощения мощности на третьей гармонике. Профиль вложенной мощности остаётся широким (рис. 14), однако расширяется диапазон полоидальных углов, при которых наблюдается доля однопроходного поглощения ~100% (рис. 15).

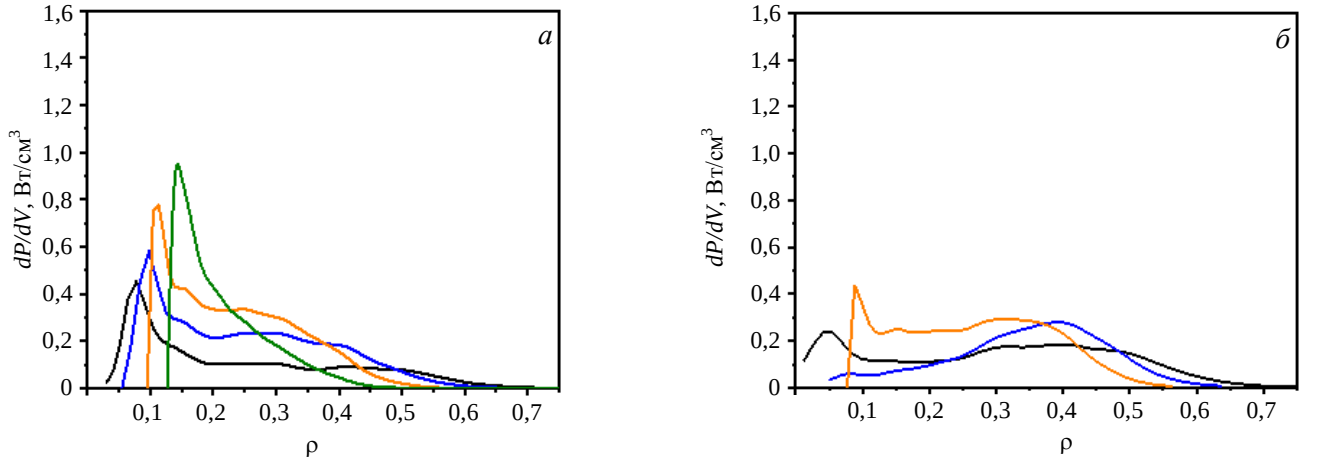

Рис. 14. Профили поглощённой СВЧ-мощности для разных значений полоидального угла в схеме 1 в режиме с умеренной вытянутостью и треугольностью плазмы: *а* — фоновый режим (дополнительный нагрев мощностью 1 МВт, профили из расчёта А2); *б* — фоновый режим (дополнительный нагрев мощностью 3 МВт, профили из расчёта А3), B_T = 1,76 Т, φ_p равно: — 85°, — 86°, — 87°, — 88°

При снижении тороидального магнитного поля до 1,5 Тл область циклотронного резонанса для ЭЦР-волны на третьей гармонике смещается на сторону сильного поля. При неизменном положении поворотного зеркала по R полоидальный угол ввода уменьшается. За счёт снижения длины пути волны вдоль резонансного слоя снижается доля однопроходного поглощения. На рис. 16, *а* показаны профили поглощённой мощности для различных значений полоидального угла. Наиболее центральный и узкий профиль вложенной мощности получается при значениях φ_p = 78° и 79°. Максимальная доля однопроходного поглощения достигается при φ_p = 79° и составляет 67% (рис. 16, *б*).

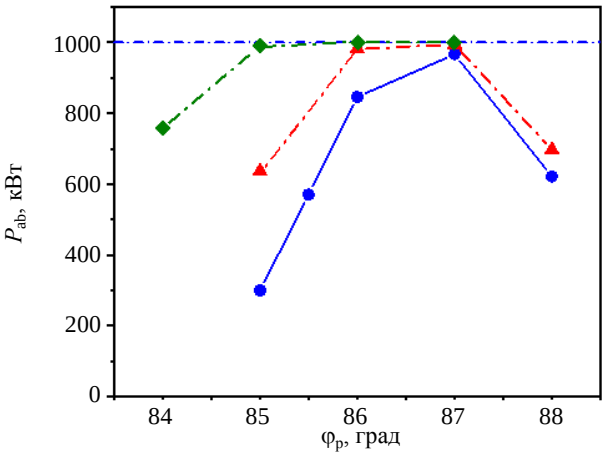

Рис. 15. Мощность, поглощённая за один проход, при нагреве плазмы на третьей гармонике ЭЦР в случае вклада мощности на различном фоне: — — ОН; — — ОН + 1 МВт; — — ОН + 3 МВт, B_T = 1,76 Тл

Дополнительный прогрев плазмы вследствие поглощения мощности на третьей гармонике будет

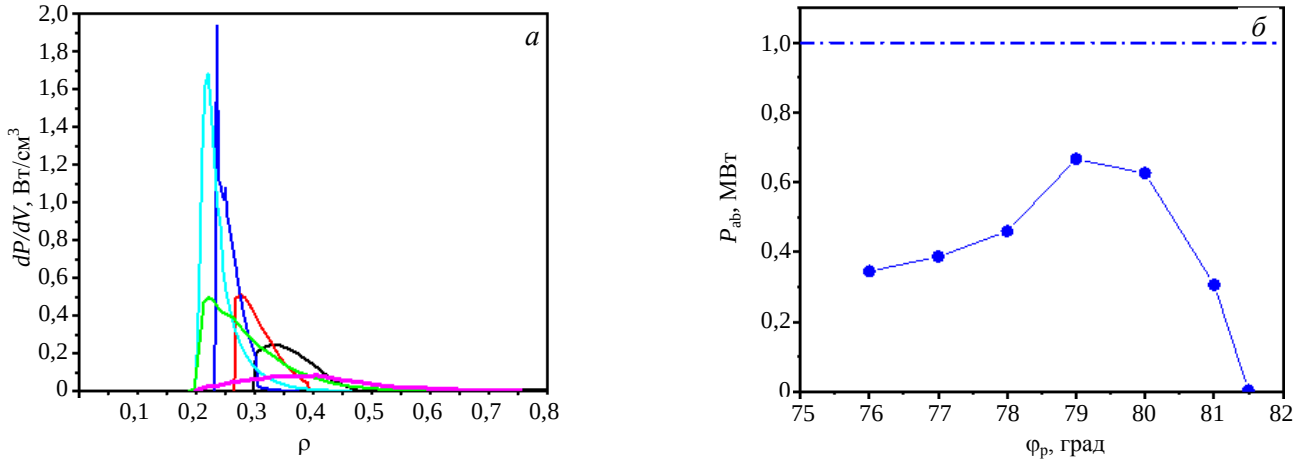

Рис. 16. Профили поглощённой мощности для разных значений полоидального угла в схеме 1 в режиме с умеренными значениями κ и δ. Фоновый режим — дополнительный нагрев мощностью 1 МВт, ρ_{dep} ~ 0 (профили из расчёта А5): φ_p = 76° (—), 77° (—), 78° (—), 79° (—), 80° (—), 81° (—) (*а*); зависимость величины поглощённой мощности от полоидального угла (*б*). B_T = 1,5 Тл

приводить к увеличению температуры плазмы, что повлечёт за собой увеличение доли однопроходного поглощения для волны на третьей гармонике ЭЦР. Также доля мощности, поглощённой за один проход, P_{ab} будет выше, если увеличить мощность фонового нагрева плазмы. Зависимость P_{ab} от величины центральной температуры плазмы показана на рис. 17, *а*.

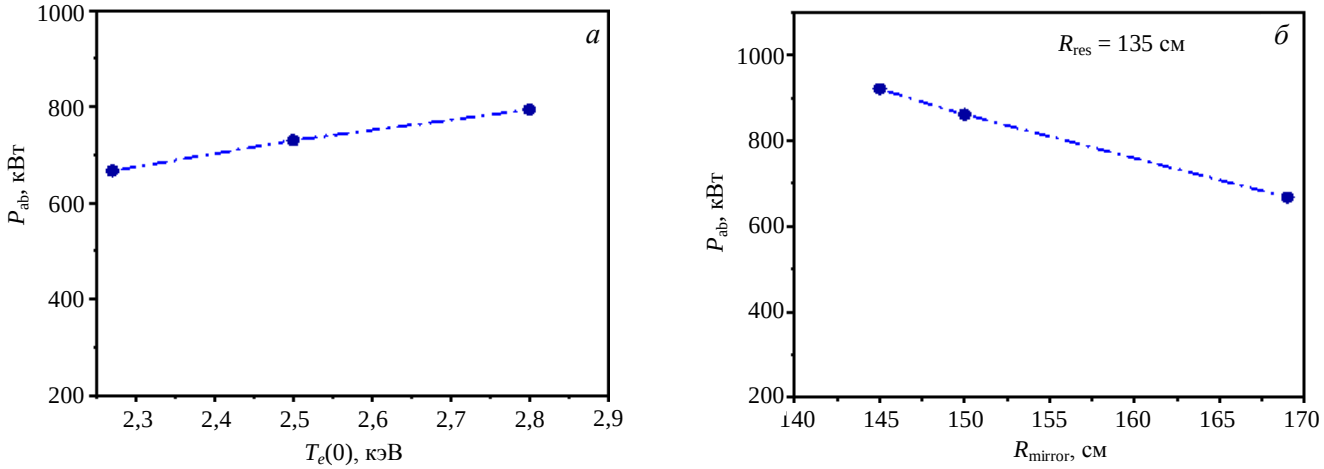

Рис. 17. Изменение величины поглощённой мощности: *а* — при изменении температуры плазмы; *б* — при изменении положения последнего зеркала по *R*. Фоновый режим (дополнительный нагрев мощностью 1 МВт, $\rho_{dep} \sim 0$), B_T = 1,5 Тл

Сильное влияние на величину поглощённой мощности оказывает положение последнего зеркала R_{mirror} относительно резонансного слоя R_{res} (рис. 17, *б*). Это означает, что при проектировании системы ввода мощности по вертикали желательно предусмотреть возможность перемещения последнего зеркала по *R*, как уже упоминалось.

ВОЗМОЖНОСТЬ НАГРЕВА НА ВТОРОЙ ГАРМОНИКЕ

Как видно на рис. 2, при высоких значениях магнитного поля (B_T > 1,4 Тл) внутри камеры установки появляется резонансный слой для ЭЦР-волны с частотой 140 ГГц на второй гармонике ЭЦЧ. При вводе волны со стороны слабого магнитного поля резонанс на второй гармонике всегда оказывается «закрыт» резонансом на третьей гармонике, т.е., распространяясь со стороны слабого магнитного поля, волна сначала проходит через резонансный слой для третьей гармоники, а далее мощность, не поглощённая в этом слое, распространяется до слоя поглощения на второй гармонике. При вводе мощности по вертикали это проявляется в меньшей степени, поскольку луч проходит через слой резонанса для Х3 в области низких температур. Для поля B_T = 1,76 Тл были сделаны расчёты поглощения необыкновенной волны на второй гармонике при вертикальной схеме ввода. Расчёты были сделаны для профилей температуры и плотности, показанных на рис. 4 и 11. Полоидальный угол ввода СВЧ-мощности был задан из условия пересечения слоя резонанса вблизи экваториальной плоскости φ_p = 69°. Результаты расчётов показаны на рис. 18. На рис. 18, *а* показаны профили поглощённой мощности.

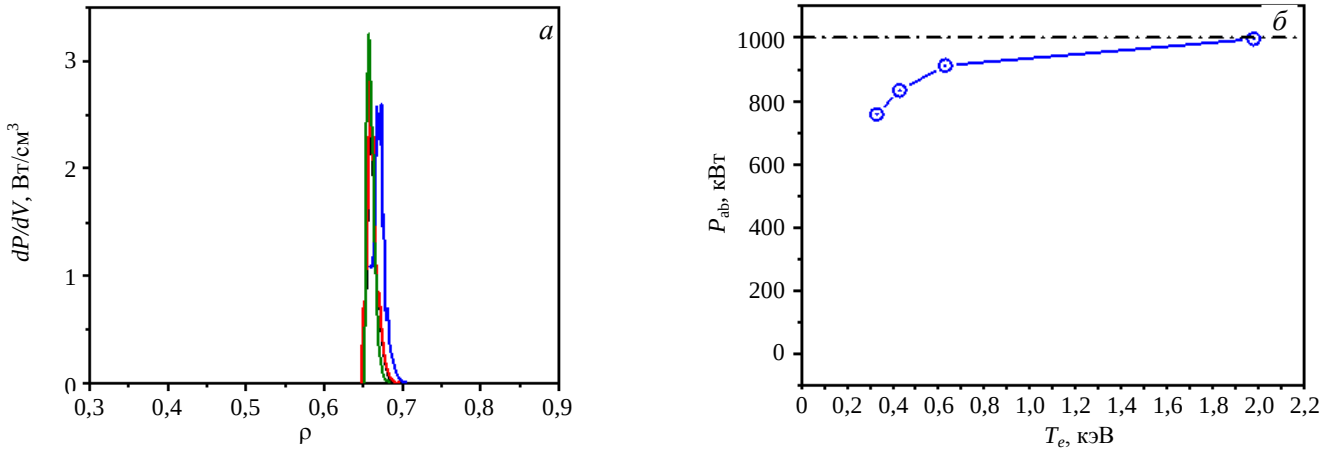

Рис. 18. Профили поглощённой мощности на второй гармонике ЭЦЧ для разных режимов при φ_p = 69° в схеме 1, режим А1 (——), А2 (——), А3 (——), из [4] (——) (*а*); зависимость величины поглощённой мощности от электронной температуры в области резонанса (*б*)

Доля поглощённой мощности за один проход луча показана на рис. 18, *б*. Вклад мощности ЭЦР-волны на второй гармонике оказывается достаточно узко локализованным. Доля поглощённой мощности превышает 75% даже при вкладе мощности на фоне омического нагрева. С ростом температуры плазмы поглощение мощности растёт, как и следовало ожидать, в соответствии с приведёнными оценками (см. рис. 1). Увеличение магнитного поля будет приводить к смещению области резонанса для волны X2 с частотой 140 ГГц к центру плазмы. При поле 2 Тл (максимальное проектное значение для Т-15МД) область холодного резонанса находится на $R = 120$ см, что соответствует $\rho \sim 0{,}5$. Таким образом, при высоком значении магнитного поля вертикальный ввод ЭЦ-мощности на частоте 140 ГГц может быть использован для нецентрального нагрева плазмы на второй гармонике ЭЦЧ.

ОБСУЖДЕНИЕ И ВЫВОДЫ

Приведённые в статье результаты расчётов, выполненных с помощью кода OGRAY, показали, что СВЧ-волну с частотой 140 ГГц можно использовать для нагрева плазмы токамака Т-15МД на третьей гармонике ЭЦЧ в режиме полномасштабных экспериментов, когда будет создаваться конфигурация плазмы с высокой вытянутостью и треугольностью, при высокой мощности дополнительного нагрева плазмы, т.е. в режимах с высокой электронной температурой. Наиболее перспективной кажется схема ввода мощности по вертикали.

Следует, однако, отметить, что в коде OGRAY используется модель распространения СВЧ-излучения, в которой поглощение мощности СВЧ-волны рассчитывается вдоль центрального луча гауссова пучка. Это приводит к тому, что не учитываются эффекты дифракции и рефракции, которые, как показано в [19, 20], могут влиять на поглощение в условиях, когда радиальный (по R) размер области ЭЦР-взаимодействия мал по сравнению с шириной пучка. Эти эффекты, по-видимому, не будут значительными для схем ввода СВЧ-мощности 2 и 3 (см. рис. 3, *а*), в которых реализуется «пересекающее распространение» (в терминах работы [20]). Для вертикального ввода (схемы 1 и 1') OGRAY может переоценивать эффективность поглощения мощности при полоидальных углах ввода $\varphi_p \geq 86^o$.

Тем не менее, даже с учётом этих ограничений, на основании выполненных расчётов можно ожидать высокого уровня однопроходного поглощения (более 80%) уже на ранней стадии работ на токамаке Т-15МД при умеренных значениях вытянутости и треугольности плазмы (для оценки рассмотрена конфигурация с $\kappa = 1{,}3$ и $\delta = 0{,}2$) при вертикальном вводе волны на третьей гармонике.

Возможность использования гиротронов с частотой 140 ГГц существенно расширяет диапазон операционных режимов Т-15МД по плотности, доступных для ЭЦР-нагрева. Кроме того, наличие двух мегаваттных гиротронов Т-10 позволяет получить дополнительную мощность комплекса СВЧ-нагрева на более ранних этапах работы установки (после некоторой модернизации гиротронов).

Если использовать гиротроны Т-10 на рабочей частоте 140 ГГц, то возникает вопрос об их модернизации на длинный импульс. В существующей конфигурации гиротроны способны работать по длительности импульса 200 мс, однако конструкция ламп позволяет их переделать под импульс до 10 с. Кажется логичным на первом этапе экспериментов по нагреву плазмы с использованием частоты 140 ГГц провести тестовые эксперименты и определить экспериментально величину поглощённой мощности для сопоставления её с предсказаниями теории. Для этого можно проложить от гиротрона к установке воздушную волноводную линию, что значительно упрощает подвод излучения к используемому фланцу токамака.

Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Российской Федерации.

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. **Khvostenko P.P.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2020, vol. 43, p. 7 (in Russian).
3. **Kirneva N.A., Kislov D.A., Roi I.N.** — VANT. Ser. Termoyadernyi sintez (Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion), 2020, vol. 43, issue 1, p. 64 (in Russian).

4. **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).
5. **Greenwald M. et al.** — Nucl. Fusion, 1988, vol. 28, p. 2199.
6. **Hogge J.P. et al.** — Nucl. Fusion, 2003, vol. 43, p. 1353.
7. **Alberti S., Genoud J., Goodman T. et al.** — EPJ Web of Conferences, 2017, vol. 157, p. 03001.
8. **Erckmann V., Gasparino U.** — Plasma Phys. Control. Fusion, 1869, vol. 36, p. 1869.
9. **Bornatici M.** — Plasma Phys., 1982, vol. 24, p. 629.
10. **Hohnle H. et al.** — Nuclear Fusion, 2011, vol. 51, p. 083013.
11. **Stober J. et al. —** Plasma Phys. Control. Fusion, 2020, vol. 62, p. 024012.
12. **Shimozuma T. et al. —** Nucl. Fusion, 2015, vol. 55, p. 063035.
13. **Kwak J.G. et al. —** Nucl. Fusion, 2013, vol. 53, p. 104005.
14. **Zvonkov A.V. et al.** — Plasma Phys. Rep., 1998, vol. 24, p. 389.
15. **Pereverzev G.V., Yushmanov P.N.** ASTRA — Automated System for Transport Analysis. IPP 5/98, February 2002.
16. **Dnestrovskij Yu.N. et al.** — Plasma Phys. Reports, 1997, vol. 23, p. 566.
17. **Esipchuk Yu.V. et al**. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2003, vol. 45, p. 793.
18. **Pochelon A. et al.** — Nuclear Fusion, 1999, vol. 39, p. 1807.
19. **Balakina M.A., Smolyakova O.B., Tokman M.D.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2003, vol. 29, p. 60 (in Russian).
20. **Balakin A.A., Balakina M.A., Shalashov A.G.** — Fizika plazmy (Plasma Physics), 2007, vol. 33, p. 729 (in Russian).

AUTHORS

Kirneva N.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; National Research Nuclear University MEPhI, Kashirskoye shosse 31, 115409 Moscow, Russia; Kirneva_NA@nrcki.ru

Borshchegovskii A.A. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Borschegovskiy_AA@nrcki.ru

Kuyanov A.Yu. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; a.kuyanov@gmail.com

Pimenov I.S. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; pimenowigor@mail.ru

Roi I.N. NRC “Kurchatov Institute”, pl. Akademika Kurchatova 1, 123182 Moscow, Russia; Roy_IN@nrcki.ru

Received 16 March 2021
Revised 14 July 2021
Accepted 20 July 2021
Problems of Atomic Science and Technology
Ser. Thermonuclear Fusion, 2021, vol. 44, issue 3, pp. 24—36