

УДК 533.9

ВЛИЯНИЕ ЗАПЕРТЫХ МГД-МОД НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ НАГРЕВА ПЛАЗМЫ МЕТОДОМ НЕЙТРАЛЬНОЙ ИНЖЕКЦИИ В СФЕРИЧЕСКОМ ТОКАМАКЕ ГЛОБУС-М2

© 2024 г. Ю. В. Петров^{а, *}, И. М. Балаченков^а, Н. Н. Бахарев^а,
В. И. Варфоломеев^а, А. В. Воронин^а, В. К. Гусев^а, Н. С. Жильцов^а, А. А. Кавин^б,
Е. О. Киселев^а, Г. С. Курскиев^а, В. Б. Минаев^а, И. В. Мирошников^а,
А. Н. Новохацкий^а, Н. В. Сахаров^а, О. М. Скрекель^а, В. В. Солоха^а, А. Ю. Тельнова^а,
Е. Е. Ткаченко^а, В. А. Токарев^а, С. Ю. Толстяков^а, Е. А. Тюхменева^а,
Н. А. Хромов^а, П. Б. Щёголев^а, К. Д. Шулятьев^а

^аФизико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

^бАО “НИИЭФА им. Д.В. Ефремова”, Санкт-Петербург, Россия

*e-mail: yu.petrov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 17.04.2024 г.

После доработки 14.05.2024 г.

Принята к публикации 25.05.2024 г.

Описана система магнитных катушек, применяемая для коррекции ошибочных магнитных полей на сферическом токамаке Глобус-М2, возникающих из-за несовершенства изготовления и сборки магнитной системы токамака (error fields). Также приведено описание магнитных датчиков, предназначенных для диагностики запертых винтовых МГД-мод. Приводятся результаты экспериментов по обнаружению запертых мод в разрядах с нагревом плазмы с помощью нейтральной инжекции. Установлена корреляция появления запертых мод с потерями быстрых ионов и удержанием основной плазмы.

Ключевые слова: сферический токамак, запертые МГД-моды, нагрев нейтрального пучка

DOI: 10.31857/S0367292124070025, **EDN:** OJPEXK

1. ВВЕДЕНИЕ

Несовершенство изготовления и сборки магнитной системы токамака, а также наличие токоподводов и протекание токов по элементам конструкции приводит к нарушению аксиальной симметрии удерживающих плазму магнитных полей. Возникающие при этом малые возмущения, так называемые ошибки магнитного поля (в англоязычной литературе – error fields) с амплитудами $B_r/B_t \sim 10^{-4}$ (где B_r – неоднородность радиального поля, B_t – тороидальное поле) могут инициировать возникновение запертых винтовых МГД-мод с низкими полоидальными и тороидальными волновыми числами m и n [1]. В сферическом токамаке эта проблема наиболее актуальна, вследствие работы при относительно низких тороидальных

магнитных полях. Соответственно и коррекция ошибочных полей может дать в сферическом токамаке более значимый результат. Так как ошибки магнитного поля содержат ряд гармоник с различными волновыми числами m и n , то важно выявить наиболее опасные из них и создавать с помощью системы специальных обмоток корректирующее поле нужной структуры. На практике обычно наиболее опасными являются возмущения моды $m = 2 / n = 1$, так как они вызывают рост магнитных островов на резонансной поверхности $q = 2$ (q – запас устойчивости). Поэтому коррекция ошибок полей с помощью системы магнитных катушек, создающих магнитное поле со структурой $n = 1$ и набором гармоник $m = 1, 2, 3$ и т. д. дает хороший результат. В экспериментах на токамаке

Глобус-М (большой радиус $R = 36$ см, малый радиус $a = 24$ см, ток плазмы $I_p \leq 250$ кА, тороидальное магнитное поле $Bt \leq 0.5$ Тл) была применена система из 4-х катушек коррекции, что позволило существенно увеличить длительность разряда и улучшить его параметры. В работе [2] подробно описана техника проведения коррекции ошибочных полей и приведены результаты работы схемы коррекции.

После модернизации магнитной системы с целью увеличения магнитного поля до 1 Тл и тока по плазме до 500 кА на токамаке Глобус-М2 также были установлены катушки коррекции аналогичные тем, что хорошо себя зарекомендовали на Глобусе-М. В дополнение к этому на токамаке установлены четыре измерительные катушки для непосредственного измерения тороидальной неоднородности радиального магнитного поля и контроля возникновения запертых мод.

В настоящей работе в разд. 2 описана техника коррекции ошибочных полей с помощью корректирующих катушек, а также дано описание измерительных катушек и принципа их работы, в разд. 3 приводятся результаты экспериментов по наблюдению развития запертых мод в режимах омического нагрева и при нагреве плазмы методом нейтральной инжекции, разд. 4 посвящен обсуждению полученных результатов, и разд. 5 содержит заключение.

2. ИЗМЕРЕНИЕ И КОРРЕКЦИЯ ОШИБОК МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Успешный опыт применения специальных катушек для коррекции ошибок магнитных полей на токамаке Глобус-М был использован при реконструкции магнитной системы. На токамаке Глобус-М2 были изготовлены и установлены катушки аналогичной конструкции. Схема расположения катушек коррекции приведена на рис. 1а, на рис. 1б – фото одной из четырех катушек коррекции, установленных на токамаке. Катушки расположены симметрично вокруг внешнего обхода токамака, каждая имеет высоту 0.7 м и протяженность в тороидальном направлении 67.5° . Каждая катушка состоит из трех витков и способна пропускать ток до 2 кА, который создается с помощью управляемых источников питания по наперед заданной программе. Возможна коммутация катушек для создания горизонтального магнитного поля различной конфигурации. Пара противоположных катушек, запитанных в противофазе, создает горизонтальный поток магнитного поля, направленный по оси катушек. Используя две пары катушек и варьируя в них ток, можно создать горизонтальное магнитное поле нужной величины с нужным направлением. Для определения величины и направления потока, необходимого для коррекции ошибочных магнитных полей, используются сами же корректиру-

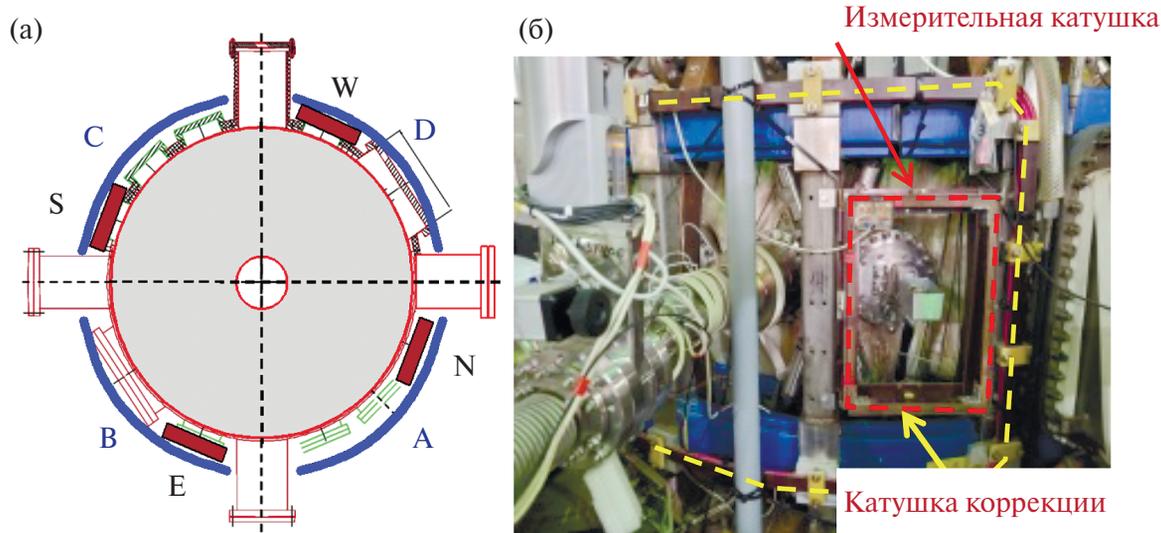


Рис. 1. Схема расположения измерительных (обозначены коричневыми линиями и буквами S, W, N, E) и корректирующих катушек (обозначены синими линиями и буквами ABCD) радиального магнитного поля (а); фото катушек, установленных на токамаке (б). Красной штриховой линией обозначен контур измерительной катушки, желтой линией – корректирующей.

ющие катушки. Методика этих измерений в плазменном эксперименте подробно описана в работе [2]. Здесь же кратко изложим принцип таких измерений. Во время стабильной фазы разряда, на плато тока по плазме в пару катушек коррекции, включенных в противофазе (например, АС), заводится линейно нарастающий во времени ток, создающий внешнее возмущающее поле. При превышении пороговой величины тока (т. е. суммарного возмущающего поля) в разряде развивается запертая мода, которая проявляет себя по ряду характерных признаков: резко падают электронная плотность и сигнал мягкого рентгеновского излучения, растет свечение линии D_{α} , что свидетельствует о деградации удержания плазмы. Отмечаем пороговое значение величины тока в катушках. Затем проделываем эту операцию при противоположном направлении тока в катушках АС. То же самое проделываем со второй парой катушек ВД. По результатам измерений строим диаграмму наподобие изображенной на рис. 2. На ней по осям отложены токи в парах катушек АС и ВД. Значения пороговых токов, полученных в эксперименте, лежат на окружности, центр которой является точкой, в которой плазма наиболее устойчива по отношению к внешнему возмущающему полю моды $n = 1$. Тогда вектор из начала координат в эту точку определяет величины и направления токов в парах катушек, которые необходимо задать для приведения системы в наиболее устойчивое состояние. Преимущество данного метода состоит в том, что измерения, проведенные на конкретном



Рис. 2. Диаграмма пороговых токов в парах корректирующих катушек. Стрелкой показан вектор, определяющий величину и направление токов в парах катушек для коррекции ошибочного магнитного поля моды $n = 1$.

токамаке, сразу дают значения токов в катушках, необходимые для корректировки ошибочных полей. Однако возникает вопрос, не нужно ли менять корректирующее поле при изменении плазменных параметров. Для ответа на этот вопрос нами были выполнены измерения на токамаке Глобус-М в широком диапазоне токов по плазме и концентраций [2]. Позже эти измерения были проведены на Глобусе-М2 для вдвое больших значений тороидального магнитного поля и тока по плазме. В результате установлено, что, несмотря на изменение порога проникновения внешнего возмущающего поля при изменении параметров разряда, величина и направление корректирующего поля практически не меняется.

В процессе использования катушек коррекции необходимо оценивать эффект от их применения. На Глобусе-М это осуществлялось по косвенным признакам: увеличению длительности разряда, предотвращению деградации его параметров, наблюдаемому с помощью ряда диагностик. Однако для прямого наблюдения наличия или отсутствия запертой моды необходима система специальных магнитных датчиков, которая и была разработана и установлена на токамаке Глобус-М2.

Система представляет собой комбинацию 4-х магнитных датчиков со схемой компенсации. Их расположение на токамаке показано на рис. 1. Внешний вид датчика, приведен на рис. 3а. На рис. 3б приведена схема расположения катушек в датчике. Основная катушка для измерения радиального магнитного потока, B_r , имеет размеры 0.25×0.35 м, число витков — $n = 30$, и, соответственно, эффективную площадь $S \times n = 2.625$ м². Катушки для компенсации тороидального, B_t , и вертикального, B_z , магнитного полей также имеют число витков 30 и эффективную площадь 0.25 и 0.2 м² соответственно. Для выделения чисто радиального магнитного потока в измеряемом сигнале применяется схема компенсации тороидального и вертикального потоков, приведенная на рис. 4. С выхода схемы компенсации сигнал подается на интегратор и затем записывается с помощью аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Компенсация производится последовательно, сначала тороидального, а затем вертикального магнитного потока. Для компенсации тороидального потока производится серия выстрелов токамака с включением только катушки, создающей тороидальное магнитное

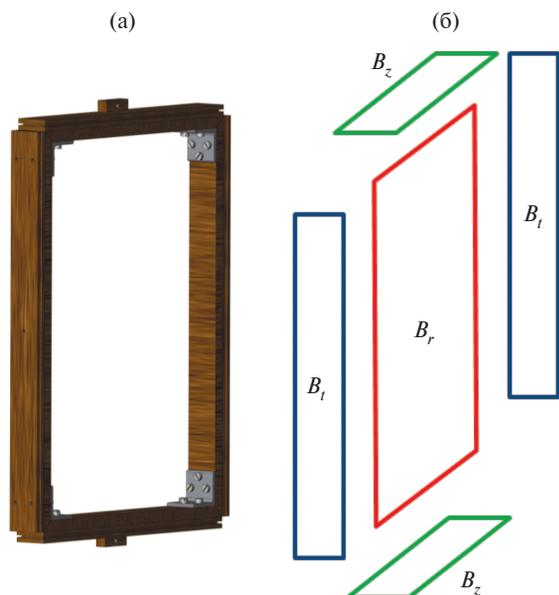


Рис. 3. Внешний вид магнитного датчика для измерения радиального магнитного поля, установленного на токамаке (а); схематический рисунок расположения магнитных катушек в датчике (б). B_r – основная катушка для измерения радиального магнитного поля, B_t – катушки компенсации тороидального магнитного поля, B_z – катушки компенсации вертикального магнитного поля.

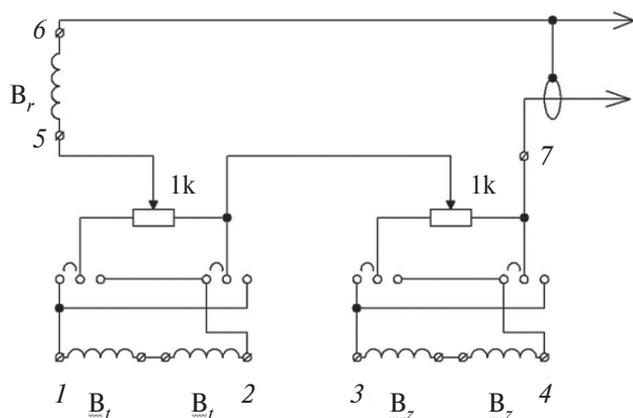


Рис. 4. Схема компенсации тороидального и вертикального магнитных потоков.

поле, ТФ. Регулировкой потенциометра, установленного в цепи тороидальных компенсационных катушек выстрел за выстрелом уменьшаем значение выходного сигнала и доводим его до нулевого значения в пределах точности измерений. Далее ту же процедуру выполняем с катушками компенсации B_z , при этом стреляем с включением только катушки, создающей вертикальное магнитное поле в токамаке, РФЗ.

Измерение тороидальной неоднородности радиального магнитного поля производится во время рабочего разряда с помощью пары датчиков, установленных на диаметрально противоположных сторонах токамака. На токамаке Глобус-М2 такие измерения возможны в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Измеряемой величиной является разница сигналов двух противоположных катушек. В результате многочисленных экспериментов установлено, что мода, как правило, запирается в одном положении по тороидальному обходу, а именно по направлению S-N (см. рис. 1а). На рис. 5 приведены осциллограммы сигналов для омического разряда с запертой модой #38744. Амплитуда запертой моды $n = 1$ (красная кривая) получена как разность радиальных магнитных потоков, измеряемых катушками S и N, деленная на площадь и число витков в катушке. Из рисунка видно, что с момента нарастания амплитуды моды на 192 мс происходит деградация разряда: падает интенсивность мягкого рентгеновского излучения и среднехордовой плотности, что заканчивается срывом разряда. При этом сигнал зонда Мирнова практически отсутствует, что говорит об отсутствии вращающейся МГД-моды.

Для предотвращения развития запертых мод в токамаке Глобус-М2 применяется корректировка ошибочных магнитных полей моды $n = 1$ по методике, описанной выше. Для корректировки в пары обмоток АС и ВD заводятся токи, величина которых определяется вектором на рис. 2. В идеале это требует двух отдельных источников питания. Однако по счастливой случайности, для Глобуса-М/М2 оказалось, что токи в парах катушек, необходимые для коррекции отличаются несильно. Это позволило обойтись одним источником, соединив нужным образом катушки коррекции. Ток в катушки коррекции заводится на плато тока плазмы по предварительно установленной программе. Процедура коррекции ошибочных полей, как и ее результаты, подробно описаны в [2]. В настоящее время коррекция ошибочных полей моды $n = 1$ рутинно используется на токамаке Глобус-М2, что позволяет в подавляющем большинстве разрядов избежать развития запертой моды, но не дает стопроцентный результат. Улучшить качество коррекции можно, управляя током в катушках коррекции по обратной связи, с использованием датчика запертой моды, описанного выше. В качестве относительно

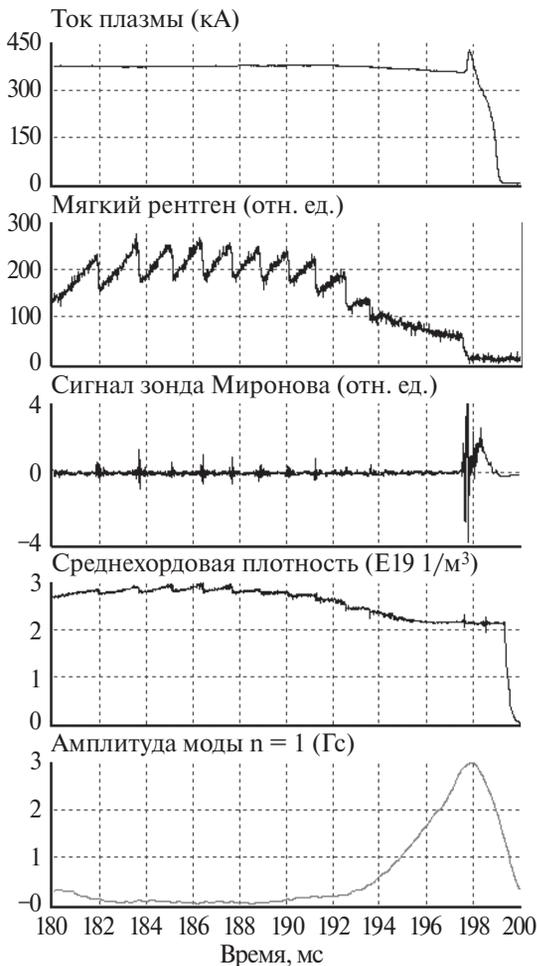


Рис. 5. Осциллограммы сигналов для омического разряда с запертой модой #38744. Амплитуда моды $n = 1$ (красная кривая) получена как разность радиальных магнитных потоков, измеряемых катушками S и N, деленная на площадь и число витков в катушке.

удачного применения такого подхода можно привести эксперимент на сферическом токамаке NSTX [3]. Однако реализация данного метода сопряжена с рядом трудностей, что, впрочем, выходит за рамки данной работы.

3. ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО ИНЖЕКЦИИ НЕЙТРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ

На токамаке Глобус-М2 был проведен ряд успешных экспериментов по нагреву плазмы с помощью двух пучков атомов высоких энергий, в результате которых электронная температура превысила 1.5 кэВ, а температура ионов 4.5 кэВ [4–6]. В экспериментах использовались два инжектора: один – с энергией инжектируемых частиц до 30 кэВ и мощностью до 500 кВт, и второй – с энергией до 50 кэВ и мощностью до 1 МВт. Оба

инжектора способны генерировать пучки атомов водорода или дейтерия. Инжекция осуществлялась в тангенциальном направлении по току плазмы. В экспериментах был задействован диагностический комплекс токамака, описанный в работе [7]. В ходе экспериментов было замечено, что не все плазменные разряды, осуществляемые по одному сценарию, дают хороший результат нагрева плазмы. Довольно скоро выяснилось, что причиной этого является запертая мода, развивающаяся в ряде разрядов, несмотря на то что корректировка ошибочных полей работала во всех случаях. В качестве примера на рис. 6 приведены временные зависимости параметров разрядов без запертой моды # 41867 (синие линии) и с запертой модой #41863 (красные линии). В обоих разрядах ток плазмы 300 кА, тороидальное магнитное поле 0.8 Тл, водородная плазма. Первый дейтериевый пучок энергией 30 кэВ, мощностью 250 кВт инжектировался на 130 мс, на стадии подъема тока и работал до конца разряда. Второй дейтериевый пучок энергией 29 кэВ, мощностью 500 кВт работал с 170 мс по 210 мс. Из рис. 6 видно, что в разряде #41863 запертая мода возникает еще до начала инжекции второго пучка. Уже со 166 мс начинается падение среднехордовой плотности и интенсивности мягкого рентгеновского излучения. Как результат, центральная ионная температура, измеренная с помощью диагностики активной спектроскопии перезарядки (CXRS) [7] в разряде с запертой модой оказывается вдвое меньше, чем в разряде без нее. Измерения ионной температуры проводились только во время работы второго пучка, так как он используется для диагностики CXRS в качестве диагностического. Время экспозиции составляло 5 мс. Точки на графике соответствуют серединам измерительных временных интервалов. Следует отметить, что в разряде #41863 не происходит полного запираения моды, что обычно приводит к срыву разряда. Как видно из рис. 6, амплитуда моды нарастает до максимального значения, а затем уменьшается и меняет знак. Такое поведение связано, по-видимому, с проворачиванием магнитного острова в тороидальном направлении. Однако такого частичного запираения моды уже достаточно для деградации плазменных параметров и снижения эффективности нагрева плазмы методом нейтральной инжекции. Следует также отметить, что в разряде #41863 запертая мода развивается при отсутствии предшествующей

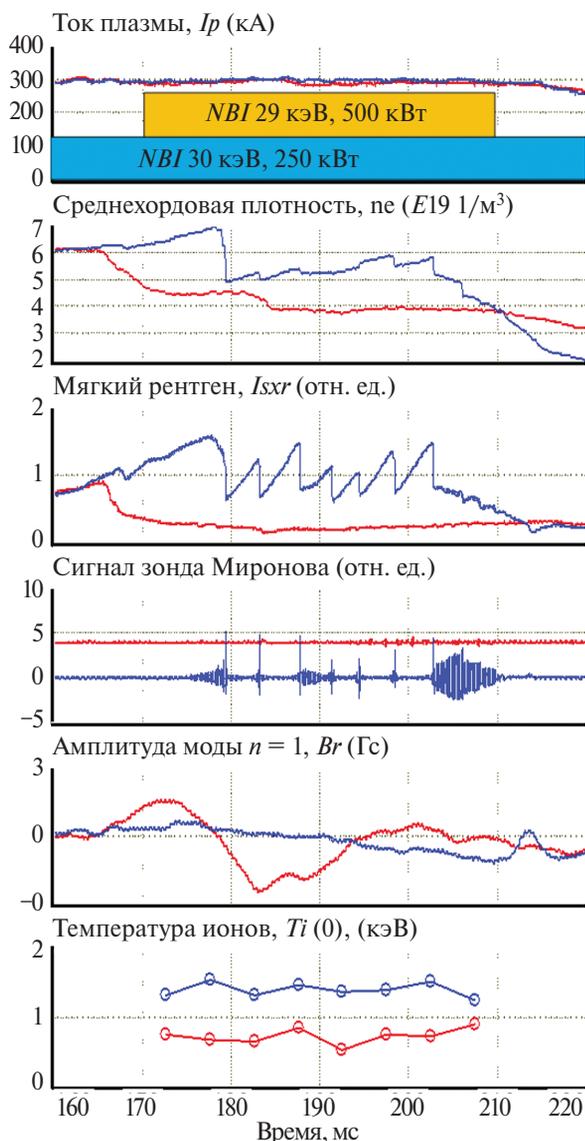


Рис. 6. Временные зависимости параметров разрядов без запертой моды #41867 (синие линии) и с запертой модой #41863 (красные линии). Желтым и синим прямоугольниками в верхнем окне обозначено время работы инжекторов пучков атомов.

ей вращающейся МГД-моды, и, по-видимому, является результатом воздействия ошибочных полей.

В некоторых случаях запертая мода развивалась уже во время включения второго инжектора. На рис. 7 приведены осциллограммы плазменных параметров в двух разрядах #42793 и #42798 с дейтериевой плазмой. В обоих разрядах тороидальное магнитное поле составляло $B_t = 0.8$ Тл, ток плазмы $I_p = 400$ кА. Первый дейтериевый пучок энергией 30 кэВ, мощностью 250 кВт инжектировался начиная со 130 мс на стадии

подъема тока и работал до конца разряда. Второй дейтериевый пучок с энергией 28 кэВ, мощностью 475 кВт работал с 190 мс по 230 мс. Как видно из рис. 7, развитие запертой моды в этих разрядах происходило в разные моменты времени. В разряде #42793 (синие кривые на рисунке) запертая мода развивается в самом конце импульса второго инжектора. В результате, в течение всего нагревного импульса второго инжектора не происходит деградации плазменных параметров, сохраняются высокая ионная температура и энергосодержание плазмы, достигнутые в первой его половине. В разряде #42798 (красные кривые) развитие запертой моды происходит раньше, амплитуда моды $n = 1$ начинает нарастать на 220 мс. Деградация плазменных параметров наступает несколько раньше, на 218 мс, и является результатом развития вращающейся МГД-моды $m = 2/n = 1$, регистрируемой зондами Мирнова. Ионная температура измерялась двумя методами. На рис. 7 приведена центральная ионная температура, измеренная с помощью диагностики CXRS и анализатором атомов перезарядки (NPA) АКОРД-24М. Анализатор атомов работал в активном режиме, когда основной вклад в его сигнал поступает из области пересечения линии наблюдения с инжектируемым пучком атомов [8]. При этом мы получаем информацию о локальной ионной температуре в точке пересечения, которая в нашем случае находилась на радиусе $R = 44$ см (примерно 4 см от магнитной оси со стороны слабого магнитного поля). Электронная температура и плотность измерялись с помощью диагностики томсоновского рассеяния [9]. Энергосодержание плазмы, приведенное на рисунке, определялось из диамагнитных измерений [10].

4. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Коррекция ошибок магнитного поля в токамаке Глобус-М2 стала рутинной процедурой и в большинстве случаев позволяет получить устойчивый плазменный разряд, длительность которого не ограничивается возникновением запертой моды. Наиболее заметно эффект корректировки проявляется в омических разрядах с низкой плотностью плазмы. В разрядах с инжекцией пучков атомов эффект менее заметен. Это происходит в силу того, что инжектируемые тангенциально пучки придают плазме тороидальное вращение, тем самым препятствуя развитию запертых мод. Измеренные с помощью

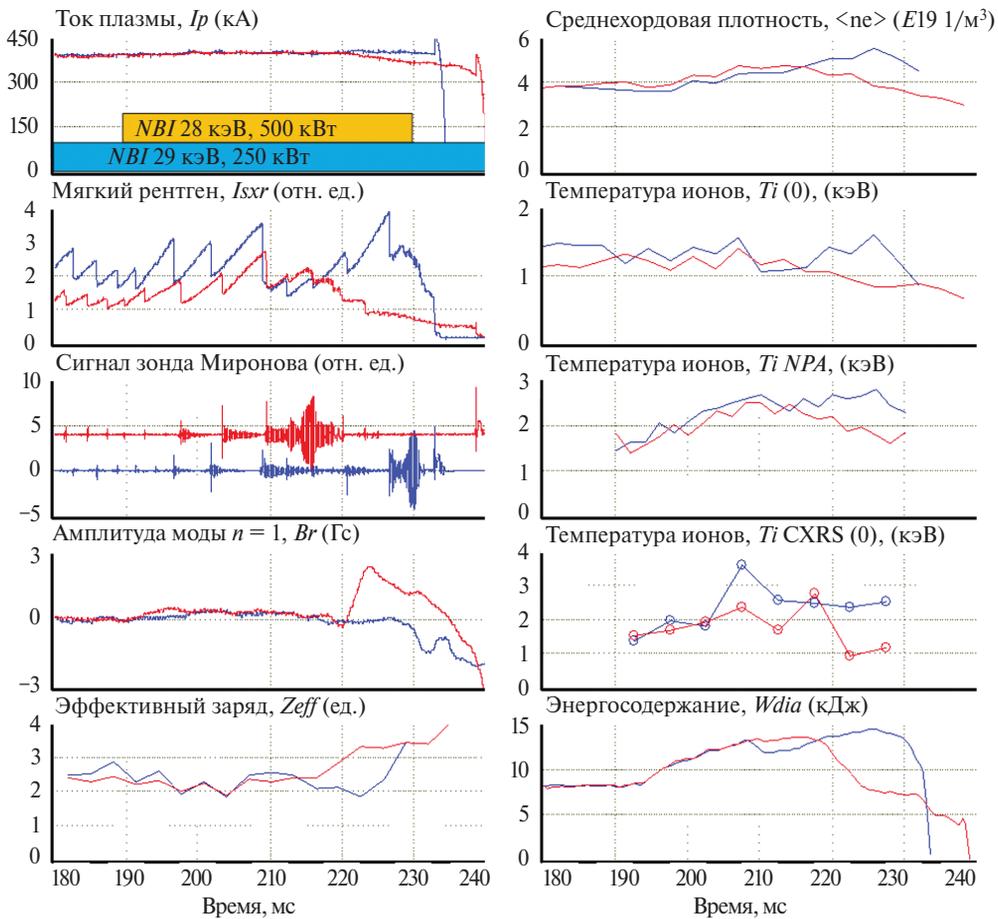


Рис. 7. Временные зависимости параметров разряда # 42793 (синие линии) с поздним развитием запертой моды и разряда #42798 (красные линии) с ее более ранним развитием. Желтым и синим прямоугольниками в верхнем окне обозначено время работы инжекторов пучков атомов.

диагностики CXRS скорости вращения в разрядах с инъекцией достигали сотен километров в секунду. Статистически разряды с инъекцией демонстрируют более высокую устойчивость к развитию запертой моды, однако, как мы видим, не исключают полностью вероятность ее возникновения. Можно назвать несколько возможных причин. Во-первых, как было сказано выше, корректировка ошибочных полей на токамаке Глобус-М2 не является полной. Осуществляется корректировка только неоднородности моды $n = 1$ (без дифференциации по полоидальным гармоникам) и никак не затрагиваются более высокие гармоники n , для чего понадобилась бы более сложная система корректирующих катушек. Кроме этого, управление током в катушках коррекции осуществляется по заранее установленной программе, без обратной связи. Мы можем только несколько менять программу между выстрелами, ориентируясь на полученный результат. В даль-

нейшем нами будут предприняты усилия по реализации обратной связи с использованием датчика запертой моды. Во-вторых, в разрядах с инъекцией существенно вырастает величина тороидальной бета (β_t). Так в разрядах #42793 и #42798 величина β_t , рассчитываемая по экспериментальным данным с помощью равновесного кода PET [10], достигала значений 5%. Согласно скейлингу [1], порог проникновения внешних ошибочных полей в плазму линейно снижается с ростом β_t , и, по всей видимости, в нашем случае падает до критической величины. Однако причины возникновения запертой моды в одних разрядах, и ее отсутствие в других, сходных по параметрам, не до конца ясны и требуют дополнительного изучения.

Отдельно хотелось бы обратить внимание на влияние запертой моды непосредственно на удержание быстрых ионов. К сожалению, в серии экспериментов с перегретыми ионами анализа-

торы атомов были настроены на измерение ионной температуры и измерения спектров атомов в области энергий инжекции не проводились. Однако некоторую информацию можно почерпнуть из измерений нейтронных потоков [11]. На рис. 8 приведены временные зависимости плотности, измеренные томосоновской диагностикой в точке $R = 40.4$ см (центр), и нейтронные потоки, измеренные нейтронным спектрометром, для разрядов #43793 и #43798. Штриховыми линиями обозначены моменты времени начала роста запертой моды и через 10 мс после в разряде #43798. Из рисунка видно, что в разряде #43798 за 10 мс центральная плотность падает в 1.4 раза, в то время как поток нейтронов в 2.4 раза. Поток нейтронов в токамаке Глобус-М2 пропорционален произведению плотностей тепловых и быстрых дейтронов, так как именно их взаимодействие дает основной вклад. Кроме того, основной поток происходит из центральной области, где концентрация тех и других выше. Более сильное падение

нейтронного потока по сравнению с падением плотности основной плазмы говорит об уменьшении концентрации быстрых дейтронов в центральной области вследствие их транспорта на периферию или окончательных потерь при взаимодействии с запертой модой. Конечно, это требует проверки прямыми измерениями потоков атомов перезарядки с энергиями близкими к энергии инжекции, что является предметом дальнейших исследований.

5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В токамаке Глобус-М2 успешно применяется система коррекции ошибочных магнитных полей, что позволяет в значительной степени снизить вероятность развития запертых мод. Несмотря на простоту системы, обеспечивающей лишь корректировку ошибочного поля моды $n = 1$ по заранее заданной программе, она в подавляющем большинстве случаев позволяет получить устойчивый плазменный разряд, длительность которого

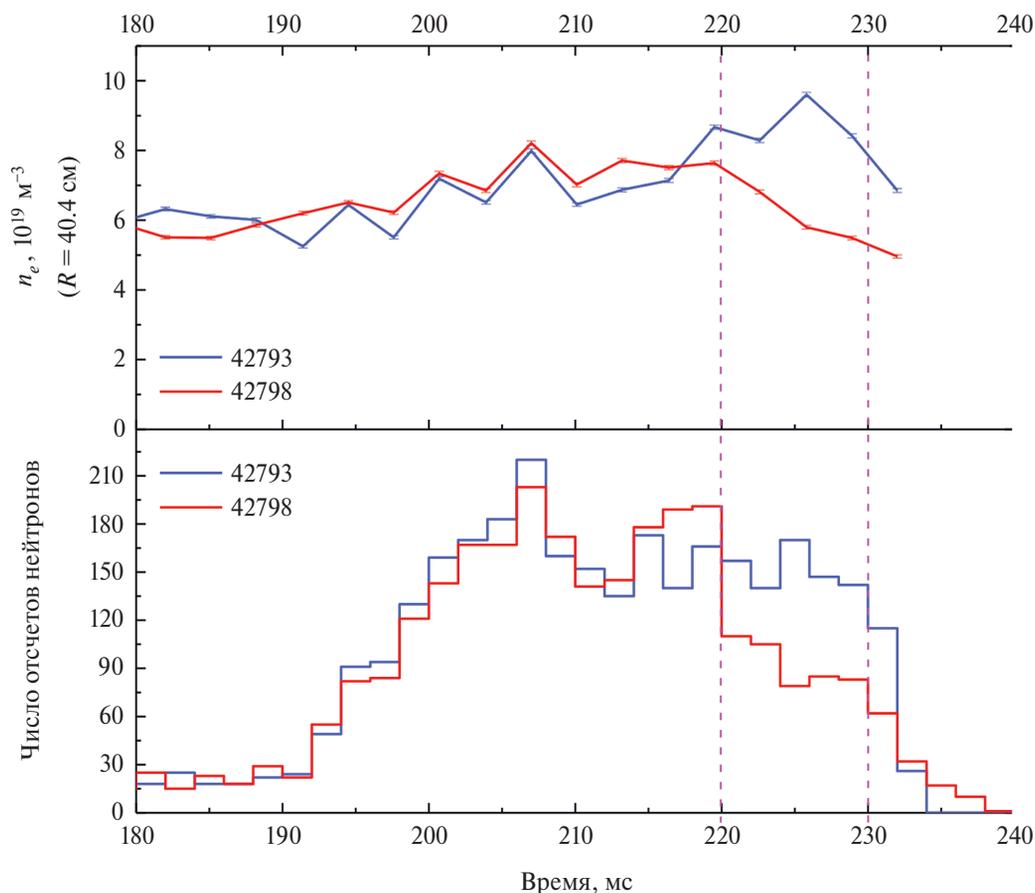


Рис. 8. Временные зависимости плотности, измеренные диагностикой томосоновского рассеяния в точке $R = 40.4$ см (центр), и нейтронные потоки, измеренные нейтронным спектрометром, для разрядов #43793 и #43798.

не ограничивается возникновением запертой моды. Однако в ряде случаев запертая мода все же развивается, что приводит к деградации плазменных параметров, и порой к срыву разряда. Для контроля запертой моды был разработан и установлен на токамаке специальный магнитный датчик, который позволяет диагностировать ее появление. Он особенно полезен в случаях, когда запертая мода развивается без предшествующего ей вращающегося МГД-острова, и не может быть обнаружена по сигналам обычных зондов Мирнова. Обнаружение запертой моды в разряде *post factum* позволяет несколько изменить корректирующее поле в следующих разрядах, и таким образом, часто, добиться ее устранения. Но более надежным способом является организация управления корректирующим полем по обратной связи, с использованием магнитных датчиков. Для более качественной корректировки требуется более сложная система датчиков и корректирующих катушек, позволяющая дифференцировать тороидальные и полоидальные гармоники ошибочного магнитного поля. Кроме того, магнитные датчики желательно помещать внутри вакуумной камеры для уменьшения времени запаздывания. Все это трудно осуществимо на уже работающем токамаке, поэтому необходимо учитывать при конструировании новых установок.

Применение на токамаке Глобус-М2 датчика запертой моды в разрядах с инъекцией нейтральных пучков позволило определить причины недостаточной эффективности нагрева в ряде случаев. Продемонстрирована корреляция развития запертой моды с ухудшением удержания как быстрых ионов, так и основной плазмы. Однако причины возникновения запертой моды в одних разрядах, и ее отсутствие в других, сходных по параметрам, не до конца ясны и требуют дополнительного изучения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена на УНУ «Сферический токамак Глобус-М», входящей в состав ФЦКП «Материаловедение и диагностика в передовых технологиях» ФТИ им. А.Ф. Иоффе в рамках выполнения государственного задания (тема 0034-2024-0028), эксперименты по нагреву плазмы пучками атомов выполнялись в рамках государственного задания (тема 0034-2021-0001).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. ITER Physics Basis // Nuclear Fusion. 1999. V. 39. P. 2286
2. Петров Ю.В., Патров М.И., Варфоломеев В.И., Гусев В.К., Ламзин Е.А., Сахаров Н.В., Сычевский С.Е. // Физика плазмы. 2010. Т. 36. С. 492.
3. Menard J.E., Bell R.E., Gates D.A., Gerhardt S.P., Park J.-K., Sabbagh S.A., Berkery J.W., Egan A., Kallman J., Kaye S.M., LeBlanc B., Liu Y.Q., Sontag A., Swanson D., Yuh H., Zhu W. and the NSTX Research Team // Nucl. Fusion. 2010. V.50. P. 045008. Doi: 10.1088/0029-5515/50/4/045008.
4. Kurskiev G.S., Miroshnikov I.V., Sakharov N.V., Gusev V.K., Petrov Yu.V., Minaev V.B., Balachenkov I.M., Bakharev N.N., Chernyshev F.V., Goryainov V.Yu., Kavin A.A., Khromov N.A., Kiselev E.O., Krikunov S.V., Lobanov K.M., Melnik A.D., Novokhatskii A.N., Filipov S.V., Zhiltsov N.S., Mineev A.B., Mukhin E.E., Patrov M.I., Petrov A.V., Ponomarenko A.M., Solokha V.V., Shulyatiev K.D., Shchegolev P.B., O.M. Skrekkel, Telnova A.Yu., Tkachenko E.E., Tikhmeneva E.A., Tokarev V.A., Tolstyakov S.Yu., Varfolomeev V.I., Voronin A.V., Yashin A.Yu., Solovey V.A., Zhilin E.G. // Nucl. Fusion. 2022. V.62. P. 104002. Doi: 10.1088/1741-4326/ac881d.
5. Курские Г.С., Сахаров Н.В., Гусев В.К., Минаев В.Б., Мирошникова И.В., Петров Ю.В., Тельнова А.Ю., Бахарев Н.Н., Киселев Е.О., Жильцов Н.С., П. Б. Щеголев, Балаченков И.М., Варфоломеев В.И., Воронин А.В., Горяинов В.Ю., Дьяченко В.В., Жилин Е.Г., Ильясова М.В., Кавин А.А., Коновалов А.Н., Крикунов С.В., Лобанов К.М., Мельник А.Д., Mineev A.B., Новохацкий А.Н., Патров М.И., Петров А.В., Пономаренко А.М., Скрекель О.М., Соловей В.А., Солоха В.В., Ткаченко Е.Е., Токарев В.А., Толстяков С.Ю., Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Шулятьев К.Д., Яшин А.Ю. // Физика плазмы. 2023. Т. 49. С. 305.
6. Курские Г.С., Яньков В.В., Гусев В.К., Жильцов Н.С., Киселев Е.О., Крыжановский А.К., Минаев В.Б., Мирошников И.В., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Солоха В.В., Тельнова А.Ю., Теплова Н.В., Ткаченко Е.Е., Трошин Г.А., Тюхменева Е.А., Щеголев П.Б. // Письма ЖЭТФ. 2024. Т. 119. С. 34.
7. Петров Ю.В., Гусев В.К., Багрянский П.А., Балаченков И.М., Бахарев Н.Н., Варфоломеев В.И., Воронин А.В., Дьяченко В.В., Горяинов В.А., Жилин Е.Г., Жильцов Н.С., Ильясова М.В., Кавин А.А., Киселев Е.О., Коновалов А.Н., Крикунов С.В., Курские Г.С., Минаев В.Б., Мельник А.Д., Мирошников И.В., Новохацкий А.Н., Петров А.В., Пономаренко А.М., Сахаров Н.В., Скрекель О.М., Солоха В.В., Соломахин А.Е., Тельнова А.Ю., Ткаченко Е.Е., Токарев В.А., Толстяков С.Ю.,

- Тюхменева Е.А., Хилькевич Е.М., Хромов Н.А., Чернышев Ф.В., Шевелев А.Е., Шулятьев К.Д., Щеголев П.Б., Яшин А.Ю. // *Физика плазмы*. 2023. Т. 49. С. 1249.
8. Bakharev N.N., Melnik A.D., Chernyshev F.V. // *Atoms*. 2023. V. 11. P. 53.
Doi: 10.3390/atoms11030053.
9. Zhiltsov N.S., Kurskiev G.S., Tolstyakov S.Yu., Solovoy V.A., Koval A.N., Aleksandrov S.E., Bazhenov A.N., Chernakov P.V., Filippov S.V., Gusev V.K., Khromov N.A., Kiselev E.O., Kornev A.F., Krikunov S.V., Makarov A.M., Minaev V.B., Miroshnikov I.V., Mukhin E.E., Novokhatsky A.N., Patrov M.I., Petrov Yu.V., Sakharov N.V., Schegolev P.B., Telnova A.Yu., Tkachenko E.E., Tokarev V.A., Varfolomeev V.I., Voronin A.V. // arXiv:2311.18723.
Doi: 10.48550/arXiv.2311.18723.
10. Galkin S.A., Ivanov A.A., Medvedev S.Yu., Poshekhonov Yu.Yu. // *Nuclear Fusion*. 1997. V. 37. P. 1455.
Doi: 10.1088/0029-5515/37/10/I11.
11. Pliasova M.V., Shevelev A.E., Khilkevitch E.M., Bakharev N.N., Skrekel O.M., Minaev V.B., Doinikov D.N., Gin D.B., Gusev V.K., Kornev V.A., Naidev V.O., Novokhatskii A.N., Petrov Yu.V., Polunovsky I.A., Sakharov N.V., Shchegolev P.B., Telnova A.Yu., Varfolomeev V.I. // *Nuclear Inst. Methods Phys. Res. A*. 2022. V. 1029. P. 166425.
Doi: 10.1016/j.nima.2022.166425.

EFFECT OF LOCKED MHD MODES ON THE EFFICIENCY OF PLASMA HEATING BY THE NEUTRAL BEAM INJECTION METHOD AT THE GLOBUS-M2 SPHERICAL TOKAMAK

Yu. V. Petrov^a, I. M. Balachenkov^a, N. N. Bakharev^a, V. I. Varfolomeev^a,
A. V. Voronin^a, V. K. Gusev^a, N. S. Zhiltsov^a, A. A. Kavin^b, E. O. Kiselev^a,
G. S. Kurskiev^a, V. B. Minaev^a, I. V. Miroshnikov^a, A. N. Novokhatskii^a, N. V. Sakharov^a,
O. M. Skrekel^a, V. V. Solokha^a, A. Yu. Telnova^a, E. E. Tkachenko^a, V. A. Tokarev^a,
S. Yu. Tolstyakov^a, E. A. Tikhmeneva^a, N. A. Khromov^a, P. B. Shchegolev^a, and K. D. Shulyatyev^a

^a*Ioffe Institute, Russian Academy of Sciences, St. Petersburg, 194021 Russia*

^b*Efremov Research Institute of Electrophysical Apparatus, St. Petersburg, 196641 Russia*

*e-mail: yu.petrov@mail.ioffe.ru

A set of magnetic coils used to correct the error fields at the Globus-M2 spherical tokamak, which appear due to the imperfections of the production and assembly of the tokamak magnetic system, is described. The magnetic sensors that are used to monitor the locked helical MHD modes are also described. The results of experiments on detecting the locked modes in the discharges with plasma heating by neutral beam injection are presented. A correlation is found between the appearance of the locked modes accompanied by the loss of fast ions and the confinement of the main plasma.

Keywords: spherical tokamak, locked MHD modes, neutral beam heating