Письма в ЖЭТФ, том 116, вып. 5, с. 292 – 299

Спектроскопическая диагностика периферийной плазмы токамака "Глобус-М2" с использованием инжекции нейтрального гелия

В. М. Тимохин[+1)], *В. Ю. Сергеев*[+], *Е. А. Ануфриев*[+], *Д. Д. Коробко*[+], *И. А. Шаров*[+], *В. И. Варфоломеев*[*], *А. Н. Новохацкий*[*], *Н. Н. Бахарев*[*], *Е. О. Векшина*[+], *К. В. Долгова*[+], *Н. С. Жильцов*[*], *А. А. Кавин*[×], *В. Г. Капралов*[+], *Е. О. Киселев*[*], *А. Н. Коваль*[*], *Г. С. Курскиев*[+], *К. М. Лобанов*[×], *В. Б. Минаев*[*], *И. В. Мирошников*[*], *Е. Е. Мухин*[*], *Ю. В. Петров*[*], *В. А. Рожанский*[+], *Н. В. Сахаров*[*], *В. Г. Скоков*[+], *А. Ю. Тельнова*[*], *Е. Е. Ткаченко*[*], *В. А. Токарев*[*], *С. Ю. Толстяков*[*], *Е. А. Тюхменева*[*], *Н. А. Хромов*[*]

[+]*Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 С.-Петербург, Россия*

[*]*Физико-технический институт им. А. Ф. Иоффе РАН, 194021 С.-Петербург, Россия*

[×]*Акционерное общество "НИИЭФА им. Д. В. Ефремова", 196641 С.-Петербург, Россия*

Поступила в редакцию 6 июля 2022 г.
После переработки 28 июля 2022 г.
Принята к публикации 3 августа 2022 г.

Диагностика параметров периферийной плазмы по соотношению линий нейтрального гелия была включена в состав диагностического комплекса токамака "Глобус-М2". Проведены первые эксперименты по измерению параметров в периферийной области плазмы вблизи нижней X-точки. Измеренные пространственные распределения электронной температуры и плотности удовлетворительно согласуются с результатами моделирования с помощью кода SOLPS-ITER.

DOI: 10.31857/S1234567822170050, EDN: jsrsmg

1. Введение. Напуск гелия (He) в высокотемпературную плазму токамаков и стеллараторов активно используется для диагностических целей на большинстве современных установок с магнитным удержанием [1–4]. Детальную информацию о профилях плотности и температуры электронов на периферии и в диверторной области плазменного разряда позволяют получить спектральные измерения излучения на линиях нейтрального гелия (HeI) [3–5]. Для определения параметров плазмы удобно использовать отношение интенсивностей двух синглетных спектральных линий атома гелия HeI (668 нм)/HeI (728 нм), $(1s3d(^1D){-}1s2p(^1P^0))/(1s3s(^1S){-}1s2p(^1P^0))$, чувствительное к электронной плотности, а также отношение интенсивностей синглетной и триплетной линий HeI (728 нм)/HeI (706 нм), $(1s3s(^1S){-}1s2p(^1P^0))/(1s3s(^3S){-}1s2p(^3P^0))$, чувствительное к электронной температуре [4]. Использование гелия в качестве активного элемента диагностики предпочтительно, поскольку для него построение столкновительно-излучательной модели (СИМ) – относительно простая задача, а также он является продуктом термоядерной D-T реакции, так что его небольшой напуск не окажет заметного влияния на режим работы токамака-реактора. В данной работе приведены первые результаты диагностики, разработанной для токамака "Глобус-М2" и основанной на измерении соотношений интенсивности излучения линий атомарного гелия.

2. Устройство диагностики и схема эксперимента. Расположение основных элементов диагностики на токамаке "Глобус-М2" приведено на рис. 1 в виде трехмерной модели. Ключевым компонентом диагностики является четырехканальный зеркально-линзовый фильтровый полихроматор ФЛИП4, спроектированный в ФТИ им. Иоффе на основе быстрой монохромной камеры Phantom Miro M110 (матрица 1200×800 пикселей, динамический диапазон 12 бит) [6]. Он предназначен для регистрации изображения плазмы в спектре линий HeI 728, 706 и 668 нм. Четвертый канал полихроматора регистрирует излучение на длине волны 720 нм, в окрестности которой в плазме токамака "Глобус-М2" отсутствует линейчатое излучение и регистрируемый сигнал соответствует свечению непрерывного спектра (континуума). Изображение этого канала используется в процедуре обработки для вычитания фона континуума из сигналов первых трех каналов, что формирует полезный уровень линейчатого излучения. Матрица 2×2 изображений плазмы в свете четырех спектральных диапазонов регистрируются одной

1)e-mail: v.timokhin@spbstu.ru

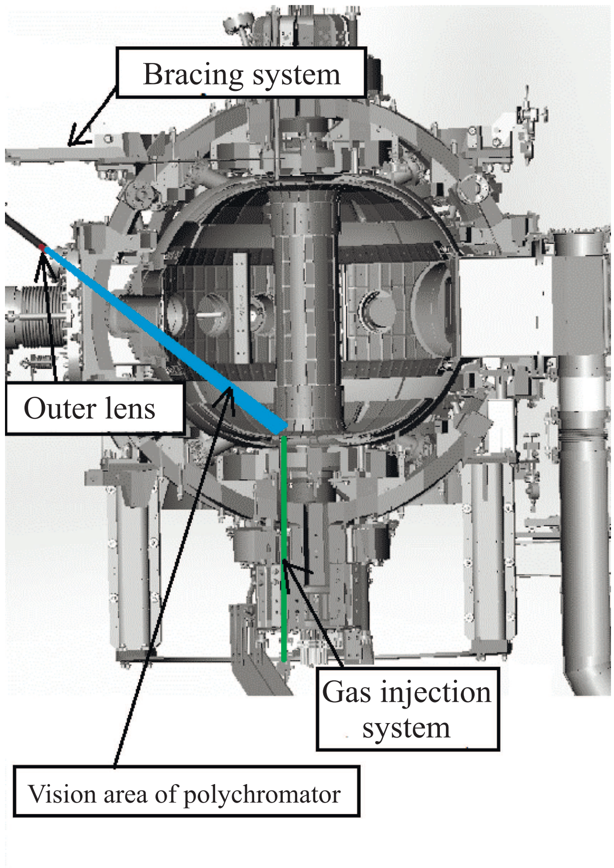

Рис. 1. (Цветной онлайн) Трехмерная модель токамака "Глобус-М2" с встроенными компонентами диагностики параметров периферийной плазмы по соотношению линий нейтрального гелия

камерой. Спектральное разрешение полихроматора определяется шириной полосы пропускания интерференционных фильтров и составляет величину около 1 нм. Оптическая система рассчитана на расстояние 1.2 м от объекта наблюдения до входной линзы объектива, размер области наблюдения составляет примерно 20×20 см в плоскости, перпендикулярной оптической оси полихроматора. Пространственное разрешение получаемых изображений было порядка 3 мм.

Относительная калибровка оптической системы осуществлялась с помощью калиброванного источника излучения Helios Labsphere USLR-V12F-NMNN. Целью данной процедуры было определение коэффициентов, описывающих пропускную способность оптической системы и чувствительность сенсора камеры в каналах полихроматора. Это необходимо для корректного восстановления отношений интенсивностей соответствующих спектральных линий испускания HeI. Тестовые испытания полихроматора проводились в эксперименте с фиксацией изображения гелиевой струи, формируемой плазменной пушкой, которая входит в диагностический комплекс установки "Глобус-М2" [7]. Основные результаты этих экспериментов приведены в работе [8], где также более подробно описано устройство и принцип работы полихроматора.

Полихроматор крепится к элементам конструкции токамака "Глобус-М2" через соединительный узел посредством юстировочного устройства. Данное устройство обеспечивает жесткое крепление к верхнему кольцу обмотки тороидального поля токамака и возможность настройки положения полихроматора относительно вертикальной и экваториальной плоскостей установки в пределах $\pm 10°$. Конструкция системы крепления полихроматора позволяет также демпфировать его вибрации амплитудой менее 1 мм, которые могут возникать во время плазменного разряда из-за деформации элементов конструкции токамака под действием электромагнитных сил.

Другим важным элементом диагностики является система инжекции гелиевой струи. Система работает следующим образом: газ из баллона с гелием через газовую магистраль с регулируемым давлением подается на пьезоэлектрический клапан, расположенный в непосредственной близости от нижнего фланца ДУ-20 установки. Конец капилляра находится в точке с координатами $R = 24$ см (большой радиус, отсчитывается от центра установки) и $Z = -51$ см (расстояние от экваториальной плоскости по вертикали). При подаче управляющего напряжения пьезоклапан обеспечивает газонапуск в камеру токамака через капилляр с внутренним диаметром 0.5 и длиной 870 мм. Основные параметры системы инжекции гелия следующие: поток гелия – до 10^{21} ат/с; натекание через закрытый клапан при давлении 1 атм – не более 2×10^{12} ат/с; время открытия клапана – не более 3 мс; максимальное давление за клапаном – не более 3.5 атм.

Полихроматор, расположенный выше экваториальной плоскости установки, под углом 45° к ней, направлен на патрубок системы инжекции гелиевой струи, размещенной в нижней части вакуумной камеры токамака (см. рис. 1). Регистрация излучения вдоль хорд наблюдения проводилась вблизи сепаратрисы плазменного шнура в области нижней X-точки. Локальность измерений вследствие интегрирования излучения вдоль луча наблюдения определяется линейными размерами струи и ухудшается с увеличением ее размеров. В эксперименте достигался высокий контраст излучения гелия вблизи капилляра по сравнению с его излучением из других областей плазмы, что реализовывалось в данном эксперименте подбором инжектируемого потока He. Запуск камеры полихроматора, программы подачи управляющего напряжения на газовый клапан, системы сбора данных и диагностик токамака обеспечивается с помощью штатного синхронизатора установки "Глобус-М2", включение которого осуществляется с пульта ведущего экспериментатора.

3. Результаты эксперимента. Эксперименты по напуску гелия в плазму токамака "Глобус-М2" проводились в рамках весенне-летней экспериментальной кампании 2021 г. Были получены данные в примерно 70 разрядах с инжекцией гелия для различных режимов работы установки и системы газонапуска. В большинстве случаев гелий напускался в режиме, обеспечивающем малый поток газа, с целью минимизировать возмущение измеряемых параметров плазмы. Клапан находился в открытом состоянии на протяжении всей квазистационарной стадии разряда токамака ~ 100 мс. Давление гелия за клапаном составляло величину 1.8 атм.

Для анализа была выбрана серия воспроизводимых разрядов ## 40269-40271 с наиболее полным набором экспериментальных данных и с максимально контрастным изображением струи в каналах полихроматора. Ниже представлены результаты для наиболее типичного разряда # 40269 с режимом омического нагрева плазмы при следующих значениях основных параметров на квазистационарной стадии разряда: тороидальное магнитное поле 0.8 Тл, ток по плазме 300 кА, средняя вдоль хорды с $R = 42$ см линейная электронная плотность 2.3×10^{15} см$^{-2}$.

Временная эволюция параметров плазмы в рассматриваемом разряде приведена на рис. 2. Отсчет времени ведется от импульса старта разряда токамака (100 мс до начала подъема тока по плазме). Пробой разряда происходит примерно на 110 мс, что видно по вспышке на сигнале D_α. Квазистационарной стадии разряд достигает примерно на 170 мс, после чего основные параметры меняются незначительно. Анализируемый ниже кадр камеры полихроматора спектроскопической диагностики по времени примерно соответствует началу квазистационарной стадии разряда, момент снимка обозначен на рисунке 2 вертикальной стрелкой. Струя гелия начинает формироваться в плазме после 160-й мс, с задержкой примерно 40 мс, относительно подачи управляющего напряжения на клапан на 120-й мс. Как видно из рис. 2, напуск гелия не приводит к сколько-нибудь заметному падению периферийной температуры электронов, росту плотности или увеличению сигнала D_α. Разряд заканчивается срывом на 210 мс, хорошо заметным по сигналу D_α.

Кадр полихроматора, полученный на 171 мс данного разряда, приведен на рис. 3. Снимок выбирался из соображений хорошей контрастности изображения струи. Время экспозиции кадров в данном разряде составляет 220 мкс, частота кадров камеры полихроматора – 1.6 кГц, что позволяет сделать ~ 100 снимков в течении разряда токамака "Глобус-М2". Снимок содержит изображения инжектированной в плазму гелиевой струи в четырех линиях: 1) 728 нм, 2) 706 нм, 3) 668 нм, 4) 720 нм. Нумерация каналов полихроматора, направление инжекции и оси координат установки показаны на рис. 3. Из представленных изображений каналов 1)–3) по размерам светящейся области видно, что струя проникает в плазму на глубину около 10 см, причем поперечный разлет не составляет величину примерно 5 см. Поперечный размер струи определяет область пространственного усреднения регистрируемых линий гелия, а значит и область усреднения измеряемых параметров вдоль направления оси наблюдения полихроматора. Размеры и форма струи сохраняются во всех регистрируемых спектральных линиях с учетом зеркального отражения изображений в каналах 1) и 3) относительно каналов 2) и 4), что связанно с особенностями формирования изображений в каналах полихроматора [8]. В канале 3) с наилучшей контрастностью изображения возможно различить положение конца капилляра. На кадрах, полученных в момент срыва разряда, можно наблюдать элементы конструкции вакуумной камеры (центральный столб, патрубок, границы графитовых плиток покрытия камеры). По известному положению данных элементов внутри камеры токамака осуществлялась пространственная привязка изображений к координатам установки R и Z.

Размеры светящегося облака,наблюдаемого в различных линиях нейтрального гелия, сопоставлялись с оценками распределения плотности возбужденных атомов, соответствующих верхним уровням регистрируемых спектральных переходов. Оценки производились следующим образом.По скейлингу газодинамического разлета газа из отверстия в вакуум, приведенному в работе [9], рассчитывалось распределение плотности атомов гелия $n_{\mathrm{He}}(Z)$ на оси инжекции. Падение плотности за счет газодинамического разлета, показанное зеленой штрихпунктирной кривой на рис. 4, усиливается процессами ионизации и перезарядки, которые учитывались с использованием выражения [10]:

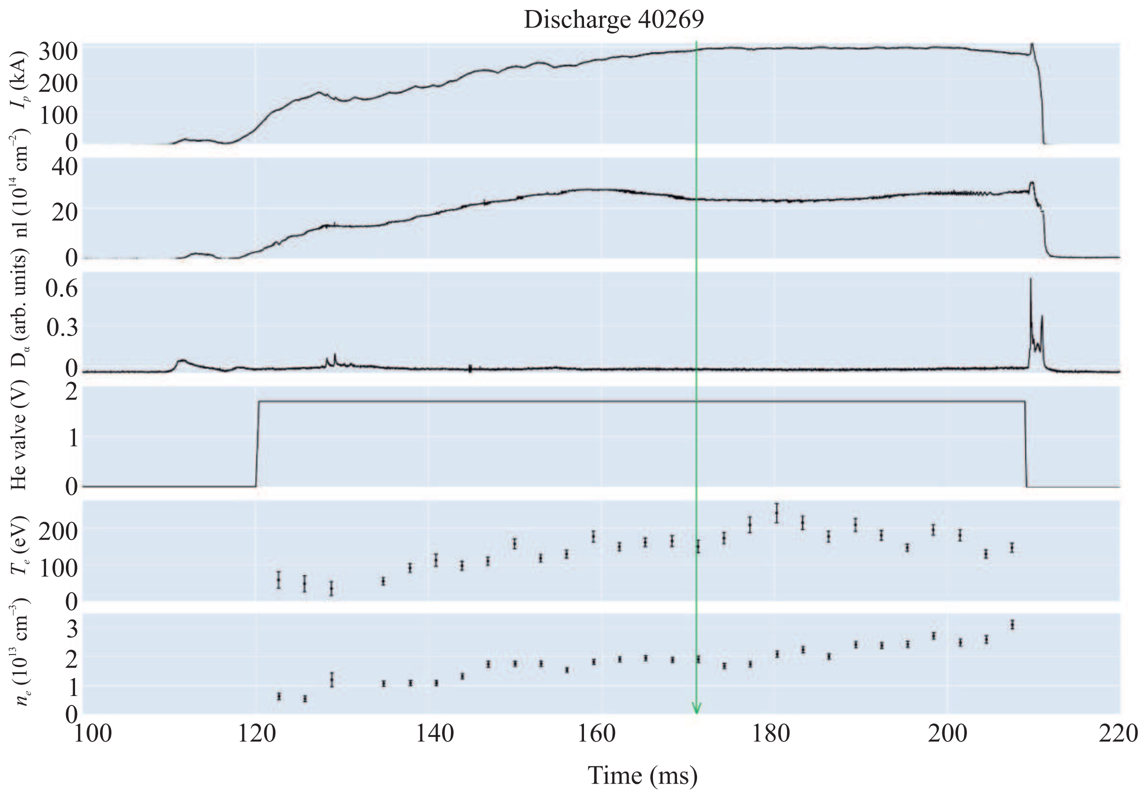

Рис. 2. (Цветной онлайн) Временная эволюция основных параметров плазмы токамака "Глобус-М2" в разряде 40269: I_p – ток плазмы; nl – линейная плотность электронов по данным интерферометра ($R = 42$ см); D_α – сигнал широкообзорного детектора Лаймановской серии дейтерия; He valve – управляющее напряжение на клапане системы газонапуска диагностики; T_e, n_e – электронные температура и плотность по данным периферийного канала диагностики томсоновского рассеяния ($R = 56$ см). Вертикальной стрелкой обозначен момент снимка камеры полихроматора, приведенного на рис. 3

$$\frac{dI}{dx} = -n\left(\sigma_{ch} + \sigma_i + \frac{\langle\sigma_e v_e\rangle}{v_b}\right) I,$$

где I – интенсивность пучка атомов гелия, v_b – скорость атомов гелия вдоль капилляра, σ_{ch}, σ_i, σ_e – сечения процессов перезарядки, ионизации ионным и электронным ударом соответственно. Величины сечений процессов, приведенные в работах [11–13] показали, что в рассматриваемых условиях, доминирующую роль играют процессы ионизации электронным ударом. Профили плотности и температуры электронов брались из расчета по коду SOLPS-ITER [14]. По известному сечению возбуждения $\langle\sigma v\rangle(T_e)$ основного состояния гелия на верхний уровень перехода, соответствующего наблюдаемой спектральной линии 706 нм,взятому из работы [15], оценивалась интенсивность линии, наблюдаемой во втором канале полихроматора:

$$I_{706}(Z) \sim n_{\mathrm{He}}(Z) n_e(Z) \langle\sigma v\rangle(T_e(Z)).$$

Результаты измерения и оценки распределения $I_{706}(Z)$ вдоль оси инжекции гелия приведены на рис. 4. Видно разумное соответствие наблюдаемых и оцененных продольных размеров облака нейтрального He. Некоторое отличие рассчитанного профиля от измеренного можно объяснить отсутствием учета ряда элементарных процессов, влияющих на заселенность рассматриваемого уровня (рекомбинация, спонтанные переходы и т.п.).

4. Результаты измерений диагностики и их обсуждение. Профили электронной температуры и концентрации, представленные на рис. 5, рассчитывались вдоль оси инжекции гелиевой струи, расположенной на $R = 24$ см и совпадающей по направлению с вертикальной осью Z установки. Процедура обработки изображений полихроматора (см. рис. 3) включает в себя выделение полезной части сигнала, взаимную привязку каналов между собой, применение двумерного сглаживания в окне 3×3 пикселя. Для расчета значений электронных температуры и плотности по отношению линий использовались результаты расчетов столкновительно-излучательной модели (СИМ),приведенные в работе [5].

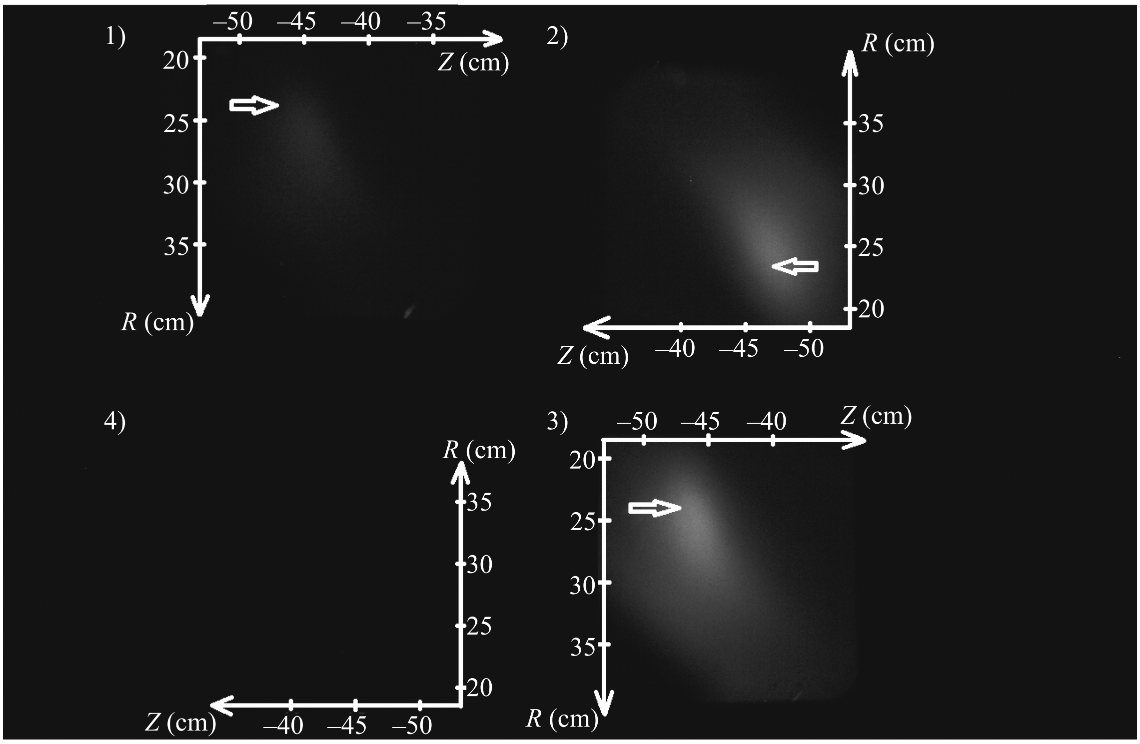

Рис. 3. Типичный снимок гелиевой струи камеры полихроматора спектроскопической диагностики периферийной плазмы токамака "Глобус-М2" в разряде 40269, 171 мс. Нумерация каналов полихроматора, направление инжекции относительно канала и оси координат установки обозначены белым. Длины волн, регистрируемые каналами полихроматора 1) 728 нм, 2) 706 нм, 3) 668 нм, 4) 720 нм

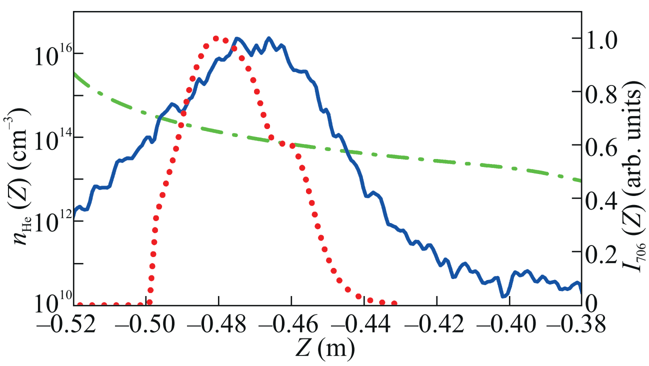

Рис. 4. (Цветной онлайн) Оценка глубины проникновения струи нейтрального гелия в плазму для 171 мс разряда 40269. Положение конца капилляра соответствует -0.52 м. Кривыми показаны: штрих-пунктир – расчетный профиль $n_{\mathrm{He}}(Z)$; сплошная – нормализованный экспериментальный профиль $I_{706}(Z)$; точки – нормализованная оценка $I_{706}(Z)$

Результаты обработки изображений He струи в каналах полихроматора, представленных на рис. 3, приведены на рис. 5: (a) – профили интенсивностей линий в каналах полихроматора вдоль оси инжекции; (b) – профили отношений интенсивностей линий, на основании которых по СИМ рассчитывались электронные плотность (c) и температура (d). Профили электронных температуры $T_e(Z)$ и плотности $n_e(Z)$ лежат в диапазоне 20–40 эВ и $(1-2)\times10^{13}$ см$^{-3}$ соответственно. Профиль температуры имеет растущий характер, а плотность спадает в области измерений вдоль Z по направлению к центральным областям плазмы. Область измерений находится вблизи сепаратрисы, обозначена вертикальной линией на рис. 5c, d и составляет величину примерно 4 см вдоль вертикальной оси установки. Такая относительно узкая область измерений определяется, с одной стороны, принципиальным ограничением СИМ, не позволяющим различать отношения линий в области температур ниже 10 эВ (Z меньше -0.47 м), с другой стороны интенсивность регистрируемых линий падает до уровня шумов в области Z больше -0.43 м вдоль оси инжекции (см. рис. 5a).

Результаты оценок возможных источников ошибок определения n_e, T_e по абсолютной величине показывают, что погрешность измерения параметров плазмы определяется, в основном, ошибками их восстановления по результатам расчетов СИМ и составляет величину ≤ 20 %. Точность привязки измерен-

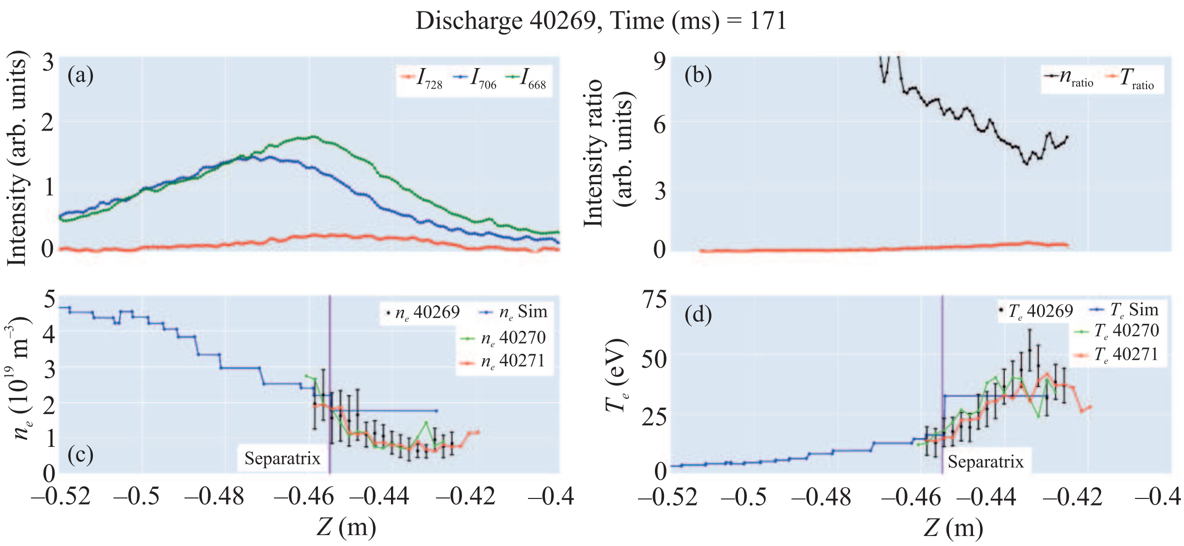

Рис. 5. (Цветной онлайн) Результаты обработки снимка полихроматора (рис. 3) в разряде 40269 на 171 мс, представленные вдоль оси капилляра системы газонапуска Z; (a) – Распределение интенсивности линий в каналах полихроматора. (b) – Распределение отношений интенсивностей линий (синглет-триплетному переходу соответствует красная линия, синглет-синглетному – черная). (c) – Профиль электронной плотности и (d) – профиль электронной температуры (черные точки с планками погрешностей) в сравнении с параметрами, рассчитанными по коду SOLPS-ITER (синие линии), и в сравнении с другими разрядами серии (зеленые и красные линии для разрядов 40270 и 40271 соответственно). Расчетное положение сепаратрисы на нижних графиках обозначено вертикальной фиолетовой линией

ных параметров к координатам установки определяется разрешением камеры полихроматора и составляет величину в несколько миллиметров. В то же время пространственное усреднение за счет ширины гелиевой струи характеризуется шириной около 5 см, что определяет пространственное разрешение измеренных профилей вдоль оптической оси полихроматора.

Результаты измерений сравнивались с расчетами по коду SOLPS-ITER [14], представляющему собой объединение кодов B2.5 и EIRENE, в котором решается гидродинамическая система уравнений Брагинского для 0, 1, 2 моментов функции распределения плазмы в самосогласованных электрических полях с учетом токов и дрейфов. Расчет по коду был адаптирован специально для моделирования рассматриваемого разряда 40269 токамака "Глобус-М2". Для этого были подобраны значения профилей электронных теплопроводности и плотности, а также учтены граничные условия для описания экспериментальных данных диагностики томсоновского рассеяния на периферии рассматриваемого разряда, показанных на рис. 2.

Для пространственной привязки измеренных и расчетных профилей n_e, T_e анализировалась карта магнитных поверхностей плазмы в рассматриваемом разряде. На рисунке 6 на фоне элементов конструкции вакуумной камеры токамака изображены ось инжекции и сепаратрисы, рассчитанные по двум различным методикам: по коду магнитного равновесия PET [16] (обозначена синим цветом) и методом токовых колец МСС [17] (обозначена черным цветом). На данном рисунке область измерений диагностики выделена жирным отрезком на оси инжекции. Из рисунка 6 видно, что неопределенность положения сепаратрисы в радиальном направлении составляет ве-

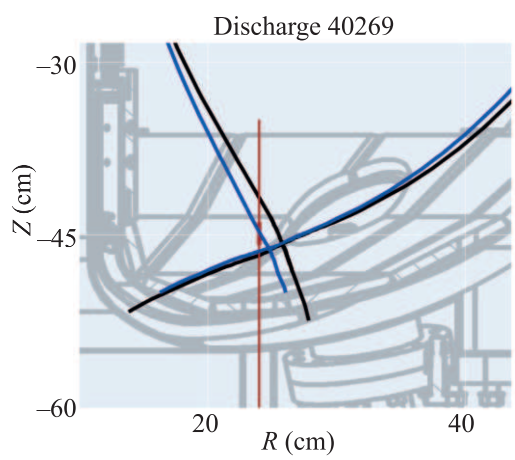

Рис. 6. (Цветной онлайн) Область измерений и положение сепаратрисы разряда 40269, рассчитанное по различным методикам

личину в пределах 1–1.5 см. Экспериментальные измерения положения точек удара на пластинах стенки токамака в диверторной области, сделанные по данным тепловизора [18], подтверждают эту оценку. Положения точек удара соответствуют пересечению внутренней и внешней "ног" сепаратрисы со стенкой токамака и идентифицируются как тороидально симметричные кривые повышенной температуры поверхности дивертора на снимках тепловизора. Для оценки положения точки пересечения оси инжекции с сепаратрисой использовался расчет магнитных потоков по коду PET. Неточности расчетов магнитной конфигурации вблизи X-точки, о которых говорилось выше, позволяют допустить смещение ее положения на величину в 1.5 см по направлению к центру установки, что соответствует смещению точки пересечения сепаратрисы с осью инжекции на 4–5 см по направлению к экваториальной плоскости установки.

Профили электронных температуры и плотности, рассчитанные по коду SOLPS-ITER (синие линии), а также измеренные в разрядах 40269 (черные точки с планками погрешностей), 40270 (зеленые линии) и 40271 (красные линии) профили представлены на рис. 5c, d с использованием описанной выше процедуры привязки измеренных параметров к результатам моделирования. Видно неплохое соответствие рассчитанных и измеренных параметров как по величине, так и по характеру их зависимостей от расстояния до сепаратрисы. Плотность падает при пересечении сепаратрисы в направлении от периферии к центру плазмы, а температура имеет в этой области заметный рост и достигает значений несколько десятков эВ. Такое поведение параметров вполне соответствует результатам моделирования периферийных областей плазмы токамака "Глобус-М2" в области нижней X-точки, подробно описанным в работе [19]. Значения плазменных параметров разрядов одной серии с близкими магнитными равновесиями и характер их поведения также не противоречат друг другу и данным моделирования.

5. Заключение. Методом гелиевой спектроскопии впервые измерены профили электронной температуры и концентрации в области нижней X-точки токамака "Глобус-М2". Сравнение измеренных профилей параметров плазмы вдоль оси инжекции с данными, полученными путем моделирования по коду SOLPS-ITER, дает близкие величины при схожем характере поведения профилей с учетом погрешностей их измерений и пространственной привязки. Экспериментально измерено снижение электронной плотности и рост электронной температуры при приближении к сепаратрисе в обдирочном слое со стороны сильного магнитного поля. Оценки глубины проникновения струи нейтрального гелия в плазму неплохо соответствуют наблюдаемым размерам облака.

Настоящая работа поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту # 0784-2020-0020 с использованием Федерального центра коллективного пользования "Материаловедение и диагностика в передовых технологиях" ФТИ им. А. Ф. Иоффе, включающего Уникальную научную установку "Сферический токамак Глобус-М".

1. С.И. Лашкул, А.Б. Алтухов, В.В. Дьяченко, Л.А. Есипов, М.Ю. Кантор, Д.В. Куприенко, А.Д. Лебедев, Я.А. Никерман, А.Ю. Попов, Физика плазмы **38**, 923 (2012).
2. S.J. Zweben, J.L. Terry, D.P. Stotler, and R.J. Maqueda, Rev. Sci. Instrum. **88**, 041101 (2017).
3. M. Griener, E. Wolfrum, M. Cavedon, R. Dux, V. Rohde, M. Sochor, J.M. Muñoz Burgos, O. Schmitz, U. Stroth, and ASDEX Upgrade Team, Rev. Sci. Instrum. **89**, 10D102 (2018).
4. J.M. Muñoz Burgos, M. Agostini, P. Scarin, D.P. Stotler, E.A. Unterberg, S.D. Loch, O. Schmitz, K. Tritz and D. Stutman, Phys. Plasmas **23**, 053302 (2016).
5. W. Zholobenko, M. Rack, D. Reiter, M. Goto, Y. Feng, B. Küppers, and P. Börner, Nucl. Fusion **58**, 126006 (2018).
6. Spectral Tech. Plasma spectroscopy tools, https://spectraltech.ru/plasma_spectroscopy.
7. А.В. Воронин, В.К. Гусев, Я.А. Герасименко, Ю.В. Судьенков, ЖТФ **83**(8), 36 (2013).
8. V.M. Timokhin, A.I. Rykachevskii, I.V. Miroshnikov, V.Yu. Sergeev, M.M. Kochergin, A.N. Koval', E.E. Mukhin, S.Yu. Tolstyakov, and A.V. Voronin, Technical Physics Letters **42**, 775 (2016).
9. В.Г. Дулов, Г.А. Лукьянов, *Газодинамика процессов истечения*, Наука, Новосибирск (1984), формула (4.18), с. 81.
10. J. Wesson, *Tokamaks*, 4-th ed., Oxford University Press, Oxford (2011).
11. K.L. Bell, H.B. Gilbody, J.G. Hughes, A.E. Kingston, and F.J. Smith, J. Phys. Chem. Ref. Data **12**(4), 891 (1983).
12. R. Hoekstra, H.P. Summers, and F.J. de Heer, Nucl. Fusion: Atom. Plasma-Mater. Interact. Data Fusion **3**, 63 (1992).
13. I.D. Kaganovich, E. Startsev, and R.C. Davidson, New J. Phys. **8**, 278 (2006).

14. V. A. Rozhansky, S. P. Voskoboynikov, E. G. Kaveeva, D. P. Coster, and R. Schneider, Nucl. Fusion **41**, 387 (2001).
15. R. K. Janev, W. D. Langer, D. E. Post, and K. Evans, *Elementary Processes in Hydrogen-Helium Plasmas*, Springer Series on Atoms + Plasmas, N.Y. (1987), v. 4.
16. S. A. Galkin, A. A. Ivanov, S. Yu. Medvedev, and Yu. Yu. Poshekhonov, Nucl. Fusion **37**(10), 1455 (1997).
17. N. V. Sakharov, A. V. Voronin, V. K. Gusev, A. A. Kavin, S. N. Kamenshchikov, K. M. Lobanov, V. B. Minaev, A. N. Novokhatsky, M. I. Patrov, Yu. V. Petrov, and P. B. Shchegolev, Plasma Physics Reports **41**(12), 997 (2015).
18. Yu. V. Petrov, V. K. Gusev, N. V. Sakharov et al. (Collaboration), Nucl. Fusion **62**, 042009 (2022).
19. D. S. Sorokina, I. Yu. Senichenkov, V. A. Rozhansky, and E. O. Vekshina, Phys. Plas. **25**, 122514 (2018).