

04

Моделирование трехионного сценария ионно-циклотронного резонансного нагрева для токамака Глобус-М2

© П.А. Корепанов, Н.Н. Бахарев, Е.З. Гусаков, В.В. Дьяченко

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН,
194021 Санкт-Петербург, Россия
e-mail: P.Korepanov@mail.ioffe.ru

Поступило в Редакцию 27 декабря 2021 г.
В окончательной редакции 22 февраля 2022 г.
Принято к публикации 23 февраля 2022 г.

Нагрев плазмы электромагнитными волнами в ионно-циклотронном диапазоне частот является одним из самых проработанных и распространенных методов дополнительного нагрева в ловушках магнитного удержания высокотемпературной плазмы. Исследуется возможность использования трехионного сценария ионно-циклотронного резонансного нагрева на сферическом токамаке Глобус-М2. Приведены предполагаемый диапазон частот и соответствующее расположение циклотронных гармоник. С помощью 1D-кода рассчитаны профили поглощения электромагнитных волн в сечении токамака. Поскольку ожидается появление высокоэнергичных ионов в данном сценарии, сделаны оценка их энергии и удержания.

Ключевые слова: высокотемпературная плазма, токамак, Глобус-М, ионно-циклотронный нагрев, трехионный сценарий нагрева, H–D–³He-плазма.

DOI: 10.21883/JTF.2022.05.52374.327-21

Введение

Ионно-циклотронный резонансный (ИЦР) нагрев успешно применяется в традиционных токамаках с большим аспектным отношением. Основным сценарием нагрева в них является нагрев на малой добавке водорода в дейтериевой плазме [1–9]. С точки зрения использования ионно-циклотронного нагрева, в отдельную группу выделяются токамаки с малым аспектным отношением или сферические токамаки, наиболее крупными из которых являются такие установки, как NSTX-U [10,11], MAST-U [12,13], Глобус-М(2) [4,14–16], ST-40 [17,18], START [19]. Применение высокочастотных методов нагрева и поддержания тока в них имеет ряд ограничений, обусловленных свойствами сферических установок.

Слабое по сравнению с традиционными токамаками магнитное поле (0.4 Т для Глобус-М) приводит к тому, что частота ионно-циклотронного резонанса находится в области низких частот (5–15 МГц). Сильное изменение тороидального магнитного поля при переходе от внутренней до наружной стенки (в 4 раза для токамака Глобус-М) приводит к существенному сужению по сравнению с традиционными токамаками области поглощения, в которой выполнены условия циклотронного резонанса для ионов. Как следствие, имеет место слабое однопроходное затухание. С другой стороны, в сечении токамака попадает одновременно несколько циклотронных гармоник, что может приводить к „размазыванию“ энерговыделения по сечению токамака. Это различие иллюстрирует рис. 1.

Пионерские эксперименты по высокочастотному ИЦР нагреву на токамаке Глобус-М ($R = 0.36$ м, $a = 0.24$ м)

были проведены в 2000-х годах в режиме нагрева на малой добавке водорода в H–D-плазме. Было получено удвоение ионной температуры при уровне вводимой ВЧ-мощности $P = 200$ kW [4,21–23].

В 2018 году была завершена модернизация токамака Глобус-М. На новой установке тороидальная компонента магнитного поля может быть увеличена с 0.4 до 1 Т при сохранении той же геометрии и размеров плазменного шнура. Благодаря увеличению тороидального магнитного поля и тока плазмы был достигнут существенный рост параметров разряда, в частности, улучшено удержания быстрых ионов [14,24]. Последнее обстоятельство позволяет обсудить применение на токамаке Глобус-М2 трехионного сценария ионно-циклотронного нагрева высокотемпературной плазмы, широко обсуждаемого в последнее время [25–27]. Основная идея этого сценария состоит в совмещении условия отсечки для быстрой магнитозвуковой (БМЗ) волны с областью ионного циклотронного резонанса для малой по концентрации добавки третьего иона. Компонентный состав плазмы в этом случае должен удовлетворять условию [26]:

$$\min\left(\frac{Z_1}{A_1}, \frac{Z_2}{A_2}\right) < \frac{Z_3}{A_3} < \max\left(\frac{Z_1}{A_1}, \frac{Z_2}{A_2}\right), \quad (1)$$

где Z_1 , Z_2 , Z_3 — зарядовый номер составляющих компонент плазмы, A_1 , A_2 , A_3 — их атомная масса, индекс 3 относится к ионам малой добавки. Это необходимое условие гарантирует расположение циклотронной гармоники примеси между гармониками первой и второй компоненты. В наиболее простом случае водородно-дейтериевой плазмы условие (1)

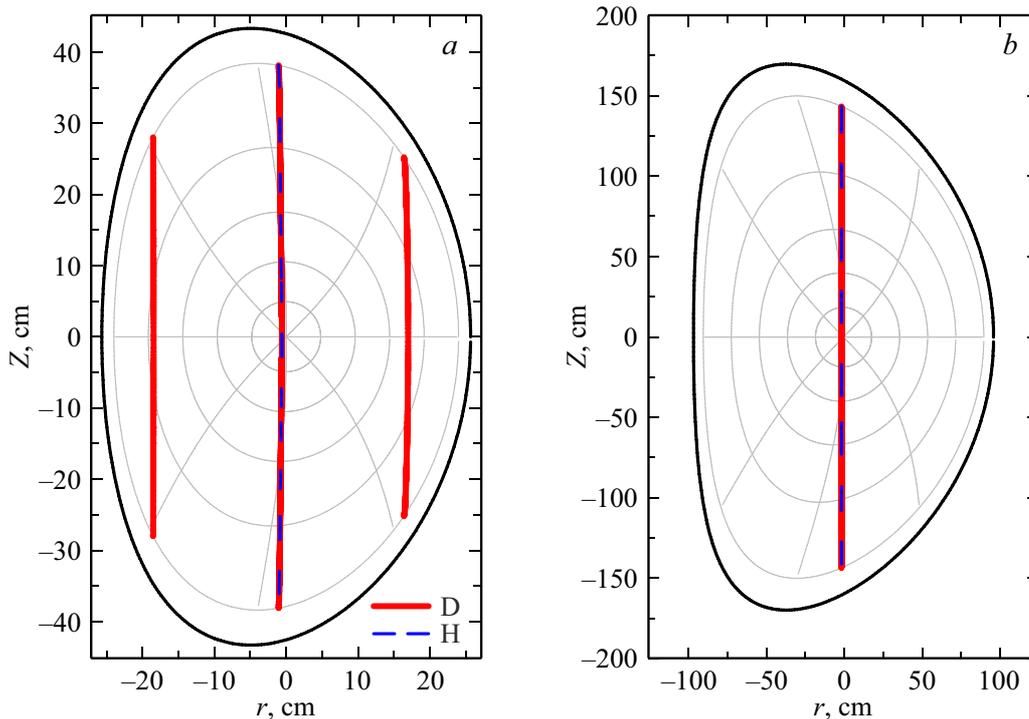


Рис. 1. Сравнение расположения циклотронных гармоник в сферическом токамаке (а) (Глобус-М2 для частоты 11 МГц и поля 0.7 Т) и традиционном токамаке (b) с большим аспектным отношением (использованы типовые параметры для JET [20], рисунок для частоты 49 МГц) для водородно-дейтериевой плазмы в режиме нагрева на малой добавке водорода. Сплошные линии (красные — в онлайн версии) — отмечены циклотронные гармоники дейтерия, пунктир (синие линии в онлайн версии) — циклотронная гармоника водорода.

принимает вид

$$0.5 < \frac{Z_3}{A_3} < 1.0,$$

которому в качестве малой третьей добавки могут удовлетворить только ионы ${}^3\text{He}$. Обычно в реализации трехионного сценария используется плазма H–D–(${}^3\text{He}$), где ${}^3\text{He}$ представляет собой малую добавку с концентрацией порядка 1%. Примеры другого компонентного состава плазмы можно найти в [25,26].

Характерной особенностью H–D–(${}^3\text{He}$) сценария является высокая удельная ВЧ мощность, приходящаяся на одну резонансную частицу ${}^3\text{He}$. Как следствие — ионы ${}^3\text{He}$ приобретают в этом сценарии высокие энергии, что позволяет моделировать удержание α -частиц, образующихся в результате термоядерной реакции дейтерия и трития, в реакторной плазме [26,27].

В настоящей работе исследуется возможность использования трехионного ИЦР сценария дополнительного нагрева плазмы на токамаке Глобус-М2. В разд. 1 сделан выбор рабочих частот и показаны результаты моделирования распространения и поглощения электромагнитных волн в плазме токамака. В разд. 2 приводятся оценки энергии генерируемых быстрых ионов и расчеты их удержания.

1. Моделирование распространения и поглощения быстрых магнитозвуковых волн в плазме токамака Глобус-М2

В двухкомпонентной H–D-плазме имеется область отсечки БМЗ волны (L-cutoff), соседствующая с ионным гибридным слоем, которые возникают при концентрациях водорода выше критического значения и располагаются между поверхностями, на которых выполнено условие ионного циклотронного резонанса для водорода и дейтерия. Они появляются со стороны сильного поля от циклотронной гармоники водорода и по мере увеличения концентрации водорода сдвигаются в сторону основной циклотронной гармоники дейтерия [1-3,26,28-30]. При добавлении в компонентный состав плазмы третьего сорта ионов в поперечном сечении плазмы сферического токамака выполняются условия, соответствующие гармоникам ионного циклотронного резонанса добавленной примеси. В трехкомпонентной плазме H–D–(${}^3\text{He}$) основная циклотронная гармоника ${}^3\text{He}$ вследствие соблюдения условия (1) располагается между первыми гармониками водорода и дейтерия.

Для реализации трехионного сценария необходимо подобрать соотношение концентраций водорода и дейтерия в H–D-плазме таким образом, чтобы совместить

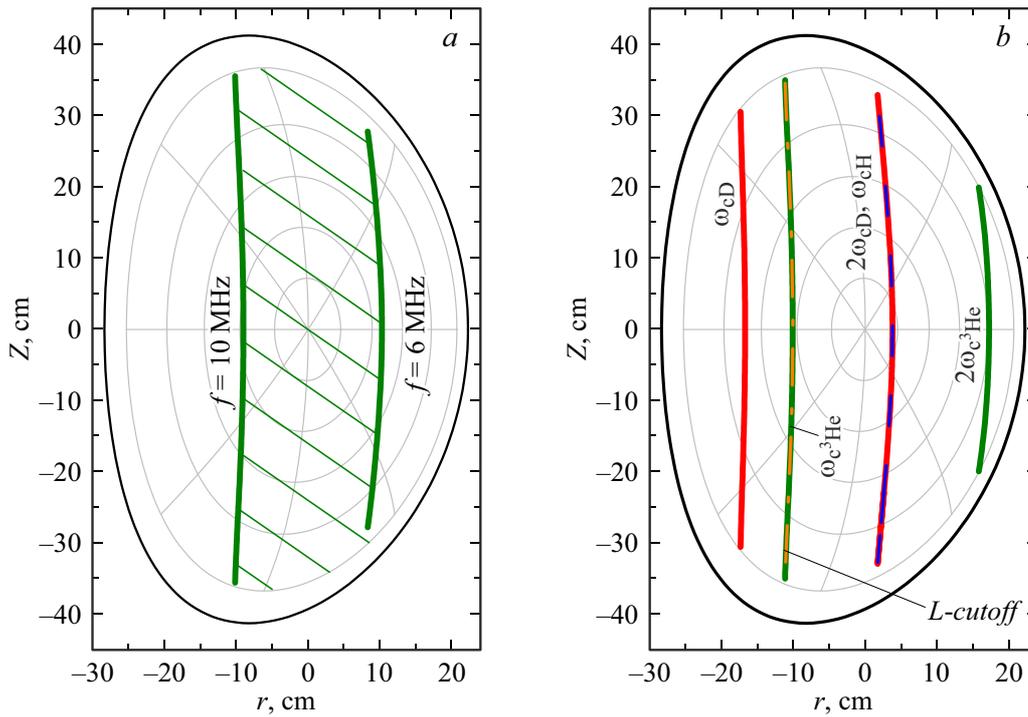


Рис. 2. *a* — доступная область в сечении токамака, в которой может быть размещен циклотронный слой ^3He ; *b* — появление второй гармоники ионов ^3He на частоте $f = 10\text{ MHz}$ со стороны слабого магнитного поля вблизи антенны, тороидальное магнитное поле на оси токамака $b_0 = 0.7\text{ T}$. Красным отмечены циклотронные гармоники дейтерия, синим (пунктир) — водорода, зеленым — гелия-3, оранжевым (штрих-пунктир) — область отсечки.

положение отсечки БМЗ волны для двухкомпонентной Н–D-плазмы с положением циклотронного резонанса ^3He [26]. В работе [26] это соотношение составило $\sim 67\% : 33\%$, однако эффективность поглощения, согласно моделированию, сохраняется в пределах изменения концентрации водорода от 65 до 72%. Оптимальную парциальную концентрацию водорода $X[\text{H}]$ можно найти следующим образом [26]:

$$X[\text{D}] = \frac{Z_3/A_3 - Z_2/A_2}{Z_1/A_1 - Z_2/A_2} - \frac{(Z_1/A_1 - Z_3/A_3)(Z_3/A_3 - Z_2/A_2)}{(Z_1/A_1 - Z_2/A_2)} \alpha,$$

$$X[\text{H}] = 1 - X[\text{D}],$$

где $\alpha = \left(\frac{\omega_{cH} n_{\parallel}}{\omega_{pH}}\right)^2$, $\omega_{pH} = \left(\frac{4\pi n_e e^2}{m_H}\right)^{0.5}$. В этой формуле второе слагаемое, пропорциональное квадрату отношения продольного показателя преломления БМЗ волны и альфвеновского показателя преломления в условиях экспериментов на токамаках, как правило, мало. С точностью до этой малой поправки оптимальная концентрация водорода определяется параметрами ионов водорода и дейтерия и не зависит от параметров, специфичных для установки. Малый параметр α составляет для Глобус-М2 величину 0.038 и вносит вклад в парциальную концентрацию водорода или дейтерия порядка 0.1%.

Положение ионно-циклотронных резонансов определяется величиной магнитного поля. Для Глобус-М2 основным рабочим полем является (0.7–0.8) Т в центре камеры. С другой стороны, положение резонансов (и области энерговыделения) должно быть оптимальным для нагрева и удержания введенной энергии: как правило, это центральные области плазменного шнура. Для оптимизации эксперимента важно также иметь возможность перестройки ВЧ генератора по частоте. Диапазон рабочих частот имеющегося ВЧ генератора составляет (5 – 15) MHz.

Область, в которой возможно расположение циклотронного слоя гелия-3 для условий установки Глобус-М2, изображена на рис. 2 и ограничивается доступным диапазоном частот.

При частоте $f = 10\text{ MHz}$ вблизи антенны со стороны слабого магнитного поля появляется вторая гармоника водорода, которая может экранировать центральные области плазмы, поглощая часть ВЧ мощности на периферии разряда.

Для моделирования поглощения электромагнитных волн в токамаке использовались базовые рабочие параметры разряда. Тороидальное магнитное поле на оси токамака $B_0 = 0.7\text{ T}$, электронная плотность в центре $n_{e0} = 0.5 \cdot 10^{20}\text{ m}^{-3}$, ток плазмы $I_{\text{plsm}} = 300\text{ kA}$, электронные и ионные температуры в центре $T_{e0} = 600\text{ eV}$, $T_{i0} = 300\text{ eV}$. Относительные доли ионов, составляющих

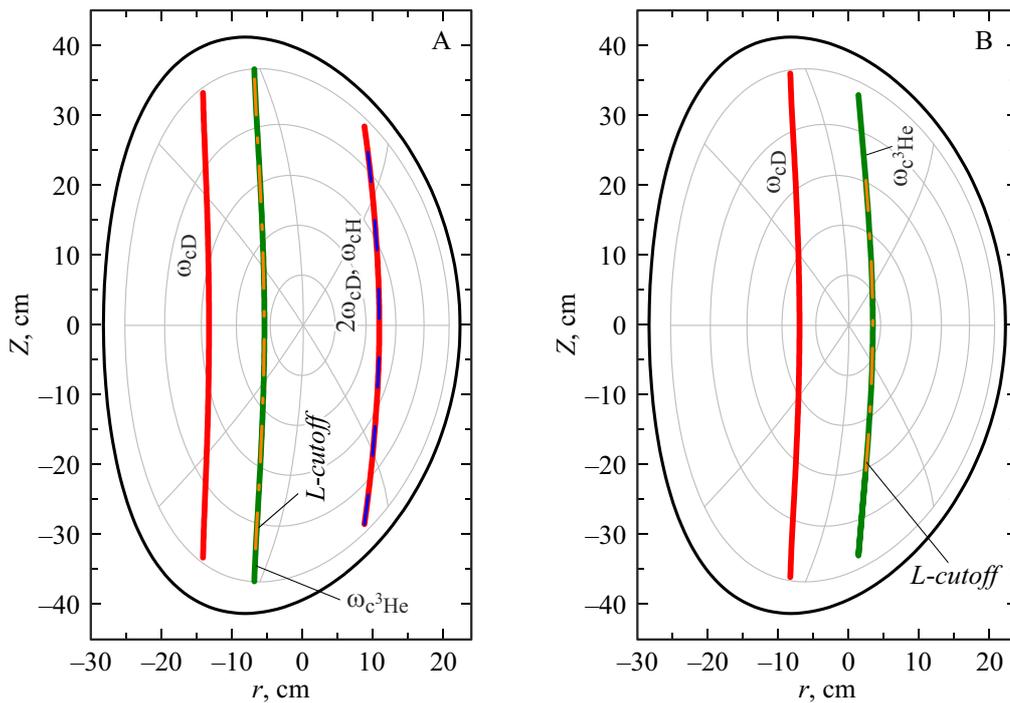


Рис. 3. Расположение циклотронных гармоник для вариантов А — 9 MHz и В — 7 MHz. Красным отмечены циклотронные гармоники дейтерия, синим (пунктир) — водорода, зеленым — гелия-3, оранжевым (штрих-пунктир) — область отсечки.

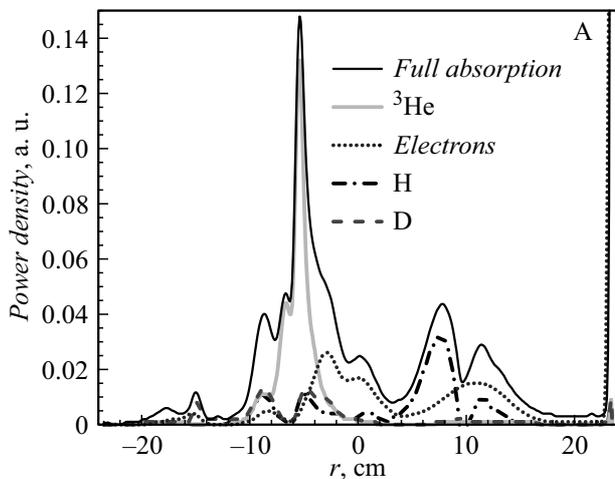


Рис. 4. Распределение поглощенной мощности в сечении токамака для варианта А.

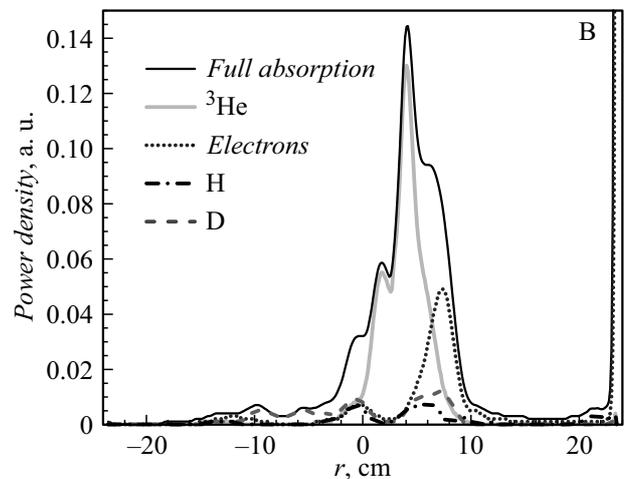


Рис. 5. Распределение поглощенной мощности в сечении токамака для варианта В.

плазму, $X[H] = 66\%$, $X[D] = 32\%$, $X[{}^3\text{He}] = 2\%$. Использовались профили концентрации и температуры, подобранные по экспериментальным данным на установке Глобус-М [31]. Расчеты проводились с помощью одномерного полноволнового кода, решающего уравнения Максвелла в замагниченной плазме, разработанного в ФТИ им. А.Ф. Иоффе [22], по аналогии с работами [30,32].

Моделирование проводилось для двух характерных расположений циклотронных гармоник (рис. 3), обозна-

ченных как А и В. В случае А частота 9 MHz выбрана так, чтобы в плазме токамака также присутствовала первая циклотронная гармоника водорода, область, в которой поглощается ВЧ энергия в классической схеме нагрева на малой добавке водорода. В полоидальном сечении, таким образом, находятся одновременно две циклотронные гармоники, на которых можно ожидать эффективного поглощения. В случае В выбор частоты генератора 7 MHz обуславливается тем, чтобы в полоидальном сечении оставалась только циклотронная

Распределение поглощаемой мощности по сортам частиц

Вариант	f , MHz	e^-	Ions	^3He	H	D
A	9	45%	55%	23%	22%	10%
B	7	35%	65%	48%	6%	11%

гармоники ^3He , расположенная как можно ближе к оси токамака.

На рис. 4 и 5 представлены результаты моделирования. Показано распределение поглощаемой мощности вдоль большого радиуса токамака. Циклотронная гармоника гелия-3 представляет собой в данных условиях наиболее эффективный канал поглощения ВЧ волн.

Как видно из таблицы, появление циклотронного резонанса водорода в сечении плазмы на частоте 9 MHz приводит к перераспределению части вкладываемой энергии в пользу ионов водорода.

2. Оценка энергии ионов гелий-3

Для оценки энергии ионов использовалась теоретическая модель, разработанная Стиксом [33], которая также хорошо описана в [1], опробована на такой установке, как PLT [1,34] и дает хорошие результаты, совпадающие с экспериментальными данными. Она позволяет получить функцию распределения частиц малой добавки в плазме (2)–(4):

$$\ln f(v) = -\frac{E}{(T_e(1+\xi))} \left[1 + \frac{R_f(T_e - T_f + \xi T_e)}{T_f(1+R_f+\xi)} H\left(\frac{E}{E_f}\right) \right], \quad (2)$$

$$\xi = \frac{m\langle P_{\perp} \rangle}{8\pi^{1/2} n_e n Z^2 e^4 \ln(\Lambda)} \left(\frac{2T_e}{m_e} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

$$R_f = \frac{n_f Z_f^2 l_f}{n_e l_e}, \quad E_f = \frac{m T_f}{m_f} \left[\frac{3\sqrt{\pi}}{4} \frac{(1+R_f+\xi)}{1+\xi} \right]^2,$$

$$l_f = \frac{1}{\sqrt{2} v_{T_f}}, \quad l_e = \frac{1}{\sqrt{2} v_{T_e}}, \quad E = \frac{mv^2}{2},$$

$$H(x) = \frac{1}{x} \int_0^x \frac{du}{1+u^{3/2}}. \quad (4)$$

Нижний индекс f обозначает принадлежность величины (T_f , n_f , m_f) к ионам фоновой плазмы; величины без индекса (n , m) относятся к пробным частицам, т.е. к ионам малой добавки (^3He). Параметр $\langle P_{\perp} \rangle$ — мощность, вложенная в единицу объема плазмы на магнитной поверхности в результате поглощения в циклотронном резонансе, λ — кулоновский логарифм, e — заряд электрона, Z — зарядовое число пробных частиц.

Основной параметр, описывающий воздействие электромагнитного поля — ξ , характеризует поглощаемую в циклотронном резонансе энергию, приходящуюся на

одну частицу. В данном случае эта величина (5) оценивалась, исходя из мощности, вложенной в объем толщиной Δr около магнитной поверхности малого радиуса r , тороидальное сечение которой показано на рис. 6, 7 (6). Коэффициент $k_{\%f}$ введен для того, чтобы учесть распределение вкладываемой мощности по компонентам плазмы, исходя из результатов моделирования (см. таблицу).

$$\langle P_{RF} \rangle = P_{input} \cdot k_{\%f} \Delta V, \quad (5)$$

$$\Delta V = \Delta S \cdot 2\pi R_0, \quad \Delta S = 2\pi r \Delta r. \quad (6)$$

На рис. 6 приведен расчет функции распределения для случая нагрева на малой добавке водорода при вложенной мощности 0.12 MW, соответствующий эксперименту, опубликованному в [4,21–23], где доля водорода $X[\text{H}]$ в компонентном составе плазмы менялась в диапазоне от 10 до 60%. Красными (горизонтальными) линиями отмечены значения функции распределения 0.01 и 0.08 и соответствующее им содержание частиц. Соответственно в части функции распределения с энергией менее 10 keV содержится приблизительно до 96% частиц, а с энергией менее 2 keV — до 71%.

Для анализа температуры и энергий ионов в работе [22] использовался прибор ACORD-12 [35]. Измерялся поток атомов водорода и дейтерия из плазмы токамака в диапазоне энергий от 0.5 до 5 keV. Для сравнения экспериментальных данных и расчета оценивалась эффективная температура „хвостовой“ части функции распределения. Оценка температуры „хвоста“ ионов водорода в разряде #11363 [22] с параметрами $n_e(0) = 3 \cdot 10^{19} \text{ m}^{-3}$, $C[\text{H}] = 20\%$, $P_{inp} = 0.12 \text{ MW}$, $f = 7.5 \text{ MHz}$ составила 1.13 keV, в то время как по данным анализатора для этого разряда температура „хвостовой“ части функции распределения — 980 eV.

Подобный анализ был также выполнен для трехионного сценария нагрева (рис. 7) с тем, чтобы оценить порядок ожидаемых энергий в случае его использования на установке Глобус-М2 и сопоставить с данными по удержанию частиц (рис. 9). Частицы ^3He тяжелее частиц водорода, вследствие чего функция распределения при той же входной мощности 300 kW оказывается сильнее прижата к горизонтальной оси (рис. 7).

На рис. 8 приведены графики, позволяющие оценить ожидаемый уровень энергии быстрых частиц, генерируемых вследствие циклотронного нагрева. В качестве ожидаемого уровня энергии используется величина, соответствующая содержанию, согласно функции распределения, 71% частиц до указанного уровня. По вертикальной оси, таким образом, отложен уровень энергии, при котором не менее 71% частиц имеют энергии меньше отложенной согласно (2).

На рис. 9 приведены результаты моделирования удержания частиц гелий-3 в токамаке Глобус-М2. Численно решалось уравнение движения заряженных частиц в магнитном поле, восстановленном с помощью кода EFIT. Координаты (R , Z) на рисунке обозначают точку „рождения“ иона, которая в данном случае совпадает с

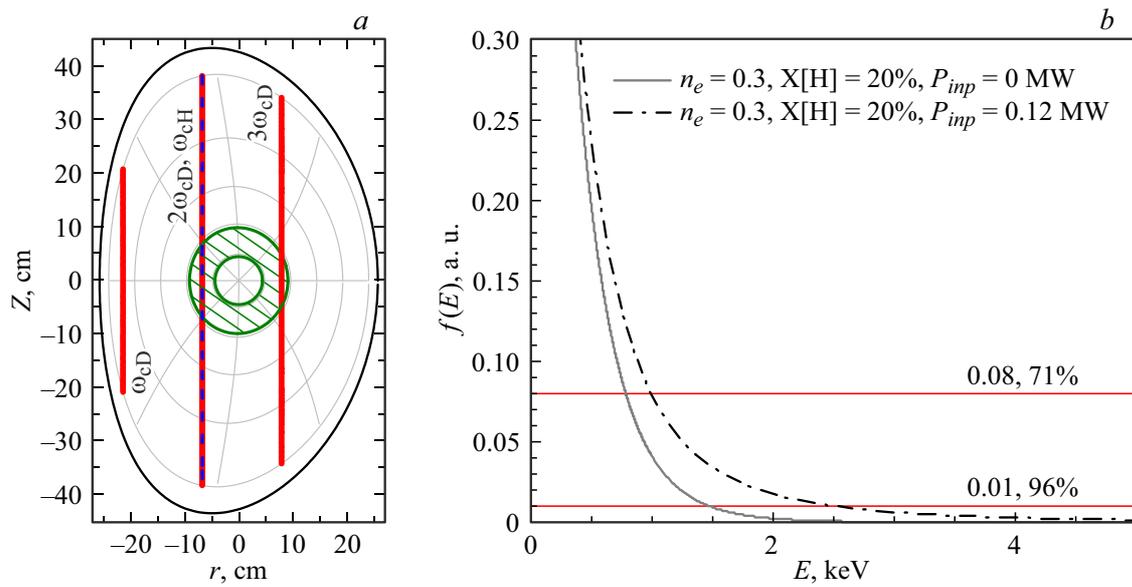


Рис. 6. *a* — расположение циклотронных гармоник в полоидальном сечении токамака Глобус-М для сценария нагрева с малой добавкой водорода, заштрихованная область — площадь ΔS (см. (6)); *b* — функция распределения ионов водорода, рассчитанная по модели (2) для приведенного случая: $X[\text{H}] = 20\%$, $n_e = 0.3 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $P_{\text{input}} = 0.12 \text{ MW}$. Горизонтальные линии отмечают уровни функции распределения 0.01 и 0.08, соответствующие 96 и 71% содержаниям частиц вплоть до отмеченного уровня.

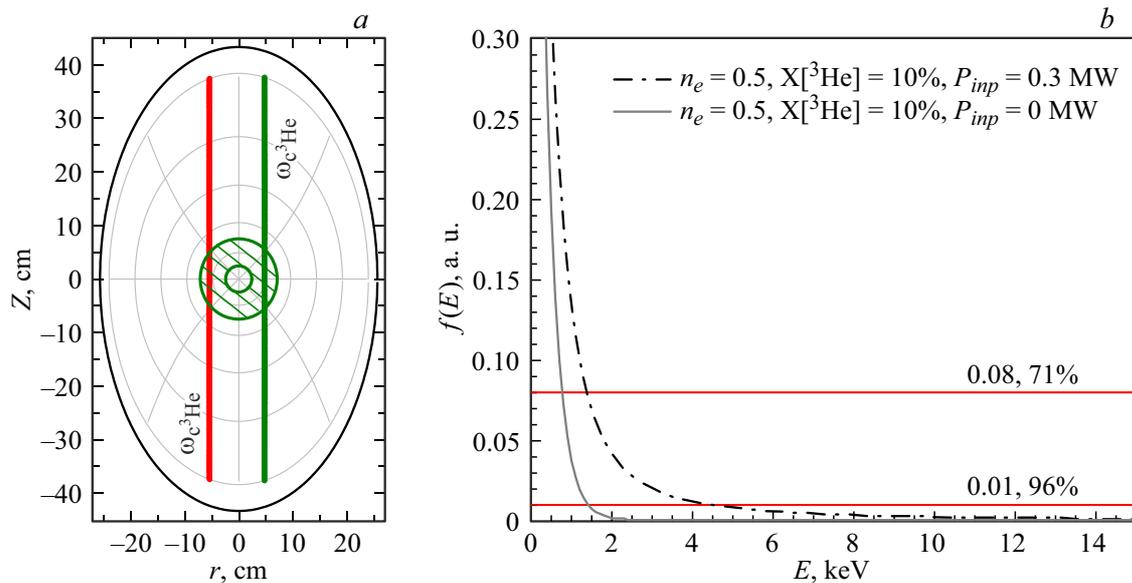


Рис. 7. *a* — расположение циклотронных гармоник в полоидальном сечении токамака Глобус-М2 для трехионного сценария нагрева, заштрихованная область соответствует площади ΔS (см. (6)); *b* — функция распределения ионов ^3He , рассчитанная по модели (2) для приведенного случая: $X[{}^3\text{He}] = 10\%$, $n_e = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$, $P_{\text{input}} = 0.3 \text{ MW}$. Горизонтальные линии отмечают уровни функции распределения 0.01 и 0.08, соответствующие 96 и 71% содержаниям частиц вплоть до отмеченного уровня.

точкой отражения на орбите иона, т.е. в начальном положении в точке (R, Z) ион имеет нулевую продольную скорость, а вся энергия считается содержащейся в поперечной составляющей скорости [24]. После чего моделируется движение частицы. Цветовая карта обозначает области, в которых ион с энергией, меньше указанной, удерживается, а с большей — теряется. Характерная

энергия, с которой ион еще может удерживаться в плазме, составляет 80 keV.

Чтобы сопоставить диапазон энергий удерживаемых ионов с ожидаемыми энергиями частиц ^3He , построены графики на рис. 10. По вертикальной оси откладывается доля частиц в процентах с энергиями менее 80 keV согласно функции распределения в зависимости от

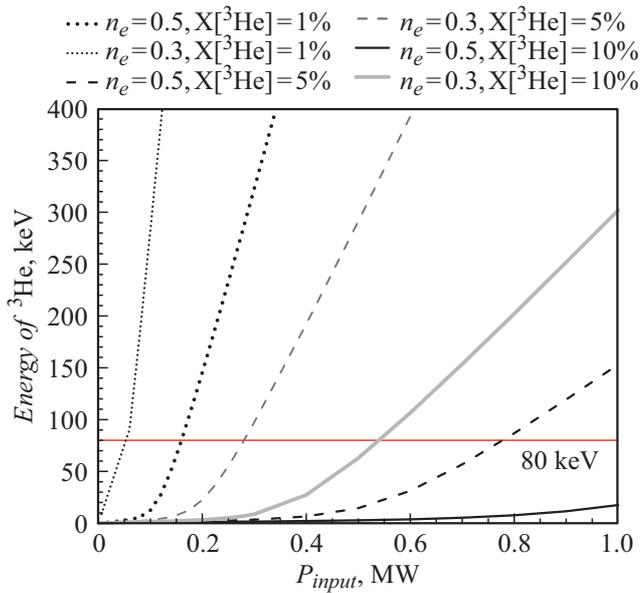


Рис. 8. Зависимость энергии ионов ${}^3\text{He}$ от вложенной мощности. По вертикальной оси отложен уровень энергии, при котором, согласно функции распределения частиц, не менее 71% частиц имеют энергии меньше отложенной. Графики приведены для электронных плотностей $n_e = 0.3 \cdot 10^{20}$ и $0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

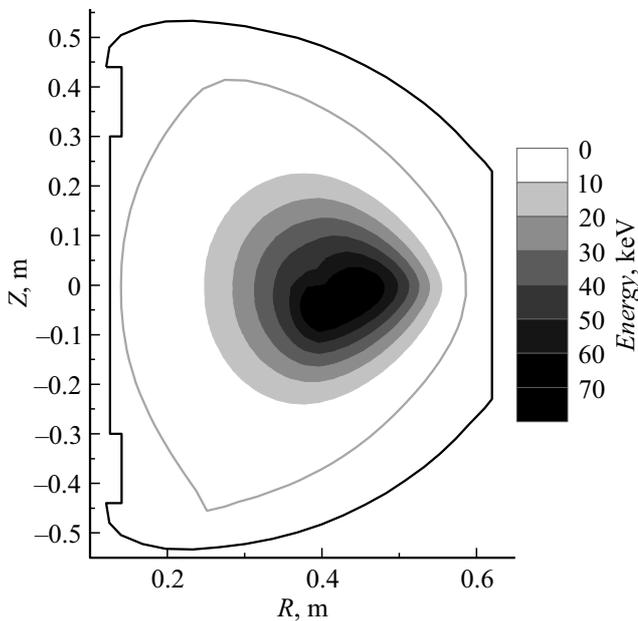


Рис. 9. Результаты моделирования удержания ионов гелий-3 в установке Глобус-М2 с магнитным полем $B_{tor} = 0.7 \text{ Т}$ и током плазмы $I_{plsm} = 300 \text{ кА}$ по разряду #37902. Максимальная энергия удерживаемых частиц составляет 80 кеВ .

вложенной мощности. Из приведенного графика видно, что при парциальных концентрациях ${}^3\text{He}$ порядка 1% и менее большая часть частиц приобретает энергию выше 80 кеВ и в Глобус-М2 не удерживается. При

электронной плотности $n_e = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ и доли ${}^3\text{He}$ порядка 1% при вложенной мощности, соответствующей предыдущему эксперименту [4], в $0.2\text{--}0.3 \text{ МВт}$ только от 35 до 50% частиц могут удерживаться в установке. А при увеличении мощности до 0.5 МВт или более эта доля падает ниже 20%.

Вследствие малых размеров установки и высокой плотности энергии, приходящейся на одну частицу при малых парциальных концентрациях ${}^3\text{He}$, частицы ${}^3\text{He}$ приобретают в основной своей массе высокие энергии более 80 кеВ и не удерживаются в плазме токамака. Даже наиболее оптимистичный вариант с электронной плотностью $n_e = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ при парциальных концентрациях в 1% дает лишь 35–50% удерживаемых частиц (рис. 10). Поэтому при таких малых $X[{}^3\text{He}]$, как 1%, которые необходимы для полноценного трехионного сценария Н–D–(${}^3\text{He}$), нельзя с гарантией ожидать выраженного эффекта нагрева.

При увеличении парциальных концентраций ${}^3\text{He}$ ситуация улучшается. Достаточно концентраций в 5% (рис. 10, $n_e = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$, $X[{}^3\text{He}] = 5\%$) для того, чтобы большая доля частиц попадала в удерживаемый диапазон энергий до 80 кеВ , хотя для предложенного трехионного сценария нагрева необходимы малые парциальные концентрации третьей компоненты (менее 1%), поскольку при увеличении $X[{}^3\text{He}]$ резонансная поляризация, приводящая к эффективному поглощению волны, падает. При нагреве на малой добавке водорода требования к парциальной концентрации водорода аналогичные: $X[\text{H}] \approx 0.1\%$, однако в экспериментах на сферическом токамаке Глобус-М [4] эффект нагрева сохранялся при парциальных концентрациях водорода от 10 до 60%. Это обстоятельство позволяет ожидать,

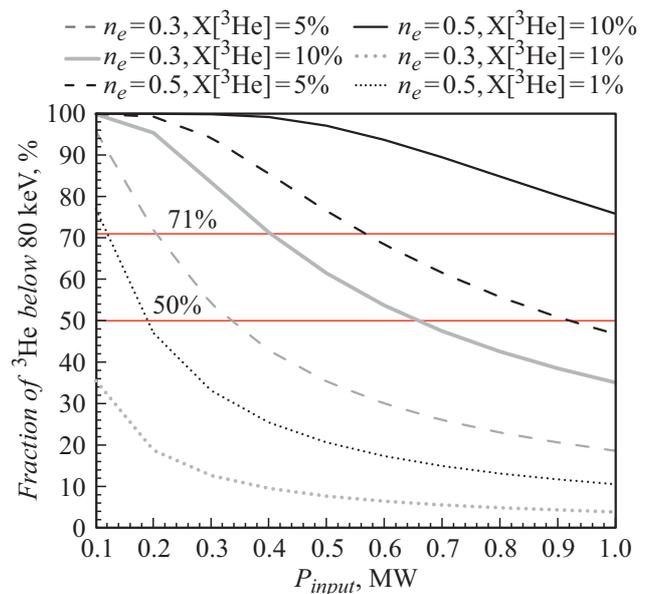


Рис. 10. Зависимость доли удерживаемых частиц (с энергией менее 80 кеВ) ${}^3\text{He}$ от вкладываемой мощности для электронных плотностей $n_e = 0.3 \cdot 10^{20}$ и $0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

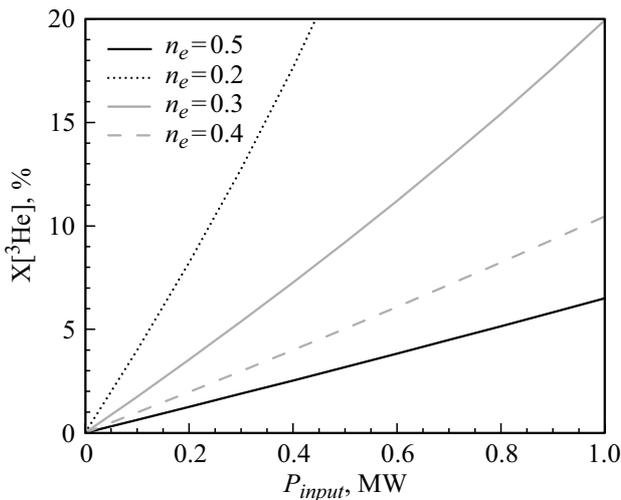


Рис. 11. Парциальная концентрации ${}^3\text{He}$, необходимая для того, чтобы доля ускоренных частиц с энергией менее 80 keV составляла 71% в зависимости от мощности накачки. Электронные плотности $n_e = (0.2 - 0.5) \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$.

что такой же эффект может иметь место и в случае $\text{H-D-}({}^3\text{He})$.

Для того чтобы более наглядно продемонстрировать, какие парциальные концентрации ${}^3\text{He}$ необходимы для эффективного удержания генерируемых быстрых ионов, приведены графики на рис. 11. По вертикальной оси откладывается доля ${}^3\text{He}$, при превышении которой в диапазоне удерживаемых энергий 0–80 keV, согласно (2), оказывается не менее 71% частиц. Как можно видеть, для этого при электронной концентрации $n_e = 0.5 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ для доступных на Глобус-М2 мощностей накачки, не превышающих 1 MW, $X[{}^3\text{He}]$ должна быть не менее 7%, а для мощности в 0.3 MW — не менее 2%.

Заключение

В результате исследования показано, что с точки зрения ИЦР нагрева в режимах с малой добавкой (водорода или гелия-3), для сферического токамака Глобус-М2 характерны большие значения параметра ξ (3), что эквивалентно высокой плотности поглощения ВЧ энергии. Данное обстоятельство может ограничивать возможность увеличения вкладываемой мощности, поскольку приводит к появлению плохо удерживаемых ионов высоких энергий. Например, для трехионного сценария уже при малой мощности в 200 kW и концентрациях ${}^3\text{He}$ в 1% большинство частиц приобретают энергию за пределами удерживаемого диапазона в 80 keV, характерного для Глобус-М2. Энергия частиц, ускоренных в ионном циклотронном резонансе, снижается с ростом их плотности, однако при этом может падать удельная мощность, поглощаемая в единице объема плазмы из-за уменьшения амплитуды поляризации БМЗ волны, вращающейся вместе с ионами ${}^3\text{He}$. Следует, однако,

отметить, что эксперименты по ВЧ нагреву на Глобус-М показывают, что при увеличении концентрации малой добавки водорода в сферическом токамаке эффективность нагрева может сохраняться и представлять собой, таким образом, способ решения указанной проблемы. Наличие подобного эффекта можно ожидать и для трехионного сценария. При относительных концентрациях ${}^3\text{He}$ приблизительно от 2 до 7% и высокой концентрации плазмы большая часть ускоренных частиц может удерживаться в токамаке при мощности накачки, доступной на Глобус-М2.

Благодарности

Исследования, представленные в разд. 1, выполнены в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0040-2019-0023, в то время как исследования, представленные в разд. 2, выполнены в рамках государственного задания ФТИ им. А.Ф. Иоффе 0034-2021-0002.

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

- [1] J. Wesson. *Tokamaks* (Clarendon press, Oxford, 2004)
- [2] J. Adam. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **29**, 443 (1987). DOI: 10.1088/0741-3335/29/4/001
- [3] V.E. Golant, V.I. Fedorov. *High-Frequency Methods for Plasma Heating in Toroidal Thermonuclear Devices* (Ehnergoatomizdat, M. (USSR), 1986)
- [4] В.К. Гусев, В.В. Дьяченко, Ф.В. Чернышев, Ю.В. Петров, Н.В. Сахаров, О.Н. Щербинин. *Письма в ЖТФ*, **30** (16), 58 (2004). [V.K. Gusev, V.V. D'yachenko, F.V. Chernyshev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, O.N. Shcherbinin, *Tech. Phys. Lett.*, **30**, 8, 690 (2004). DOI: 10.1134/1.1792315]
- [5] Yu. Yang, X. Zhang, Y. Zhao, Ch. Qin, Y. Cheng, Yu. Mao, H. Yang, J. Wang, Sh. Yuan, L. Wang, S. Ju, G. Chen, Xu Deng, K. Zhang, B. Wan, J. Li, Yu. Song, X. Gong, J. Qian, T. Zhang. *Plasma Sci. Tech.*, **20**, 045102 (2018). DOI: 10.1088/2058-6272/aaa599
- [6] M. Saigusa, H. Kimura, S. Moriyama, Y. Neyatani, T. Fujii, Y. Koide, T. Kondoh, M. Sato, M. Nemoto, Y. Kamada. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **37**, 295 (1995). DOI: 10.1088/0741-3335/37/3/009
- [7] V.P. Bhatnagar, J. Jacquinto, D.F.H. Start, B.J.D. Tubbing. *Nucl. Fusion*, **33**, 83 (1993). DOI: 10.1088/0029-5515/33/1/I08
- [8] A.M. Messiaen, D. Van Eester, R. Koch, J. Ongena, G. Van Wassenhove, R.R. Weynants, P. Borgermans, H. Conrads, P. Dumortier, F. Durodie, G. Fuchs, H. Euringer, B. Giesen, D. Hillis, F. Hoenen, H.R. Koslowski, A. Kramer-Flecken, M. Lochter, T. Oyevaar, H. Soltwisch, H.F. Tammen, G. Telesca, R. Uhlemann, L. Van Den Duerpel, P.E. Vandenplas, R. Van Nieuwenhove, G. Van Oost, M. Vervier, G. Waidmann. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **32**, A15 (1993). DOI: 10.1088/0741-3335/35/SA/002

- [9] K. Steinmetz, H. Niedermeyer, J.-M. Noterdaeme, F. Wagner, F. Wesner, J. Bäumlér, G. Becker, W. Becker, H.S. Bosch, M. Brambilla. *Nucl. Fusion*, **29**, 277 (1989). DOI: 10.1088/0029-5515/29/2/010
- [10] E.J. Synakowski, M.G. Bell, R.E. Bell, T. Bigelow, M. Bitter, W. Blanchard, J. Boedo, C. Bourdelle, C. Bush, D.S. Darrow, P.C. Efthimion, E.D. Fredrickson, D.A. Gates, M. Gilmore, L.R. Grisham, J.C. Hosea, D.W. Johnson, R. Kaita, S.M. Kaye, S. Kubota, H.W. Kugel, B.P. LeBlanc, K. Lee, R. Maingi, J. Manickam, R. Maqueda, E. Mazzucato, S.S. Medley, J. Menard, D. Mueller, B.A. Nelson, C. Neumeyer, M. Ono, F. Paoletti, H.K. Park, S.F. Paul, Y.-K.M. Peng, C.K. Phillips, S. Ramakrishnan, R. Raman, A.L. Roquemore, A. Rosenberg, P.M. Ryan, S.A. Sabbagh, C.H. Skinner, V. Soukhanovskii, T. Stevenson, D. Stutman, D.W. Swain, G. Taylor, A. Von Halle, J. Wilgen, M. Williams, J.R. Wilson, S.J. Zweben, R. Akers, R.E. Barry, P. Beiersdorfer, J.M. Bialek, B. Blagojevic, P.T. Bonoli, R. Budny, M.D. Carter, C.S. Chang, J. Chrzanowski, W. Davis, B. Deng, E.J. Doyle, L. Dudek, J. Egedal, R. Ellis, J.R. Ferron, M. Finkenthal, J. Foley, E. Fredd, A. Glasser, T. Gibney, R.J. Goldston, R. Harvey, R.E. Hatcher, R.J. Hawryluk, W. Heidbrink, K.W. Hill, W. Houlberg, T.R. Jarboe, S.C. Jardin, H. Ji, M. Kalish, J. Lawrance, L.L. Lao, K.C. Lee, F.M. Levinton, N.C. Luhmann, R. Majeski, R. Marsala, D. Mastravito, T.K. Mau, B. McCormack, M.M. Menon, O. Mitarai, M. Nagata, N. Nishino, M. Okabayashi, G. Oliaro, R. Pacella, R. Parsells, T. Peebles, B. Peneflor, D. Piglowski, R. Pinsker, G.D. Porter, A.K. Ram, M. Redi, M. Rensink, G. Rewoldt, J. Robinson, P. Roney, M. Schaffer, K. Shaing, S. Shiraiwa, P. Sichta, D. Stotler, B.C. Stratton, Y. Takase, X. Tang, R. Vero, W.R. Wampler, G.A. Wurden, X.Q. Xu, J.G. Yang, L. Zeng, W. Zhu. *Nucl. Fusion*, **43**, 1653 (2003). DOI: 10.1088/0029-5515/43/12/011
- [11] D.A. Gates, J. Ahn, J. Allain, R. Andre, R. Bastasz, M. Bell, R. Bell, E. Belova, J. Berkery, R. Betti, J. Bialek, T. Biewer, T. Bigelow, M. Bitter, J. Boedo, P. Bonoli, A. Boozer, D. Brennan, J. Breslau, D. Brower, C. Bush, J. Canik, G. Caravelli, M. Carter, J. Caughman, C. Chang, W. Choe, N. Crocker, D. Darrow, L. Delgado-Aparicio, S. Diem, D. D'Ippolito, C. Domier, W. Dorland, P. Efthimion, A. Ejiri, N. Ershov, T. Evans, E. Feibush, M. Fenstermacher, J. Ferron, M. Finkenthal, J. Foley, R. Frazin, E. Fredrickson, G. Fu, H. Funaba, S. Gerhardt, A. Glasser, N. Gorelenkov, L. Grisham, T. Hahm, R. Harvey, A. Hassanein, W. Heidbrink, K. Hill, J. Hillesheim, D. Hillis, Y. Hirooka, J. Hosea, B. Hu, D. Humphreys, T. Idehara, K. Indreshkumar, A. Ishida, F. Jaeger, T. Jarboe, S. Jardin, M. Jaworski, H. Ji, H. Jung, R. Kaita, J. Kallman, O. Katsuro-Hopkins, K. Kawahata, E. Kawamori, S. Kaye, C. Kessel, J. Kim, H. Kimura, E. Kolemen, S. Krasheninnikov, P. Krstic, S. Ku, S. Kubota, H. Kugel, R. La Haye, L. Lao, B. LeBlanc, W. Lee, K. Lee, J. Leuer, F. Levinton, Y. Liang, D. Liu, N. Luhmann Jr, R. Maingi, R. Majeski, J. Manickam, D. Mansfield, R. Maqueda, E. Mazzucato, D. McCune, B. McGeehan, G. McKee, S. Medley, J. Menard, M. Menon, H. Meyer, D. Mikkelsen, G. Miloshevsky, O. Mitarai, D. Mueller, S. Mueller, T. Munsat, J. Myra, Y. Nagayama, B. Nelson, X. Nguyen, N. Nishino, M. Nishiura, R. Nygren, M. Ono, T. Osborne, D. Pacella, H. Park, J. Park, S. Paul, W. Peebles, B. Penafior, M. Peng, C. Phillips, A. Pigarov, M. Podesta, J. Preinhaelter, A. Ram, R. Raman, D. Rasmussen, A. Redd, H. Reimerdes, G. Rewoldt, P. Ross, C. Rowley, E. Ruskov, D. Russell, D. Ruzic, P. Ryan, S. Sabbagh, M. Schaffer, E. Schuster, S. Scott, K. Shaing, P. Sharpe, V. Shevchenko, K. Shinohara, V. Sizyuk, C. Skinner, A. Smirnov, D. Smith, S. Smith, P. Snyder, W. Solomon, A. Sontag, V. Soukhanovskii, T. Stoltzfus-Dueck, D. Stotler, T. Strait, B. Stratton, D. Stutman, R. Takahashi, Y. Takase, N. Tamura, X. Tang, G. Taylor, C. Taylor, C. Ticos, K. Tritz, D. Tsarouhas, A. Turrunbull, G. Tynan, M. Ulrickson, M. Umansky, J. Urban, E. Uterberg, M. Walker, W. Wampler, J. Wang, W. Wang, A. Welandér, J. Whaley, R. White, J. Wilgen, R. Wilson, K. Wong, J. Wright, Z. Xia, X. Xu, D. Youchison, G. Yu, H. Yuh, L. Zakharov, D. Zemlyanov, S. Zweben. *Nucl. Fusion*, **49**, 104016 (2009). DOI: 10.1088/0029-5515/49/10/104016
- [12] H. Meyer, I.G. Abel, R.J. Akers, A. Allan, S.Y. Allan, L.C. Appel, O. Asunta, M. Barnes, N.C. Barratt, N. Ben Ayed, J.W. Bradley, J. Canik, P. Cahyna, M. Ceconello, C.D. Challis, I.T. Chapman, D. Ciric, G. Colyer, N.J. Conway, M. Cox, B.J. Crowley, S.C. Cowley, G. Cunningham, A. Danilov, A. Darke, M.F.M. De Bock, G. De Temmerman, R.O. Dendy, P. Denner, D. Dickinson, A.Y. Dnestrovsky, Y. Dnestrovsky, M.D. Driscoll, B. Dudson, D. Dunai, M. Dunstan, P. Dura, S. Elmore, A.R. Field, G. Fishpool, S. Freethy, W. Fundamenski, L. Garzotti, Y.C. Ghim, K.J. Gibson, M.P. Gryaznevich, J. Harrison, E. Havlíčková, N.C. Hawkes, W.W. Heidbrink, T.C. Hender, E. Highcock, D. Higgins, P. Hill, B. Hnat, M.J. Hole, J. Horek, D.F. Howell, K. Imada, O. Jones, E. Kaveeva, D. Keeling, A. Kirk, M. Kočan, R.J. Lake, M. Lehnen, H.J. Leggate, Y. Liang, M.K. Lilley, S.W. Lisgo, Y.Q. Liu, B. Lloyd, G.P. Maddison, J. Mailloux, R. Martin, G.J. McArdle, K.G. McClements, B. McMillan, C. Michael, F. Militello, P. Molchanov, S. Mordijck, T. Morgan, A.W. Morris, D.G. Muir, E. Nardon, V. Naulin, G. Naylor, A.H. Nielsen, M.R. O'Brien, T. O'Gorman, S. Pamela, F.I. Parra, A. Patel, S.D. Pinches, M.N. Price, C.M. Roach, J.R. Robinson, M. Romanelli, V. Rozhansky, S. Saarelma, S. Sangaroon, A. Saveliev, R. Scannell, J. Seidl, S.E. Sharapov, A.A. Schekochihin, V. Shevchenko, S. Shibaev, D. Stork, J. Storrs, A. Sykes, G.J. Tallents, P. Tamain, D. Taylor, D. Temple, N. Thomas-Davies, A. Thornton, M.R. Turnyanskiy, M. Valovič, R.G.L. Vann, E. Verwichte, P. Voskoboynikov, G. Voss, S.E.V. Warder, H.R. Wilson, I. Wodniak, S. Zoletnik, R. Zagórski and the MAST and NBI Teams. *Nucl. Fusion*, **53**, 104008 (2013). DOI: 10.1088/0029-5515/53/10/104008
- [13] B. Lloyd, R.J. Akers, F. Alladio, S. Allan, L.C. Appel, M. Barnes, N.C. Barratt, N. Ben Ayed, B.N. Breizman, M. Ceconello, C.D. Challis, I.T. Chapman, D. Ciric, G. Colyer, J.W. Connor, N.J. Conway, M. Cox, S.C. Cowley, G. Cunningham, A. Darke, M. De Bock, E. Delchambre, G. De Temmerman, R.O. Dendy, P. Denner, M.D. Driscoll, B. Dudson, D. Dunai, M. Dunstan, S. Elmore, A.R. Field, G. Fishpool, S. Freethy, L. Garzotti, K.J. Gibson, M.P. Gryaznevich, W. Guttenfelder, J. Harrison, R.J. Hastie, N.C. Hawkes, T.C. Hender, B. Hnat, D.F. Howell, M.-D. Hua, A. Hubbard, G. Huysmans, D. Keeling, Y.C. Kim, A. Kirk, Y. Liang, M.K. Lilley, M. Lisak, S. Lisgo, Y.Q. Liu, G.P. Maddison, R. Maingi, S.J. Manhood, R. Martin, G.J. McArdle, J. McCone, H. Meyer, C. Michael, S. Mordijck, T. Morgan, A.W. Morris, D.G. Muir, E. Nardon, G. Naylor, M.R. O'Brien, T. O'Gorman, J. Páleník, A. Patel, S.D. Pinches, M.N. Price, C.M. Roach, V. Rozhansky, S. Saarelma,

- S.A. Sabbagh, A. Saveliev, R. Scannell, S.E. Sharapov, V. Shevchenko, S. Shibaev, D. Stork, J. Storrs, W. Suttrop, A. Sykes, P. Tamain, D. Taylor, D. Temple, N. Thomas-Davies, A. Thornton, M.R. Turnyanskiy, M. Valovic, R.G.L. Vann, G. Voss, M.J. Walsh, S.E.V. Warder, H.R. Wilson, M. Windridge, M. Wisse, S. Zoletnik and the MAST and NBI teams. *Nucl. Fusion*, **51**, 094013 (2011). DOI: 10.1088/0029-5515/51/9/094013
- [14] V.B. Minaev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, Yu.V. Petrov, V.I. Varfolomeev, F.V. Chernyshev, N.N. Bakharev, V.V. Dyachenko, N.A. Khromov, G.S. Kurskiev, A.B. Mineev, V.A. Rozhansky, A.N. Saveliev, P.B. Shchegolev, I.V. Shikhovtsev. *EPJ Web Conf.*, **149**, 03001 (2017). DOI: 10.1051/epjconf/201714903001
- [15] N.N. Bakharev, G.I. Abdullina, V.I. Afanasyev, A.B. Altukhov, L.G. Askinazi, N.A. Babinov, A.N. Bazhenov, A.A. Belokurov, M.D. Blekhshtein, E.N. Bondarchuk, I.M. Bukreev, V.V. Bulanin, An.P. Chernakov, F.V. Chernyshev, I.N. Chugunov, A.M. Dmitriev, D.N. Doinikov, V.V. Dyachenko, L.A. Esipov, D.B. Gin, A.V. Gorbunov, A.D. Gurchenko, E.Z. Gusakov, V.K. Gusev, S. Heurax, M.V. Iliasova, M.A. Irzak, S.N. Kamenshikov, A.A. Kavin, E.M. Khilkevitch, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, T.P. Kiviniemi, A.A. Kobelev, V.A. Kornev, A.N. Koval, D.V. Kouprienko, S.V. Krikunov, O.L. Krutkin, G.S. Kurskiev, S.I. Lashkul, S.V. Lebedev, C. Lechte, S. Leerink, A.E. Litvinov, K.M. Lobanov, S.V. Masyukevich, A.A. Martynov, S.Yu. Medvedev, A.D. Melnik, V.B. Minaev, A.B. Mineev, M.I. Mironov, I.V. Miroshnikov, E.E. Mukhin, V.O. Naidenov, A.S. Navolotsky, V.G. Nesenevich, P. Niskala, A.N. Novokhatskii, K.Yu. Oshuev, M.I. Patrov, A.V. Petrov, M.P. Petrov, S.Ya. Petrov, Yu.V. Petrov, I.A. Polunovsky, A.Yu. Popov, A.G. Razdobarin, D.V. Razumenko, V.V. Rozhdestvensky, N.V. Sakharov, D.S. Samsonov, A.N. Saveliev, V.A. Senichenkov, P.B. Shchegolev, A.E. Shevelev, A.D. Sladkomedova, A.I. Smirnov, A.S. Smirnov, V.V. Solokha, V.A. Solovei, A.Yu. Stepanov, A.Yu. Telnova, V.A. Tokarev, S.Yu. Tolstyakov, P.V. Tretinnikov, I.B. Tereschenko, A.S. Tukachinsky, E.A. Tukhmenova, V.I. Varfolomeev, L.A. Varshavchick, A.Yu. Yashin, E.G. Zhilin, N.A. Zhubr. *Nucl. Fusion*, **59**, 112022 (2019). DOI: 10.1088/1741-4326/ab22dc
- [16] G.S. Kurskiev, N.N. Bakharev, V.V. Bulanin, F.V. Chernyshev, V.K. Gusev, N.A. Khromov, E.O. Kiselev, V.B. Minaev, I.V. Miroshnikov, E.E. Mukhin, M.I. Patrov, A.V. Petrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, P.B. Shchegolev, A.D. Sladkomedova, V.V. Solokha, A.Yu. Telnova, S.Yu. Tolstyakov, V.A. Tokarev, A.Yu. Yashin. *Nucl. Fusion*, **59**, 066032 (2019). DOI: 10.1088/1741-4326/ab15c5
- [17] M. Gryaznevich. Tokamak Energy team. *AIP Conf. Proc.*, **2179**, 020008 (2019). DOI: 10.1063/1.5135481
- [18] M. Gryaznevich, O. Asunta. Tokamak Energy Ltd Team. *Fusion Eng. Des.*, **123**, 177 (2017). DOI: 10.1016/j.fusengdes.2017.03.011
- [19] M. Gryaznevich, R. Akers, P.G. Carolan, N.J. Conway, D. Gates, A.R. Field, T.C. Hender, I. Jenkins, R. Martin, M.P.S. Nightingale, C. Ribeiro, D.C. Robinson, A. Sykes, M. Tournianski, M. Valovič, M.J. Walsh. *Phys. Rev. Lett.*, **80**, 3972 (1998). DOI: 10.1103/PhysRevLett.80.3972
- [20] Ye.O. Kazakov, D. Van Eester, R. Dumont, J. Ongena. *Nucl. Fusion*, **55**, 032001 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/3/032001
- [21] V.K. Gusev, F.V. Chernyshev, V.V. Dyachenko, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, V.L. Vdovin, O.N. Shcherbinin. *ICRH Experiments on the Spherical Tokamak Globus-M*. EX/5-6. Proceedings of the 20th IAEA Fusion Energy Conference, 1–6 November, 2004, Vilamoura, Portugal.
- [22] O.N. Shcherbinin, F.V. Chernyshev, V.V. Dyachenko, V.K. Gusev, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, V.M. Leonov. *Nucl. Fusion*, **46**, S592 (2006). DOI: 10.1088/0029-5515/46/8/S04
- [23] V.V. Dyachenko, B.B. Ayushin, V.K. Gusev, S.A. Khitrov, F.V. Chernyshev, M.I. Mironov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, O.N. Shcherbinin. *AIP Conf. Proceed.*, **1187**, 197 (2009). DOI: 10.1063/1.3273726
- [24] F.V. Chernyshev, B.B. Ayushin, V.K. Gusev, V.V. D'yachenko, V.B. Minaev, M.I. Mironov, M.P. Petrov, Yu.V. Petrov, N.V. Sakharov, S.A. Khitrov, O.N. Shcherbinin. *Plasma Phys. Rep.*, **35** (11), 903 (2009). DOI: 10.1134/S1063780X09110014
- [25] Ye.O. Kazakov, J. Ongena, J.C. Wright, S.J. Wukitch, V. Bobkov, J. Garcia, V.G. Kiptily, M. J. Mantsinen, M. Nocente, M. Schneider, H. Weisen, Y. Baranov, M. Baruzzo, R. Bilato, A. Chomiczewska, R. Coelho, T. Craciunescu, K. Crombé, M. Dreval, R. Dumont, P. Dumortier, F. Durodié, J. Eriksson, M. Fitzgerald, J. Galdon-Quiroga, D. Gallart, M. Garcia-Muñoz, L. Giacomelli, C. Giroud, J. Gonzalez-Martin, A. Hakola, P. Jacquet, T. Johnson, A.Kappatou, D.Keeling, D.King, K.K. Kirov, P. Lamalle, M. Lennholm, E. Lerche, M. Maslov, S. Mazzi, S. Menmuir, I. Monakhov, F. Nabais, M. F. F. Nave, R. Ochoukov, A. R. Polevoi, S. D. Pinches, U. Plank3, D. Rigamonti, M. Salewski, P. A. Schneider, S. E. Sharapov, Ž. Štancar, A. Thorman, D. Valcarcel5, D. Van Eester1, M. Van Schoor1, J. Varje, M. Weiland, N. Wendler, JET Contributors, ASDEX Upgrade Team, EUROfusion MST1 Team and Alcator C-Mod Team. *Phys. Plasmas*, **28**, 020501 (2021). DOI: 10.1063/5.0021818
- [26] Ye.O. Kazakov, D. Van Eester, R. Dumont, J. Ongena. *Nucl. Fusion*, **55**, 032001 (2015). DOI: 10.1088/0029-5515/55/3/032001
- [27] J.M. Faustin, J.P. Graves, W.A. Cooper, S. Lanthaler, L. Villard, D. Pfefferlé, J. Geiger, Ye O. Kazakov, D. Van Eester. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **59** (8), 084001 (2017). DOI: 10.1088/1361-6587/aa72a4
- [28] Ye.O. Kazakov, I.V. Pavlenko, D. Van Eester, B. Weysow, I.O. Girka. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **52**, 115006 (2010). DOI: 10.1088/0741-3335/52/11/115006
- [29] F.W. Perkins. *Nucl. Fusion*, **17**, 1197 (1977). DOI: 10.1088/0029-5515/17/6/008
- [30] M. Brambilla. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **31**, 723 (1989). DOI: 10.1088/0741-3335/31/5/004
- [31] G.S. Kurskiev, V.K. Gusev, N.V. Sakharov, N.N. Bakharev, A.D. Ibyaminova, P.B. Shchegolev, G.F. Avdeeva, E.O. Kiselev, V.B. Minaev, E.E. Mukhin, M.I. Patrov, Yu.V. Petrov, A.Yu. Telnova, S.Yu. Tolstyakov. *Plasma Phys. Control. Fusion*, **59**, 045010 (2017). DOI: 10.1088/1361-6587/aa5cd5
- [32] K. Appert, T. Hellsten, J. Vaclavik, L. Villard. *Comp. Phys. Commun.*, **40**, 73 (1986). DOI: 10.1016/0010-4655(86)90149-9

- [33] T.H. Stix. Nucl. Fusion, **15**, 737 (1975).
DOI: 10.1088/0029-5515/15/5/003
- [34] J. Hosea, S. Bernabei, P. Colestock, S.L. Davis, P. Efthimion, R.J. Goldston, D. Hwang, S.S. Medley, D. Mueller, J. Strachan, H. Thompson. Phys. Rev. Lett., **43** (24), 1802 (1979).
DOI: 10.1103/PhysRevLett.43.1802
- [35] А.Б. Извозчиков, М.П. Петров, С.Я. Петров, Ф.В. Чернышев, И.В. Шустов. ЖТФ, **62** (2), 157 (1992).
[A.B. Izvozchikov, M.P. Petrov, S.Ya. Petrov, F.V. Chernyshev, I.V. Shustov. Tech. Phys., **37** (2), 201 (1992).]