

УДК 533.9.0.1

АЛЬФВЕНОВСКИЕ МОДЫ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКОВ T-15МД И TRT С ОТРИЦАТЕЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ШИРОМ

© 2021 г. М. Ю. Исаев^{a, b, d, *}, В. М. Леонов^{a, d}, С. Ю. Медведев^{a, c, d}

^a Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

^b Московский физико-технический институт, Долгопрудный, Россия

^c Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН, Москва, Россия

^d Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”, “Проектный центр ИТЭР”, Москва, Россия

*e-mail: isaev_my@nrcki.ru

Поступила в редакцию 24.12.2020 г.

После доработки 02.04.2021 г.

Принята к публикации 02.06.2021 г.

Для токамаков T-15МД и TRT проводится анализ устойчивости собственных альфвеновских мод (АЕ) в плазме с отрицательным магнитным широм, возбуждаемых быстрыми частицами. Сценарии с отрицательным широм для T-15МД и для нового токамака TRT с магнитным полем до 8 Тл, полным током плазмы 4 МА, дополнительным инжекционным нагревом мощностью до 40 МВт рассчитаны с помощью кода ASTRA. Возбуждение альфвеновских мод в токамаках T-15МД и TRT возможно высокоэнергичными ионами нагревного пучка, а в дейтерий-тритиевой плазме TRT – термоядерными альфа-частицами. Пространственная структура и частоты различных АЕ с тороидальными номерами $n = 1-8$ вычислены с помощью кода идеальной МГД-устойчивости KINX. Затухание Ландау на ионах основной плазмы, инкременты линейного роста, нелинейная эволюция амплитуды мод, возбуждаемых быстрыми частицами, влияние на потери частиц рассчитаны с помощью кода VENUS. Немонотонный профиль запаса устойчивости, связанный с дополнительным ЭЦР-нагревом мощностью 13 МВт, открывает дополнительные возможности для возбуждения мод на нескольких магнитных поверхностях. Результаты численных расчетов альфвеновских мод в новом токамаке TRT сравниваются с результатами аналогичных по параметрам токамаков.

Ключевые слова: токамаки, моделирование, альфвеновские моды

DOI: 10.31857/S0367292121110184

1. ВВЕДЕНИЕ

Численные расчеты позволяют более точно предсказывать свойства альфвеновских собственных мод (Alfvén Eigenmodes, АЕ, АЕ-моды) в различных сценариях, действующих и строящихся токамаков без использования обычных для аналитики приближений и предположений.

Аналізу собственных альфвеновских мод в плазме токамаков с обращенным широм: RSAE (Reverse Shear Alfvén Eigenmode) и тороидальных альфвеновских мод TAE (Toroidal Alfvén Eigenmode), возбуждаемых ионами нагревного пучка, посвящена работа [1]. Результаты измерений частот и профилей возмущенных полей в разряде DIII-D #142111 сравнивались с результатами численных расчетов, выполненных с помощью кода NOVA-K. Основные свойства измеренных мод удалось подтвердить в численных расчетах. Обратная процедура сравнения дала другой резуль-

тат – из 21 моды, предсказанной в численных расчетах, в эксперименте удалось обнаружить лишь 10, что указывает на определенную разницу между численными предсказаниями и результатами измерений. Воздействия различных альфвеновских возмущений разной локализации с нормированной радиальной амплитудой до $\delta B_r/B_0 = 2 \times 10^{-4}$ на характер потерь частиц были измерены с помощью детектора потерь быстрых частиц FILD и подтверждены с помощью численных расчетов кода ORBIT. При смещении таких возмущений к центру плазмы потери частиц уменьшаются. Оценки, выполненные в [1] для квазистационарного сценария ИТЭР с отрицательным широм, показывают, что потери частиц в результате воздействия RSAE с амплитудой вплоть до $\delta B_r/B_0 = 10^{-2}$, расположенных на середине радиуса плазмы, являются малыми.

В работе [2] для других разрядов токамака DIII-D с обращенным широм выполнена новая проверка численных расчетов альфвеновских мод, возбуждаемых ионами нагревного пучка. Найдено хорошее совпадение свойств измеренных и рассчитанных ТАЕ с тороидальными номерами $n = 1, 2$ для разряда #166496. В разряде DIII-D#159243 экспериментально и численно обнаружены RSAE с номерами $n = 2-6$, расчеты проведены с помощью кодов NOVA-K и TGLFEP. Обсуждаются расхождения в численных оценках, полученных этими кодами для альфвеновских мод в токамаке CFETR (китайский термоядерный инженерный тестовый реактор) с отрицательным широм, большим радиусом 6.6 м, магнитным полем 6 Тл. Самая неустойчивая RSAE из рассмотренных мод с $n = 1-12$ для этого сценария имеет тороидальный номер $n = 5$ и частоту 36.4 кГц.

Большая работа по проверке кодов и увеличению точности их расчетов проводится в рамках международной группы ITPA-EP [3]. Надежный численный анализ и возможные погрешности расчетов альфвеновских неустойчивостей важны как для самого большого строящегося экспериментального токамака ИТЭР [4], так и для других токамаков различных размеров и назначений.

В нашей статье описываются возможные альфвеновские неустойчивости для сценариев с обращенным широм в двух новых токамаках – T-15MD и TRT.

В настоящее время в НИЦ “Курчатовский институт” построен и готовится к запуску новый токамак T-15MD [5] с магнитным полем 1.5 Тл и умеренным аспектным отношением. Исследовательские условия получения различных квазистационарных режимов для этого токамака проведено в работе [6] с помощью кода ASTRA. Анализ альфвеновских неустойчивостей для основного сценария токамака T-15MD с монотонным профилем запаса устойчивости и полным тороидальным током 2 МА выполнен в [7]. В частности, были определены свойства основных неустойчивых тороидальных альфвеновских собственных мод (ТАЕ) с тороидальными номерами $n = 2-8$, вычислены нормированные на частоту инкременты роста мод и уровни насыщения амплитуд. Альфвеновские неустойчивости, возбуждаемые ионами нагревного пучка в основном сценарии токамака T-15MD с монотонным профилем запаса устойчивости, по предварительным численным оценкам, не приводят к значительному нарушению осесимметричной магнитной конфигурации и к увеличению потерь частиц. Данный вывод был подтвержден в экспериментах на токамаках DIII-D и NCSX с аналогичными токамаку T-15MD параметрами плазмы [8].

В статье [6] также рассмотрен другой сценарий разряда токамака T-15MD – с обращенным широм и полным тороидальным током 1 МА на квазистационарной стадии. В этом сценарии использованы три метода нагрева плазмы – мощностью 6 МВт от нейтральной инжекции пучков (НИ), 5 МВт от электронно-циклотронного (ЭЦР) и 7 МВт от высокочастотного нагрева (ВЧ). В результате действия такого неоднородного по радиусу нагрева профили тока и запаса устойчивости становятся немонотонными. Условие резонансного взаимодействия альфвеновских мод с ионами нагревного пучка выполнено на нескольких радиусах плазмы, что может привести к образованию возмущений в различных зонах плазмы, к увеличению инкремента роста моды и к увеличению уровня амплитуды альфвеновских неустойчивостей. Численный анализ альфвеновских неустойчивостей для сценария T-15MD с обращенным широм проводится во втором разделе данной статьи с помощью кодов ASTRA, KINX и VENUS.

В третьем разделе нашей статьи описываются альфвеновские моды для нового токамака TRT. Новый токамак с реакторными технологиями (TRT) с большим радиусом 2.15 м является следующей ступенью на пути к термоядерному реактору, которому посвящен ряд статей данного специального выпуска журнала. В разделе рассматриваются два варианта: TRT7T, с магнитным полем на оси 7 Тл и инжекционным нагревом мощностью до 30 МВт; TRT8T, с магнитным полем на оси 8 Тл и нагревом НИ мощностью до 21.9 МВт. По аналогии с описанными выше сценариями T-15-MD, DIII-D, CFETR с обращенным широм и нагревным пучком, в данных сценариях токамака TRT также возможно существование широких альфвеновских мод с рядом максимумов. Рассматривается возможность роста амплитуды собственных альфвеновских мод как в результате влияния ионов нагревного пучка, так и в результате действия фракции термоядерных альфа-частиц, возникающих в дейтерий-третиевой плазме.

В заключение суммируются основные результаты расчетов линейного роста и нелинейного насыщения АЕ для сценариев новых токамаков T-15MD и TRT с обращенным широм, выполненных впервые с помощью кодов KINX и VENUS.

2. АЛЬФВЕНОВСКИЕ МОДЫ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА T-15MD С ОБРАЩЕННЫМ ШИРОМ

В сценарии токамака T-15MD с обращенным широм [6] и полным током плазмы 1 МА предусматривается комбинированный нагрев нейтральным пучком мощностью 6 МВт, электронно-циклотронным нагревом (ЭЦР) мощностью 5

МВт и высокочастотным нагревом (ВЧ) мощностью 7 МВт. Тороидальное поле на оси плазмы равно $B_0 = 1.5$ Тл, большой радиус тора $R = 1.48$ м, малый радиус плазмы $a = 0.57$ м, вытянутость сечения $k = 1.8$. Рассчитанные с помощью кода ASTRA профили электронной плотности, температуры, плотности быстрых частиц нагревного пучка и фактора запаса устойчивости q в зависимости от корня нормированного полоидального потока $\rho = (\psi)^{1/2}$ показаны на рис. 1, основные параметры данного сценария Т-15МД и двух сценариев токамака TRT с полем 7 и 8 Тл приведены в сравнительной табл. 1.

Равновесие токамака Т-15МД с профилями давления и вращательного преобразования, заданными кодом ASTRA, вычисляется с помощью двумерного кода равновесия SAHE. Переход к Бузеровским координатам с выпрямленными магнитными силовыми линиями проводится с помощью трехмерных кодов равновесия и устойчивости VMES и TERPSICHORE. Магнитная конфигурация в Бузеровских координатах используется для расчетов дрейфовых траекторий движения заряженных частиц и нелинейной эволюции амплитуды альфвеновских мод с помощью кода VENUS с использованием метода δf , инкремент вычисляется из обмена энергией частиц и моды. Используется так называемая гибридная (не самосогласованная) модель взаимодействия мод и быстрых частиц: фиксированная пространственная структура и частота вычисляется с помощью идеального МГД кода KINX без

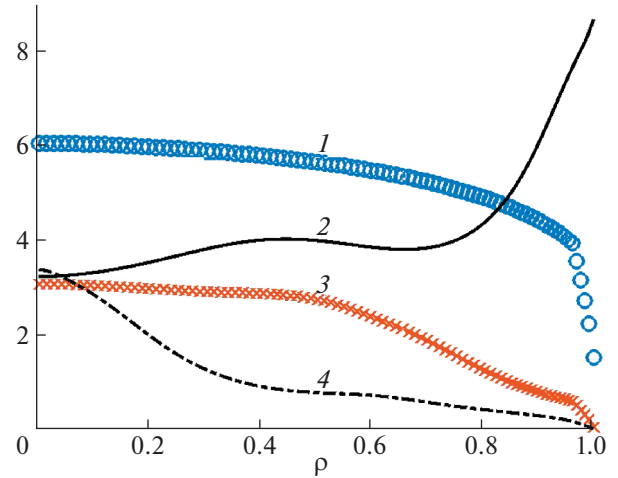


Рис. 1. Зависимость электронной плотности плазмы n_e (10^{19} м^{-3} , кривая 1), фактора запаса устойчивости q (кривая 2), электронной температуры T_e , кэВ (кривая 3), плотности ионов нагревного пучка $10n_b$, 10^{19} м^{-3} (кривая 4) для сценария Т-15МД с током 1 МА от корня нормированного полоидального потока, рассчитанная с помощью кода ASTRA.

затухания на континууме, для амплитуды моды используется уравнение с учетом динамики быстрых частиц, которая моделируется вдоль дрейфовых траекторий в коде VENUS. Более подробное описание уравнений, вычислительной схемы и необходимые ссылки даны в работе [7].

Таблица 1. Основные параметры сценариев с обращенным широм токамаков Т-15МД и TRT

	Т-15МД с обращенным широм	TRT7Т	TRT8Т
R , м	1.5	2.15	2.15
a , м	0.57	0.57	0.57
Вытянутость k	1.8	1.8	1.8
Треугольность δ	0.4	0.4	0.4
B_0 , Тл	1.5	7.0	8.0
I , МА	1.0	4.0	4.0
Плотность электронов n_{e0} , м^{-3}	6×10^{19}	23.4×10^{19}	9.44×10^{19}
n_{b0} , м^{-3}	0.33×10^{19}	0.72×10^{19}	1.45×10^{19}
Атомная масса плазмы A	1	2.5	2.5
P (NBI), МВт	6.0	30.0	21.9
E_b , МэВ	0.06	0.5	0.5
Атомная масса ионов пучка A_b	1	2	2
n_{α} , м^{-3}	—	1.11×10^{19}	0.11×10^{19}
T_{i0} , кэВ	2.6	11.7	21
V_b , м/с	3.4×10^6	6.9×10^6	6.9×10^6
V_A , м/с	4.5×10^6	6.4×10^6	1.1×10^7

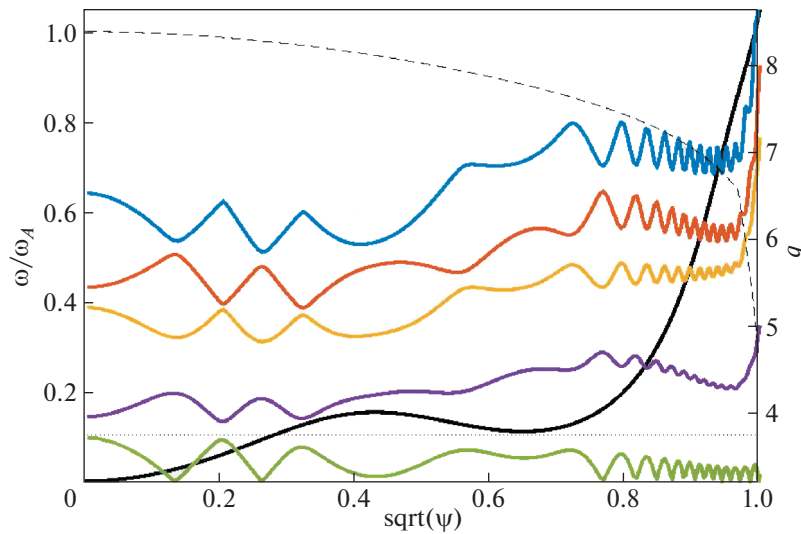


Рис. 2. Структура непрерывного спектра АЕ с тороидальным номером $n = 3$ в плазме токамака Т-15МД с током 1 МА, рассчитанная с помощью кода KINX. Зона между фиолетовой и светло-зеленой линиями показывает расположение АЕ в континууме ω/ω_A в зависимости от радиальной координаты – корня из нормированного полоидального потока. Сплошной черной линией показан профиль запаса устойчивости q , штриховой линией показан профиль нормированной плотности плазмы, пунктирной показана нормированная частота $\omega/\omega_A = 0.10452$.

В базовом сценарии токамака Т-15МД с током 2 МА и инжекционным нагревом равновесие имеет монотонный профиль с центральным $q = 1.5$ и типичные парные тороидальные альфвеновские моды с одним пространственным максимумом. В других равновесиях (например, подобный сценарию ИТЭР с током 9 МА) возможна конфигурация с минимумом q в середине радиуса плазмы и обращенным широм. В таких случаях в дополнение к ТАЕ развиваются RSAE с частотами, изменяющимися с величиной минимального q . Рассмотренная модель холодной идеальной плазмы не включает те RSAE, которые требуют учета градиента плотности быстрых ионов, влияющего на возникновение моды [9]. Однако при этом учитывается зацепление между ТАЕ и RSAE из-за геометрии магнитных поверхностей, которое может быть более сложным из-за наличия двух экстремумов в q .

Численный анализ фиксированной пространственной структуры и нормированных частот альфвеновских мод для сценария токамака Т-15МД с током 1 МА выполнен с помощью кода KINX. Альфвеновская скорость определяется формулой $V_A = B/(\mu_0 \rho_b)^{1/2}$, ρ_b – массовая плотность плазмы, альфвеновская частота равна $f_A = \omega_A/(2\pi) = V_A/(2\pi R) = 450$ кГц. Альфвеновский континуум (границы континуума, собственные частоты и радиальная структура мод) вычисляется с помощью решения одномерных задач на собственные значения на магнитных поверхностях (2) из [10]. Согласно аналитическим оценкам

работы [4], в этой конфигурации возможны возбуждение альфвеновских мод с небольшими тороидальными номерами, равными $n = 2-6$.

Наиболее опасными для этого сценария являются моды с тороидальными номерами $n = 3, 4$, чьи максимумы расположены в зоне больших градиентов плотности пучка. Остановимся подробнее на анализе именно этих мод.

Радиальная компонента смещения плазмы под действием моды в Бuzеровских координатах (s, θ, ζ) представлена в виде спектрального разложения по компонентам с полоидальным номером m и тороидальным номером n . Коэффициенты разложения имеют вид произведения фиксированной пространственной функции, зависящей только от времени амплитуды $A(t)$ и соответствующей фазы $\xi^s = \sum \xi_{mn}^s \cos(m\theta - n\zeta - \omega t)$, где $\xi_{mn}^s = A(t)\xi_{mn}(s)$.

Нормированные частоты АЕ ω/ω_A с тороидальным номером $n = 3$ для сценария Т-15МД с обращенным широм расположены в интервале [0.094, 0.134] (рис. 2). В этом диапазоне с помощью кода KINX обнаружено пять собственных мод с различной радиальной структурой и различными собственными частотами $\omega/\omega_A = 0.096382; 0.096393; 0.10452; 0.11678; 0.13243$, основные полоидальные компоненты которых показаны на рис. 3. Ни одна из этих мод, за исключением локализованной ТАЕ на рис. 3д, не является в чистом виде RSAE или ТАЕ. При изменении минимального q частота RSAE приближа-

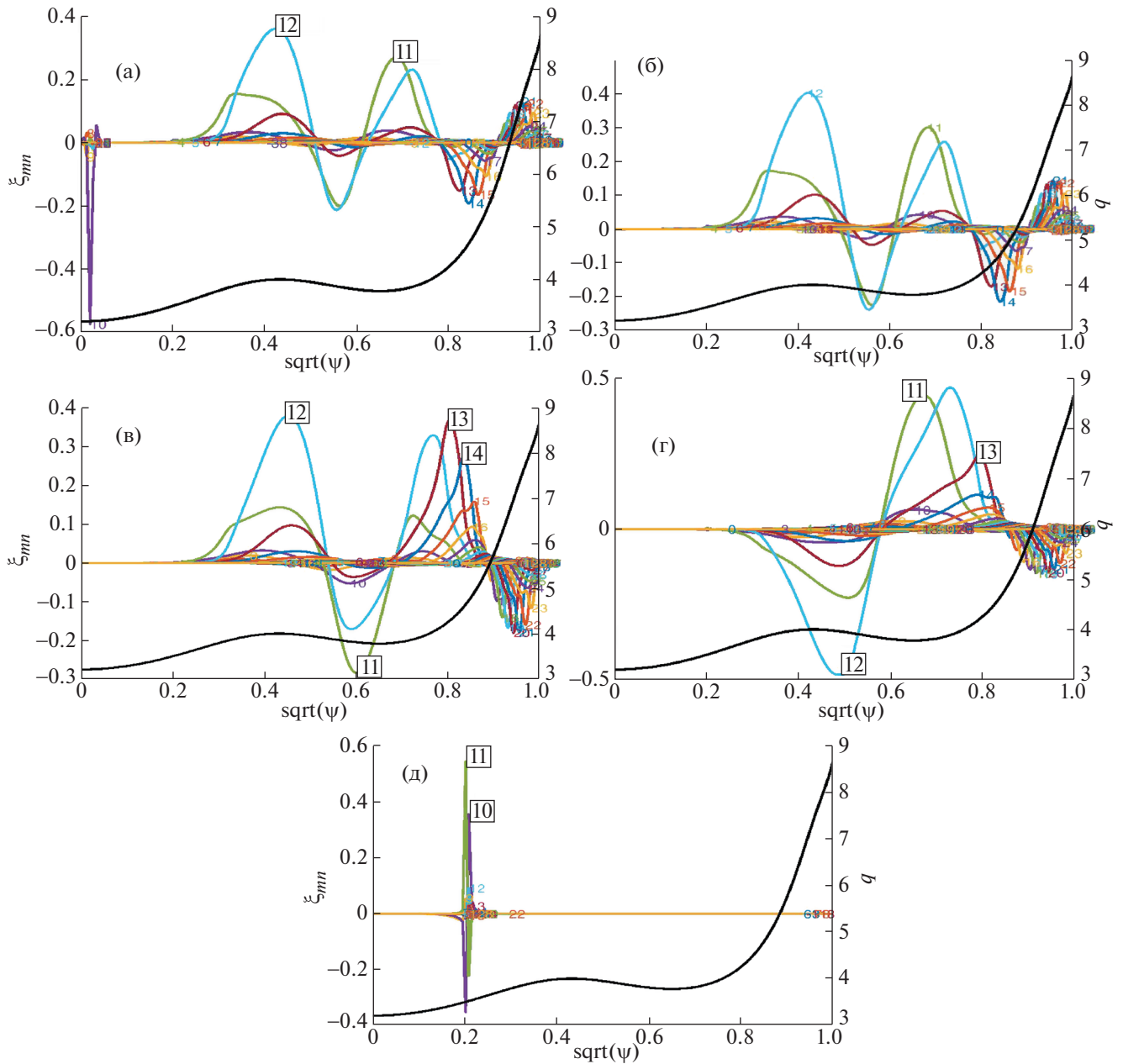


Рис. 3. Профили основных полоидальных компонент $n = 3$ АЕ с собственными частотами $\omega/\omega_A = 0.096382$ (а), 0.096393 (б), 0.10452 (в), 0.11678 (г), 0.13243 (д), рассчитанные с помощью кода KINX для плазмы T-15 с током 1 МА и профиль запаса устойчивости (сплошная черная линия). Номера полоидальных компонент m показаны цифрами вблизи соответствующих максимумов.

ется к частоте ТАЕ, зацепление гармоник становится значительным и получается комбинация RSAE-ТАЕ: экстремум альфвеновского континуума на 0.65 (рис. 2), связанный с экстремумом q , ненамного ниже ТАЕ частоты. Как видно из рис. 3а–в, немонотонный профиль вращательно преобразования приводит к образованию сложной радиальной структуры с несколькими экстремумами, число которых зависит от значения собственной частоты. Максимальное число

экстремумов моды – шесть, найдено для частоты $\omega/\omega_A = 0.096382$ (рис. 3а). Это приводит к возможности эффективного резонанса мод с ионами пучка на нескольких радиусах. Для предварительного анализа альфвеновской неустойчивости была выбрана АЕ с четырьмя экстремумами и с нормированной частотой $\omega/\omega_A = 0.10452$, которая имеет большие полоидальные компоненты с номерами $m = 10–14$ (рис. 3в), расположенные в середине радиуса плазмы с большим градиентом

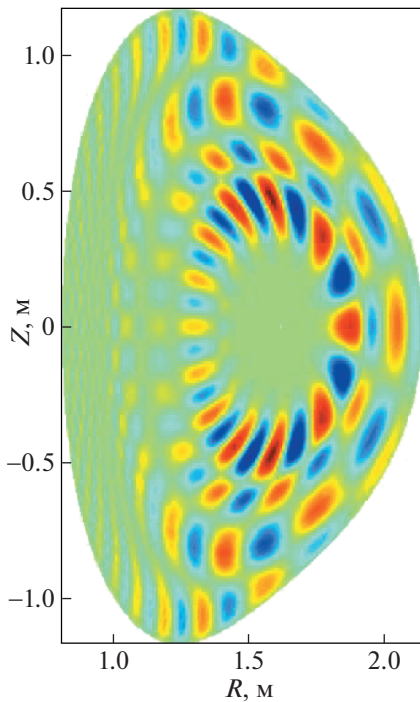


Рис. 4. Сечение плазмы токамака Т-15 МД с линиями уровня нормального смещения АЕ с тороидальным номером $n = 3$, частотой $\omega/\omega_A = 0.10452$ (рис. 3в), рассчитанное с помощью кода KINX.

плотности ионов пучка. Сечение плазмы токамака Т-15МД с линиями уровня нормального смещения ТАЕ моды с тороидальным номером $n = 3$ и нормированной частотой $\omega/\omega_A = 0.10452$ показано на рис. 4.

Анизотропная функция распределения ионов пучка, используемая в коде VENUS [7, 11], состоит из радиальной функции плотности ионов (см. рис. 1), распределения по энергиям с учетом критической скорости и скорости инжекции пучка и распределения Гаусса по питч-углам со смещением, определяемым направлением инжекции. Функция распределения ионов основной плазмы представляет собой распределение Максвелла, зависящее от профилей плотности и температуры.

Нелинейная эволюция амплитуды выбранной альфвеновской моды с нормированной частотой $\omega/\omega_A = 0.10452$ для сценария токамака Т-15МД с немонотонным q вычислена в помощью кода VENUS аналогично работе [3], см. рис. 5а (без эффектов затухания). Ионы водорода нагревного пучка с максимальной энергией 60 кэВ, инжектируемые в плазму, распределяются с помощью метода Монте-Карло в соответствии с профилем плотности, показанном на рис. 1. На линейной стадии инкремент роста амплитуды моды $\gamma = A'(t)/A$, нормированный на собственную ча-

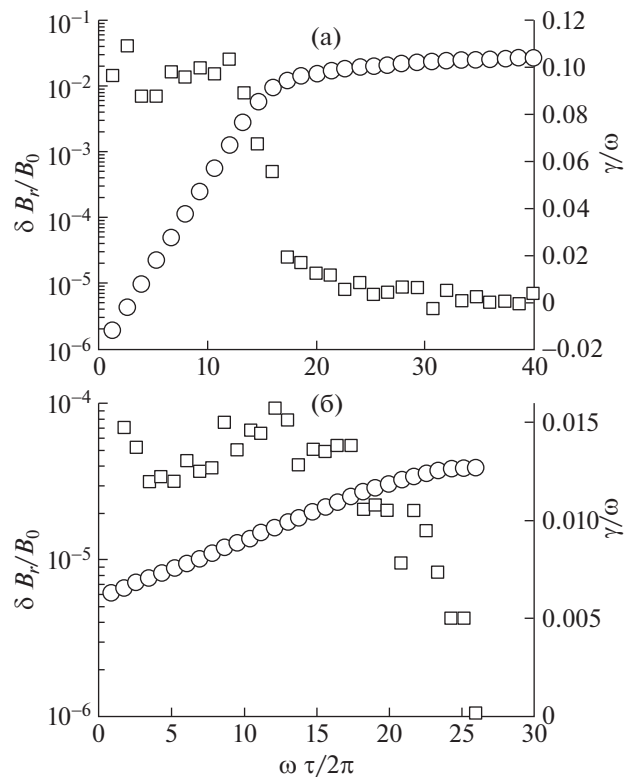


Рис. 5. Нелинейное насыщение $n = 3$ АЕ с учетом динамики ионов пучка с нулевым коэффициентом затухания (а) и с учетом затухания $\gamma_d/\omega = 0.07$ (б), вычисленное с помощью кода VENUS для сценария Т-15МД. Кружки – нормированная амплитуда возмущения магнитного поля АЕ; квадраты – инкремент АЕ-моды.

стоту, достигает уровня $\gamma/\omega = 0.1$. На стадии насыщения максимум радиальной компоненты альфвеновского возмущения примерно постоянен и равен $\delta B_r/B_0 = 0.02$. При таком большом уровне возмущения потери быстрых частиц пучка, вычисленные с помощью кода VENUS, составляют до 10%. Данные оценки показывают потенциальную опасность сценария с немонотонным q , при котором могут возникать несколько резонансных зон и большое возбуждение амплитуды моды.

Однако в анализе альфвеновских неустойчивостей необходимо учитывать и затухание моды различных типов. В частности, учет бесстолкновительного затухания Ландау на тепловых ионах основной плазмы позволяет уменьшить полный инкремент роста моды и уровень насыщения [1, 7].

На рис. 5б показано нелинейное насыщение $n = 3$ ТАЕ, вычисленное с помощью кода VENUS для сценария Т-15МД с немонотонным q с учетом затухания Ландау $\gamma_d/\omega = 0.085$. Оценки затухания

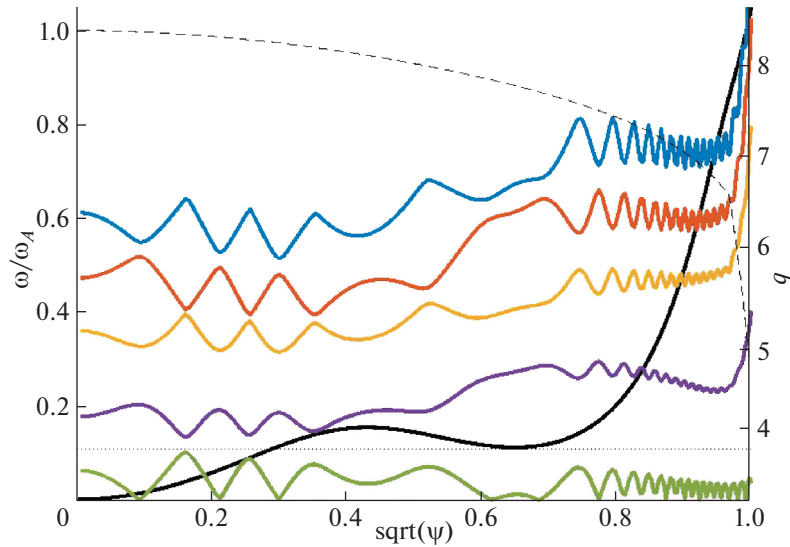


Рис. 6. Структура непрерывного спектра АЕ с тороидальным номером $n = 4$ в плазме токамака Т-15МД с током 1 МА, рассчитанная с помощью кода KINX. Зона между фиолетовой и светло-зеленой линиями показывает расположение АЕ в континууме ω/ω_A в зависимости от радиальной координаты – корня из нормированного полоидального потока. Сплошной черной линией показан профиль запаса устойчивости q , штриховой линией показан профиль нормированной плотности плазмы, точками показана нормированная частота $\omega/\omega_A = 0.10878$.

Ландау выполнены с помощью кода VENUS с учетом профилей плотности и температуры ионов основной плазмы, полученной из кода ASTRA. Как видно на этом рисунке, полный инкремент роста амплитуды с учетом затухания на линейной стадии не превышает $\gamma/\omega = 0.02$, уровень насыщения максимума радиальной компоненты альфвеновского возмущения не превышает $\delta B_r/B_0 = 10^{-4}$. В этом случае потери ионов пучка, вычисленные без учета эффектов конечного ларморовского радиуса орбиты, составляют несколько процентов.

Погрешность метода Монте-Карло при расчетах по коду VENUS зависит от числа частиц. В рассматриваемом случае для моделирования возмущенной функции распределения методом δf использовалось около полумиллиона частиц. Вычисления проводились на кластере НИЦ “Курчатовский институт”.

Продолжим анализ альфвеновских неустойчивостей в сценарии Т-15 МД с немонотонным q исследованием моды с тороидальным номером $n = 4$.

Нормированные частоты ω/ω_A с тороидальным номером $n = 4$ расположены в интервале $[0.100, 0.135]$ между фиолетовой и светло-зеленой кривой (рис. 6). В этом диапазоне код KINX обнаружил четыре собственные моды с различной радиальной структурой, различным числом экстремумов и различными собственными частотами $\omega/\omega_A = 0.10331; 0.10878; 0.11843; 0.12874$, основ-

ные полоидальные компоненты которых показаны на рис. 7. Для нелинейного анализа альфвеновской неустойчивости с тороидальным номером $n = 4$ была выбрана мода с нормированной частотой $\omega/\omega_A = 0.10878$, которая имеет 6 максимумов (рис. 7б), большие полоидальные компоненты с номерами $m = 13-17$, расположенные в середине радиуса плазмы с большим градиентом плотности ионов пучка. Сечение плазмы токамака Т-15МД с линиями уровня нормального смещения с тороидальным номером $n = 4$ и нормированной частотой $\omega/\omega_A = 0.10878$ показано на рис. 8.

Нелинейная эволюция амплитуды моды с тороидальным номером $n = 4$ и собственной нормированной частотой $\omega/\omega_A = 0.10878$ без учета эффектов затухания показана на рис. 9а. Инкремент роста, нормированный на собственную частоту, достигает $\gamma/\omega = 0.09$. На стадии насыщения максимум радиальной компоненты альфвеновского возмущения равен $\delta B_r/B_0 = 0.02$. При таком большом уровне возмущения потери быстрых частиц пучка составляют до 10%. Учет бесстолкновительного затухания Ландау на тепловых ионах заметно снижает полный инкремент роста и уровень насыщения амплитуды моды (рис. 9б). Полный инкремент роста амплитуды с учетом затухания на линейной стадии равен примерно $\gamma/\omega = 0.02$, уровень насыщения максимума радиальной компоненты альфвеновского возмущения не превышает $\delta B_r/B_0 = 10^{-4}$. Потери ионов пучка,

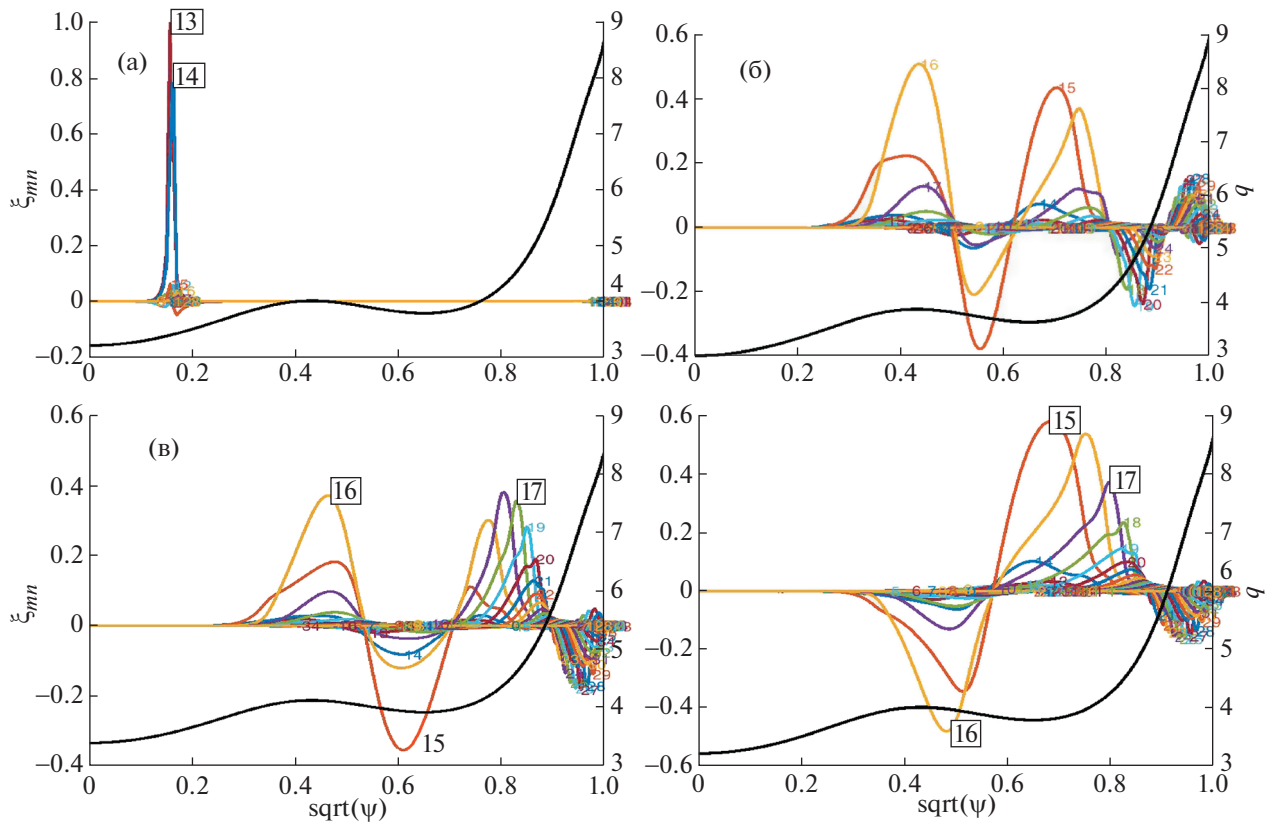


Рис. 7. Профили основных полоидальных компонент $n = 4$ АЕ с собственными частотами $\omega/\omega_A = 0.10331$ (а); 0.10878 (б); 0.11843 (в); 0.12874 (г), рассчитанные с помощью кода KINX для плазмы Т-15 с током 1 МА и профиль запаса устойчивости (сплошная черная линия). Номера полоидальных компонент m показаны цифрами вблизи соответствующих максимумов.

вычисленные без учета эффектов конечного ларморовского радиуса орбиты, составляют несколько процентов.

Максимумы кривых, определенных численно с помощью кода KINX для нижней границы альфвеновского континуума, с тороидальными номерами $n = 2, 5, 6$, расположены вблизи магнитных поверхностей со значениями $(\psi)^{1/2} = 0.06, 0.13, 0.11$ (ψ – нормированный полоидальный поток), вблизи магнитной оси. Предполагается, что и максимумы собственной моды будут находиться вблизи этих магнитных поверхностей. Вблизи магнитной оси градиент плотности нагревного пучка мал, условия резонансной раскачки мод отсутствуют. Анализ мод с тороидальными номерами $n = 2, 5, 6$ будет проведен в ближайшем будущем.

3. АЛЬФВЕНОВСКИЕ МОДЫ В ПЛАЗМЕ ТОКАМАКА TRT С ОБРАЩЕННЫМ ШИРОМ

В этом разделе описываются свойства альфвеновских мод для двух вариантов нового токамака

TRT–TRT7T (с магнитным полем на оси величиной 7 Тл) и TRT8T (магнитное поле на оси равно 8 Тл). Сценарий TRT7T для исследования реакторных технологий с обращенным широм имеет полный ток DT плазмы 4 МА, комбинированный нагрев нейтральным пучком мощностью 30 МВт, высокочастотным нагревом (ВЧ) мощностью 20 МВт, отношение термоядерной энергии к энергии нагрева $Q = 0.93$. Большой радиус тора равен $R = 2.15$ м, малый радиус плазмы $a = 0.67$ м, (как и в токамаке Т-15МД), вытянутость сечения равна 1.8. Основные параметры сценария TRT7T приведены в табл. 1. Рассчитанные с помощью кода ASTRA профили электронной плотности, температуры, плотности быстрых частиц нагревного пучка, плотности термоядерных альфа-частиц и фактор запаса устойчивости q в зависимости от корня нормированного полоидального потока $\rho = (\psi)^{1/2}$ показаны на рис. 10. Улучшенное удержание предполагается за счет внутреннего транспортного барьера ИТВ на среднем радиусе. Наличие ИТВ и комбинированный нагрев создают в TRT сложный немонотонный профиль запаса устойчивости q с обращенным широм, анало-

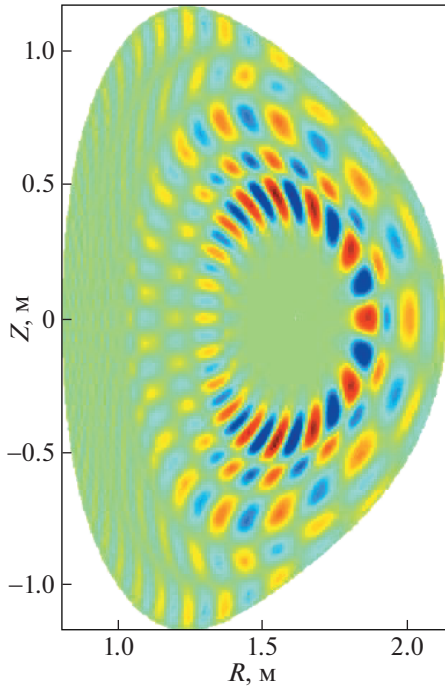


Рис. 8. Сечение плазмы токамака Т-15 МД с линиями уровня нормального смещения АЕ с тороидальным номером $n = 4$, частотой $\omega/\omega_A = 0.10878$ (рис. 7б), рассчитанное с помощью кода KINX.

гичный профилю q тестового токамака-реактора SFETR [12]. Для такого немонотонного профиля запаса устойчивости возможно возбуждение альфвеновских мод, расположенных на различных радиусах плазмы.

Профили плотности альфа-частиц для сценариев TRT7T показаны на рис. 10. Распределение альфа-частиц по энергиям имеет вид функции $f(E) = C(1 - \text{erf}(x))/(E^{3/2} + (E_c)^{3/2})$, где критическая энергия равна $E_c = 4.94 \times 10^5$ эВ, $E_0 = 3.5 \times 10^6$ эВ, $dE = 4.1 \times 10^5$ эВ, $x = (E - E_0)/dE$. Константа C вычисляется из условия равенства центральной плотности альфа-частиц значению $n_{a0} = 1.11 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для сценария TRT7T и значению $n_{a0} = 0.11 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$ для сценария TRT8T (см. табл. 1).

Анизотропная функция распределения ионов пучка по энергиям, радиусу и питч-углам для токамака TRT отличается от функции распределения частиц пучка токамака Т-15МД [7, 11] величиной энергии инжекции $E_b = 0.5$ МэВ и радиальной зависимостью профиля плотности частиц пучка n_b (см. рис. 1, 10, табл. 1).

Расчеты альфвеновского континуума для токамака TRT были выполнены с помощью кода KINX для тороидальных чисел $n = 1-5$. Широкая

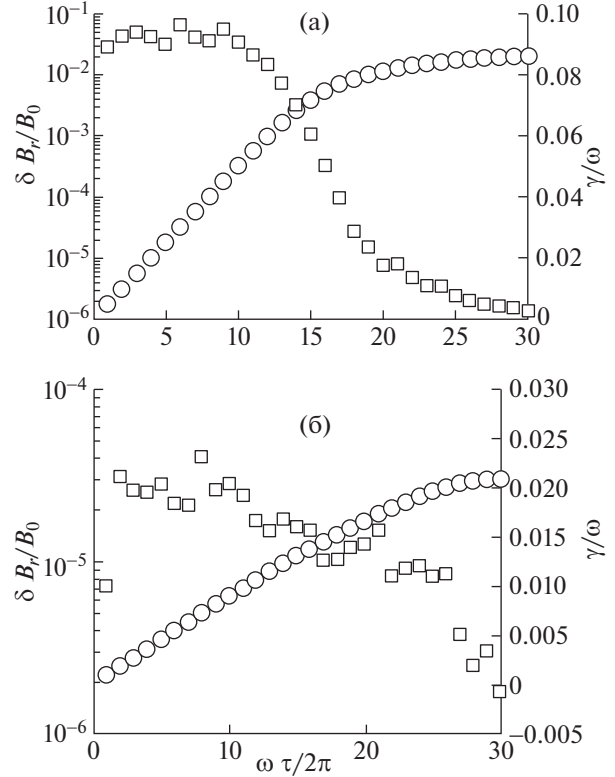


Рис. 9. Нелинейное насыщение $n = 4$ АЕ с учетом динамики ионов пучка с нулевым коэффициентом затухания (а) и с учетом затухания $\gamma_d/\omega = 0.078$ (б), вычисленное с помощью кода VENUS для сценария Т-15МД. Кружки – нормированная амплитуда возмущения магнитного поля АЕ; квадраты – инкремент АЕ.

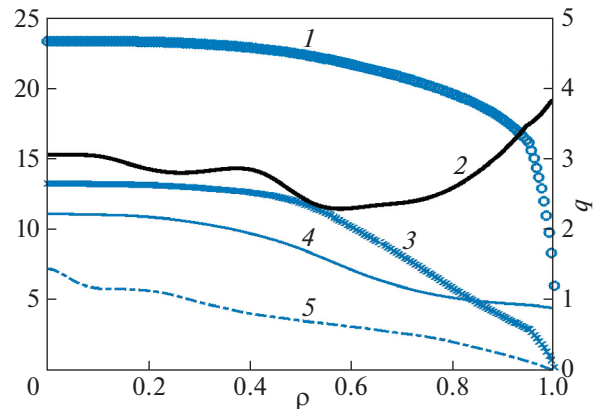


Рис. 10. Зависимость электронной плотности плазмы n_e (10^{19} м^{-3} , кривая 1), фактора запаса устойчивости q (кривая 2), электронной температуры T_e , кэВ (кривая 3), плотности альфа-частиц $10n_\alpha$ (10^{19} м^{-3} , кривая 4), плотности ионов нагревного пучка $10n_b$, (10^{19} м^{-3} , кривая 5) для сценария ТРТ 7Т от корня нормированного полоидального потока, рассчитанная с помощью кода ASTRA.

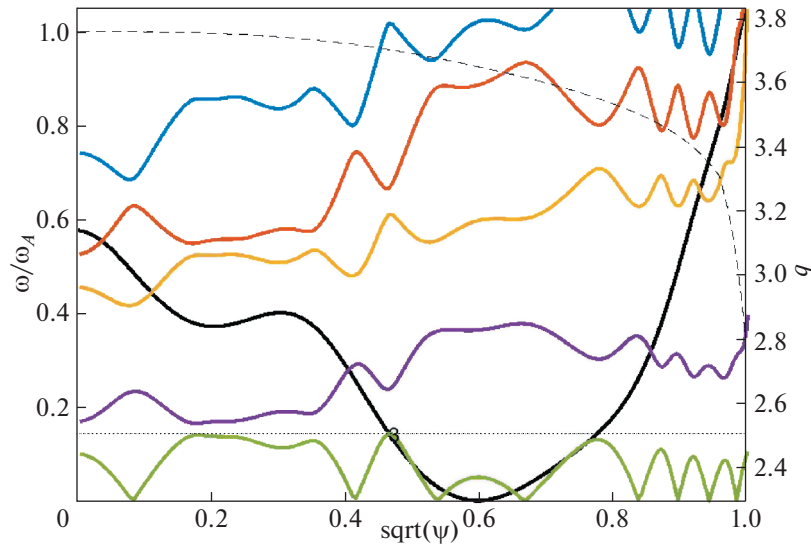


Рис. 11. Структура непрерывного спектра АЕ моды с тороидальным номером $n = 3$ в плазме токамака TRT7T, рассчитанная с помощью кода KINX. Зона между фиолетовой и светло-зеленой линиями показывает расположение АЕ в континууме ω/ω_A в зависимости от радиальной координаты – корня из нормированного полоидального потока. Сплошной черной линией показан профиль запаса устойчивости q , штриховой линией показан профиль нормированной плотности плазмы, пунктиром показана нормированная частота $\omega/\omega_A = 0.1439$.

альфвеновская щель найдена для мод с тороидальным числом $n = 3$ (рис. 11), расположенная в диапазоне значений $\omega/\omega_A = [0.144, 0.169]$ – между нижней зеленой кривой и второй снизу кривой фиолетового цвета. В этой области код KINX находит несколько собственных мод с различной пространственной структурой и с нормированными частотами $\omega/\omega_A = 0.1629$ (рис. 12a); 0.1439 (рис. 12б).

Сложная пространственная форма моды с нормированной частотой вблизи нижней границы альфвеновской щели $\omega/\omega_A = 0.1439$ (рис. 12б) также связана с зацеплением ТАЕ и RSAE. Поскольку экстремум альфвеновского континуума на 0.6 (рис. 11), связанный с экстремумом q , ниже ТАЕ частоты, то такая мода представляет собой более чистый пример RSAE с доминирующей гармоникой $m = 7$. На радиусе $(\psi)^{1/2} = 0.45$ видна особенность из-за пересечения с непрерывным спектром. В соответствии с теорией [13], моды с частотами ниже границы альфвеновской щели имеют так называемое затухание на континууме, расчеты которого выходят за рамки данной работы.

Сечение плазмы токамака TRT с линиями уровня нормального смещения этой моды, рассчитанное с помощью кода KINX, показано на рис. 13. Красным цветом показаны области с максимальным положительным возмущением, синим цветом – области с максимальным отрица-

тельным возмущением. Такая широкая АЕ занимает заметную часть плазмы и может привести к резонансному взаимодействию с быстрыми частицами на многих радиусах.

Результаты нелинейной эволюции широкой моды с $\omega/\omega_A = 0.1439$, возбуждаемой ионами нагревного пучка, показаны на рис. 14а. Расчеты выполнены с помощью кода VENUS отдельно для ионов основной плазмы (для определения затухания Ландау), для ионов пучка и для альфа-частиц. Эволюция амплитуды этой моды, возбуждаемой термоядерными альфа-частицами с учетом затухания Ландау $\gamma_d/\omega = -0.037$ на тепловых ионах DT-плазмы с центральной температурой $T_{i0} = 11.7$ кэВ, и конечного ларморовского радиуса, показана на рис. 14б. Как видно из этих рисунков, значение нормированного инкремента роста моды с $n = 3$ на линейной стадии роста оказалось приблизительно равным $\gamma/\omega = 0.02$, величина нормированного радиального возмущения магнитного поля на стадии насыщения не превысила уровня $\delta B_r/B_0 = 10^{-3}$. При таких уровнях возмущений потери быстрых ионов пучка и ионов основной плазмы пренебрежимо малы. Потери термоядерных альфа-частиц, вычисленные с помощью кода VENUS, с учетом конечной плотности этих частиц на краю плазмы, составили 6%. Таким образом, данные альфвеновские неустойчивости не являются опасными для удержания ионов пучка, однако приводят к определенным потерям термоядерных альфа-частиц.

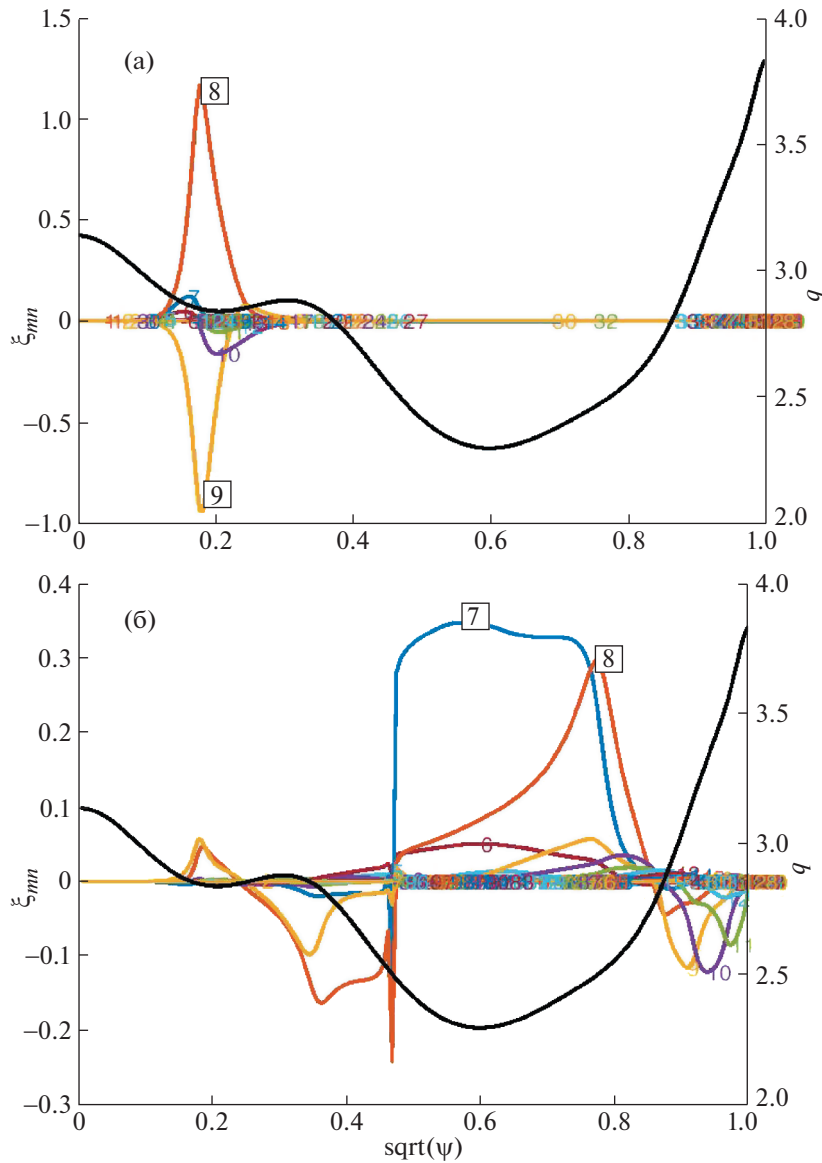


Рис. 12. Профили основных полоидальных компонент $n = 3$ АЕ с собственными частотами $\omega/\omega_A = 0.1629$ (а), 0.1439 (б), рассчитанные с помощью кода KINX для плазмы TRT7T и профиль запаса устойчивости (сплошная черная линия). Номера полоидальных компонент m показаны цифрами вблизи соответствующих максимумов.

Второй рассматриваемый сценарий токамака TRT имеет большое центральное магнитное поле 8 Тл, инжекционный нагрев мощностью 21.9 МВт, центральную электронную плотность $n_{e0} = 9.44 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$, профиль запаса устойчивости с отрицательным центральным широм (см. рис. 15). Основные параметры данного сценария приведены в табл. 1. Как и в сценарии TRT7T, в сценарии с полем 8 Тл в дейтерий-третиевой плазме возбуждение альфвеновских мод возможно как с помощью ионом нагревного пучка, так и с помощью термоядерных альфа-частиц с центральной плотностью $n_{e0} = 0.11 \times 10^{19} \text{ м}^{-3}$. Сравнительная табл. 2

содержит инкременты линейного роста некоторых альфвеновских мод с тороидальными номерами $n = 1-8$ с избранными нормированными собственными частотами ω/ω_A , возбуждаемых ионами пучка γ_{beam}/ω , альфа-частицами γ_α/ω (с учетом эффектов конечного ларморовского радиуса), инкрементов затухания Ландау на теплых ионах γ_d/ω . Расчеты выполнены с помощью кода VENUS отдельно для каждой группы частиц.

Как видно из сводной табл. 2, максимальный нормированный инкремент линейного роста на ионах пучка, равный $\gamma_{beam}/\omega = 0.15$, найден для

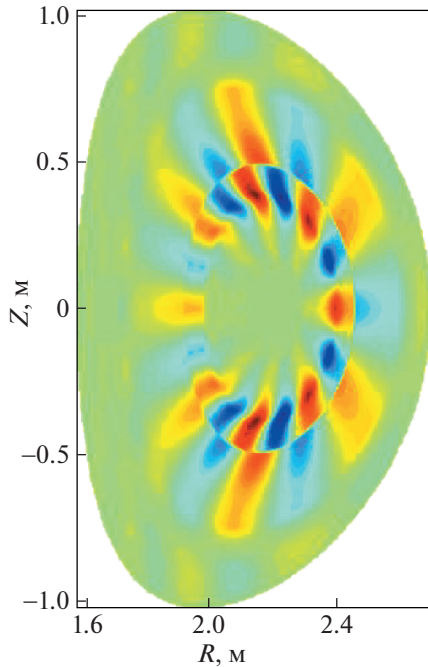


Рис. 13. Сечение плазмы токамака TRT7T с линиями уровня нормального смещения АЕ с тороидальным номером $n = 3$, частотой $\omega/\omega_A = 0.1439$ (рис. 12б), рассчитанное с помощью кода KINX.

нормированной частоты $\omega/\omega_A = 0.25989$ в середине щели альфвеновского континуума с тороидальным номером $n = 5$ (см. рис. 16). Профили основных полоидальных компонент данной собственной моды приведены на рис. 17. Как следует из табл. 2, инкременты роста мод на альфа-частицах для сценария TRT8T заметно ниже, чем на ионах пучка. Наиболее опасными модами, для которых затухание Ландау на тепловых ионах меньше инкрементов роста, оказались моды с тороидальными номерами $n = 1, 3, 5, 6, 8$. Очень высокое значение полученного линейного инкремента роста на ионах пучка в сценарии TRT8T для моды с номером $n = 5$, равное, $\gamma_{beam}/\omega = 0.15$, побуждает уделить в ближайшее время дополнительное внимание учету эффектов радиационного затухания, затухания на континууме и на электронах основной плазмы. Эти дополнительные эффекты, вероятно, позволят снизить суммарный инкремент роста, определить уровень насыщения и уровень потерь быстрых частиц в данном сценарии. Интерес представляет анализ устойчивости альфвеновских мод с другими тороидальными номерами. Такой анализ с уточненными параметрами других сценариев для нового токамака ТРТ предполагается провести в ближайшее время.

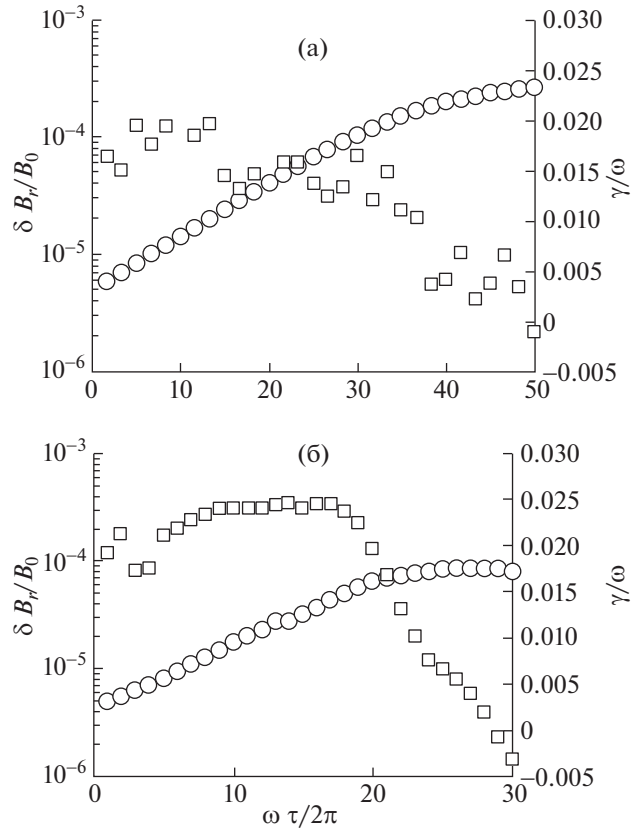


Рис. 14. Нелинейное насыщение $n = 3$ RSAE с учетом динамики ионов пучка энергией $E_0 = 500$ кэВ (а) и с учетом динамики альфа-частиц (б), вычисленное с помощью кода VENUS для токамака TRT7T. Кружки – возмущение магнитного поля RSAE моды; квадраты – инкремент ТАЕ.

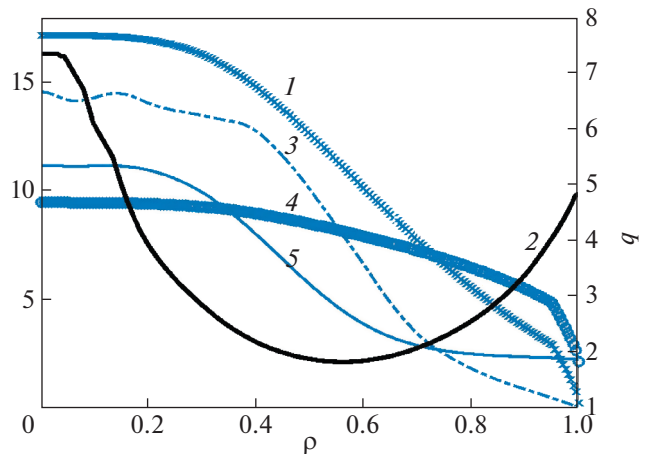


Рис. 15. Зависимость электронной температуры T_e , кэВ (кривая 1), фактора запаса устойчивости q (кривая 2), плотности ионов нагревного пучка $10n_b$, (10^{19} м^{-3} , кривая 3), электронной плотности плазмы n_e (10^{19} м^{-3} , кривая 4), плотности альфа-частиц $100n_\alpha$ (10^{19} м^{-3} , кривая 5), для сценария TRT 8T от корня нормированного полоидального потока, рассчитанная с помощью кода ASTRA.

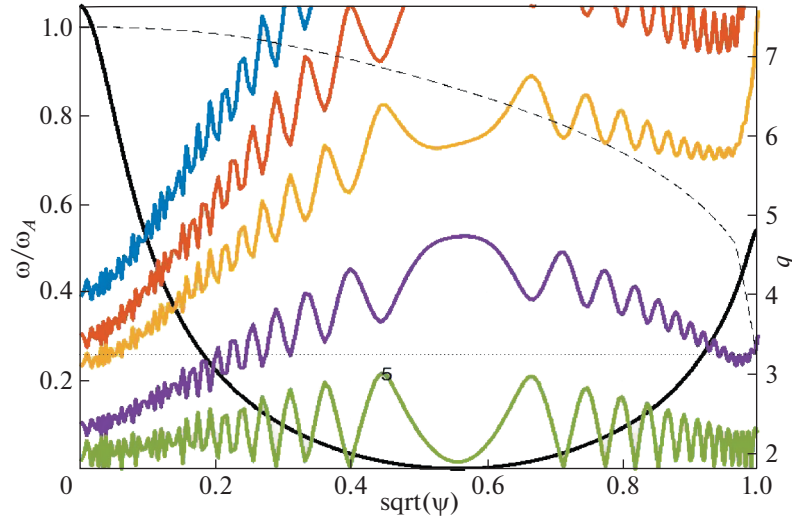


Рис. 16. Структура непрерывного спектра АЕ моды с тороидальным номером $n = 5$ в плазме токамака TRT, 8Т, рассчитанная с помощью кода KINX. Зона между фиолетовой и светло-зеленой линиями показывает расположение АЕ в континууме ω/ω_A в зависимости от радиальной координаты – корня из нормированного полоидального потока. Сплошной черной линией показан профиль запаса устойчивости q , штриховой показан профиль нормированной плотности плазмы, пунктиром показана нормированная частота $\omega/\omega_A = 0.25989$.

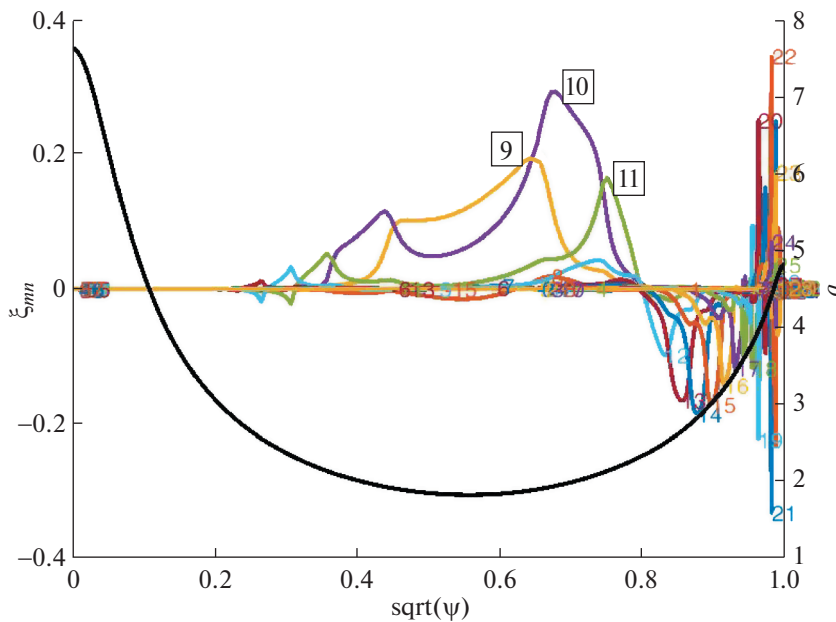


Рис. 17. Профили основных полоидальных компонент $n = 5$ АЕ с собственными частотами $\omega/\omega_A = 0.26$, рассчитанные с помощью кода KINX для плазмы TRT8Т и профиль запаса устойчивости (сплошная черная линия). Номера полоидальных компонент m показаны цифрами вблизи соответствующих максимумов.

Заметим, что полученную численно с помощью кода NOVA-K для разряда DIII-D#142111 RSAE моды с тороидальным номером $n = 1$ и частотой 56.26 кГц, возбуждаемую ионами пучка с суммарным большим инкрементом роста $\gamma/\omega = 0.154$, в экспериментах обнаружить не удалось

[1]. Данный факт показывает необходимость совершенствования физических моделей и проверки численных кодов, в частности кодов ASTRA, KINX, VENUS, используемых в данном анализе альфвеновских неустойчивостей, в том числе, в будущих экспериментах на T-15МД и TRT.

Таблица 2. Нормированные инкременты роста мод с различными тороидальными номерами n , возбуждаемые ионами пучка γ_{beam}/ω , альфа-частицами γ_{α}/ω , инкременты затухания Ландау на тепловых ионах γ_d/ω

n	ω/ω_A	γ_{beam}/ω	γ_{α}/ω	γ_d/ω
1	0.19839	6.2×10^{-2}	1.6×10^{-3}	-8.0×10^{-4}
2	0.21009	2.9×10^{-3}	1.3×10^{-3}	-8.6×10^{-2}
3	0.26023	1.4×10^{-2}	2.7×10^{-3}	-2.1×10^{-3}
4	0.25955	3.5×10^{-2}	8.1×10^{-3}	-4.6×10^{-2}
5	0.25989	1.5×10^{-1}	1.2×10^{-2}	-2.0×10^{-3}
6	0.22027	4.0×10^{-2}	9.6×10^{-3}	-3.0×10^{-2}
7	0.21907	4.1×10^{-2}	7.3×10^{-3}	-3.0×10^{-2}
8	0.25917	1.2×10^{-1}	2.6×10^{-2}	-5.0×10^{-3}

4. ВЫВОДЫ

В работе проведен предварительный численный анализ альфвеновских неустойчивостей для готовящегося к запуску токамака Т-15МД и нового проекта токамака с реакторными технологиями TRT. Параметры разрядов с комбинированным нагревом и обращенным широм рассчитаны с помощью кода ASTRA.

Для таких разрядов с отрицательным магнитным широм с помощью кода KINX подтверждена возможность возникновения различных тороидальных собственных альфвеновских мод с небольшими тороидальными числами $n = 1-8$, частоты которых расположены в диапазоне $\omega/\omega_A = [0.1, 0.2]$. Инкременты роста моды на линейной стадии и нелинейная эволюция амплитуды моды рассчитана с помощью кода VENUS, который учитывает затухание Ландау на тепловых ионах основной плазмы, динамику быстрых ионов нагретого пучка и альфа-частиц.

Для рассмотренных вариантов мод с тороидальными числами $n = 3, 4$ в плазме токамаков Т-15МД и TRT7Т с обращенным широм инкременты роста мод на линейной стадии роста с учетом затухания Ландау на ионах основной плазмы не превышают несколько процентов от частоты моды. Амплитуда моды, расположенной в середине радиуса плазмы, на стадии насыщения в сценарии TRT7Т не превышает уровня $\delta B_r/B_0 = 10^{-3}$, что не является опасным для потерь ионов пучка. Потери термоядерных альфа-частиц при таком возмущении магнитного поля оцениваются в 6%, что может привести к повреждению стенки камеры.

Для сценария TRT8Т получено высокое значение линейного инкремента роста на ионах пучка для моды с тороидальным номером $n = 5$, равное, $\gamma_{beam}/\omega = 0.15$. Такой большой инкремент роста моды может привести к большим потерям частиц

пучка и выходу части альфа-частиц на стенки камеры. Необходимы дополнительные расчеты разнообразных эффектов затухания, которые теоретически могут уменьшить суммарный инкремент роста и уменьшить влияние альфвеновских неустойчивостей. Кроме того, необходимо дальнейшее исследование перехода RSAE в TAE при изменении минимального значения q , что может привести к наибольшим потерям быстрых частиц [14]. Дополнительное увеличение инкремента роста и потерь возможно при учете нескольких мод одновременно, которое планируется выполнить в будущем.

Данные предварительного численного анализа альфвеновских неустойчивостей, проведенного для токамаков Т-15МД и TRT, в целом совпадают с результатами аналогичных численных исследований и экспериментов на токамаках DIII-D, NCSX, ITER, CFETR. В ближайшем будущем предполагается проведение более подробных численных расчетов альфвеновских мод с учетом уточненных сценариев Т-15МД, TRT, а также сравнение с экспериментальными результатами, полученными недавно на токамаке GLOBUS [15].

Авторы благодарны С. Хиршману за возможность использования кодов DESCUR, VMES, Э. Куперу за возможность использования кода TERPSICHORE, С. Коновалову, А. Красильникову за поддержку работы. Авторы благодарят членов Международной группы по физике быстрых частиц ИГРА-EP за сотрудничество и помощь в работе. Работа была выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации Росатом в рамках договора от 5 сентября 2019 г. № 313/1671-Д. Работа была выполнена с использованием оборудования центра коллективного пользования “Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса” НИЦ “Курчатовский институт”, <http://ckp.nrcki.ru>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Van Zeeland M.A., Gorelenkov N.N., Heidbrink W.W., Kramer G.J., Spong D.A., Austin M.E., Fisher R.K., Garcia Munoz M., Gorelenkova M., Luhmann N., Murakami M., Nazikian R., Pace D.C., Park J.M., Tobias B.J., White R.B. // Nuclear Fusion. 2012. V. 52. P. 094023.
2. Zou Y., Chan V.S., Huang J., Collins C.S., Garofalo A.M., Guo W.F., Ye M. // Nuclear Fusion. 2019. V. 59. P. 066005.
3. Koenies A., Briguglio S., Gorelenkov N., Feher T., Isaev M., Lauber P., Mishchenko A., Spong D., Todo Y., Cooper W., Hatzky R., Kleiber R., Borchardt M., Vlad G., Biancalani A., Bottino A. // Nuclear Fusion. 2018. V. 58. P. 126027.
4. Pinches S.D., Chapman I.T., Lauber P.W., Oliver H.D.C., Sharapov S.E., Shinohara K., Tani K. // Phys. Plasmas. 2015. V. 22. P. 021807.

5. *Хвостенко П.П., Бондарчук Э.Н., Кавин А.А., Леонов В.М., Чудновский А.Н.* // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.* 2020. Т. 43. Вып. 3. С. 60.
6. *Leonov V.M.* // *Phys. Atomic Nuclei.* 2017. V. 80. P. 1320.
7. *Isaev M.Y., Leonov V.M., Medvedev S.Y.* // *Fusion Sci. Technol.* 2019. V. 75. P. 218.
8. *Gorelenkov N.N., Belova E., Berk H.L., Cheng C.Z., Fredrickson E., Heidbrink W.W., Kaye S., Kramer G.J.* // *Phys. Plasmas.* 2004. V. 11. P. 2586.
9. *Breizman B.N., Berk H.L., Pekker M.S., Pinches S.D., Sharapov S.E.* // *Phys. Plasmas.* 2003. V. 10. P. 3649.
10. *Медведев С.Ю., Мартынов А.А., Гусев В.К., Петров Ю.В., Патров М.И., Тельнова А.Ю., Иванов А.А., Пошехонов Ю.Ю.* // *Вопр. атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез.* 2018. Т. 41. Вып. 2. С. 95.
11. *Isaev M.Y., Aleynikov P.B., Konovalov S.V., Medvedev S.Y.* // *25th IAEA Fusion Energy Confer.* 13–18 October 2014, Saint Petersburg, Russia, ТН/Р3-39.
12. *Huang J., Gong X., Garofalo A.M., Qian J., Chen J., Wu M., Li M., Yuan Q., Wang L., Pan C., Lin X., Yang Q., Ekedahl A., Maingi R., Holcomb C.T., Li E., Zeng L., Zhang B., Chang J.F., Zhang X.J., Goniche M., Peysson Y., Zhu X., Sun Y., Xu G., Zang Q., Zhang L., Liu H., Lyu B., Ding R., Ren Q., Ding B., Guo W., Ding S., Xiang N., Liang Y., Liu F., Zhao Y., Xiao B., Hu J., Hu C., Hu L., Gao X., Fu P., Song Y., Zhang X.D., Chan V., Li J., Wan B., The EAST team* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2020. V. 62. P. 014019.
13. *Zonca F., Chen L.* // *Phys. Fluids B: Plasma Phys.* 1993. V. 5. P. 3668.
14. *Takechi M., Fukuyama A., Ishikawa M., Cheng C.Z., Shinohara K., Ozeki T., Kusama Y., Takeji S., Fujita T., Oikawa T., Suzuki T., Oyama N., Morioka A., Gorelenkov N.N., Kramer G.J., Nazikian R.* // *Phys. Plasmas.* 2005. V. 12. P. 082509.
15. *Петров Ю.В., Бахарев Н.Н., Буланин В.В., Гусев В.К., Курскиев Г.С., Мартынов А.А., Медведев С.Ю., Минаев В.Б., Патров М.И., Петров А.В., Сахаров Н.В., Щеголев П.Б., Тельнова А.Ю., Толстяков С.Ю., Яшин А.Ю.* // *Физика плазмы.* 2019. Т. 45. С. 675.