

УДК 533.9

## ПЕРВЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ ПО УМЕНЬШЕНИЮ ТЕПЛОВОЙ НАГРУЗКИ НА ДИВЕРТОРНЫЕ ПЛАСТИНЫ ТОКАМАКА ГЛОБУС-М2 С ПОМОЩЬЮ ИНЖЕКЦИИ АЗОТА И СОПОСТАВЛЕНИЕ С РЕЗУЛЬТАТАМИ МОДЕЛИРОВАНИЯ

© 2023 г. Н. А. Хромов<sup>а,\*</sup>, Н. Н. Бахарев<sup>а</sup>, Е. О. Векшина<sup>б</sup>, В. К. Гусев<sup>а</sup>, К. В. Долгова<sup>б</sup>,  
Н. С. Жильцов<sup>а</sup>, Е. О. Киселев<sup>а</sup>, Г. С. Курскиев<sup>а</sup>, В. Б. Минаев<sup>а</sup>, И. В. Мирошников<sup>а</sup>,  
П. А. Молчанов<sup>б</sup>, А. Н. Новохацкий<sup>а</sup>, Ю. В. Петров<sup>а</sup>, В. А. Рожанский<sup>б</sup>, Н. В. Сахаров<sup>а</sup>,  
А. Ю. Тельнова<sup>а</sup>, В. М. Тимохин<sup>б</sup>, Е. Е. Ткаченко<sup>а</sup>, В. А. Токарев<sup>а</sup>,  
Е. А. Тюхменева<sup>а</sup>, П. Б. Щеголев<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

<sup>б</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

\*e-mail: Nikolay.Khromov@mail.ioffe.ru

Поступила в редакцию 27.07.2023 г.

После доработки 10.11.2023 г.

Принята к публикации 10.11.2023 г.

На компактном сферическом токамаке Глобус-М2 проведена серия экспериментов для изучения влияния инжекции азота на параметры разряда. Эксперименты проводились в дейтериевых разрядах в диверторной конфигурации, дополнительный нагрев осуществлялся пучком нейтрального дейтерия. При инжекции было зафиксировано значительное уменьшение электронной температуры вблизи дивертора и резкое падение плотности теплового потока на диверторные пластины, при этом плотность и температура в основной плазме изменялись незначительно. Моделирование с помощью кода SOLPS-ITER показало удовлетворительное согласие с экспериментом.

*Ключевые слова:* токамак, дивертор, пристеночная плазма, ленгмюровские зонды, напуск излучающей примеси

**DOI:** 10.31857/S0367292123601029, **EDN:** CFFAWX

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Значения плотности потока тепла на диверторные пластины в современных и проектируемых токамаках могут превышать 10 МВт/м<sup>2</sup>. Такие тепловые нагрузки на обращенные к плазме компоненты делают невозможной стационарную работу установки. Наиболее перспективным путем решения данной проблемы считается режим с “отрывом” дивертора (divertor detachment) [1]. В таком режиме большая часть энергии, которую выносят заряженные частицы из зоны удержания, переходит в излучение, что предотвращает чрезмерный нагрев диверторных пластин. В этих условиях наблюдаются значительные градиенты давления вдоль силовых линий магнитного поля в пристеночной плазме, и температура электронов около диверторных пластин снижается вплоть до величины порядка единиц эВ. Отрыв дивертора обычно достигается увеличением плотности плазмы, которое сопровождается напуском сильно излучающей примеси. Подобные эксперименты с успехом проводились на различ-

ных токамаках: JT-60U, JET, C-Mod, DIII-D, ASDEX Upgrade [2]. Например, в экспериментах на токамаке ASDEX Upgrade [3] в разрядах со стабильным режимом улучшенного удержания (H-мода) с помощью инжекции азота был получен полный отрыв на внешней и внутренней диверторных пластинах при суммарной мощности нагрева до 12 МВт. При этом на пластинах наблюдалось уменьшение электронной температуры с 30 до 1–2 эВ и плотности теплового потока в три раза. Эффективный заряд плазмы увеличился с 1.3–1.4 до 1.8–2.0, давление плазмы в центральной части плазменного шнура уменьшалось на 10%. На токамаке COMPASS, который имеет схожие с Глобусом размеры, проводились эксперименты с инжекцией азота с целью получения отрыва в разрядах с омическим нагревом [4]. Было зарегистрировано значительное уменьшение плотности теплового потока на внешней пластине, но оно сопровождалось существенным увеличением излучения из центральной области плазмы и ухудшением удержания. Можно предполо-

жить, что это связано с тем, что в компактных токамаках (где длина магнитной линии от экваториальной плоскости до пластин мала) и в токамаках с открытым дивертором получение режимов “отрыва” затруднено [2]. В качестве излучающей примеси обычно используют азот, неон или аргон. Так как электронная температура вблизи сепаратрисы на токамаке Глобус-М2, как правило, не превышает 70 эВ, то максимум излучения примеси должен быть при этих или более низких значениях, чтобы диссипация тепла происходила в пристеночной плазме. При больших электронных температурах интенсивность излучения должна снижаться, чтобы предотвратить деградацию параметров в области удержания. Сравнение различных излучающих примесей сделано в работе [5] с использованием суммарного коэффициента радиационных потерь  $L_z$ , который является функцией температуры электронов и определяется как отношение мощности излучения к производству объема плазмы, концентрации электронов и концентрации примеси. Данный коэффициент рассчитывается на основе столкновительно-излучательной модели с учетом процессов ионизации, рекомбинации и линейчатого излучения. В отличие от неона и аргона,  $L_z$  для азота имеет высокие значения при температурах электронов меньше 20 эВ и при этом достаточно низкие при температурах электронов более 50 эВ. Таким образом азот представляется оптимальной излучающей примесью для условий описываемых исследований. В данной работе приведены результаты экспериментов с инжекцией азота на токамаке Глобус-М2 и последующего моделирования.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

Глобус-М2 является компактным сферическим токамаком с открытым дивертором и графитовой защитой первой стенки, большого радиуса равен  $R = 36$  см, малый  $a = 24$  см. Тороидальное магнитное поле может достигать 0.9 Тл, ток плазмы 450 кА. Система обмоток полоидального магнитного поля позволяет создавать диверторную конфигурацию как с верхним, так и с нижним положением X-точки, а также с двумя X-точками. Так как тороидальный дрейф ионов на токамаке Глобус-М2 направлен вниз, то в большинстве экспериментов используется магнитная конфигурация с нижней X-точкой. Напуск азота осуществлялся через капилляр на нижнем куполе в приватной области (private flux region) ( $R = 24$  см). Внутренний диаметр капилляра составлял 0.5 мм, длина 870 мм, давление газа в баллоне с азотом составляло 1.5 атм. Интенсивность и длительность напуска регулировались с помощью пьезоэлектрического клапана по заданной программе. Температура и плотность электронов в экваториальной плоскости измерялись диагностикой том-

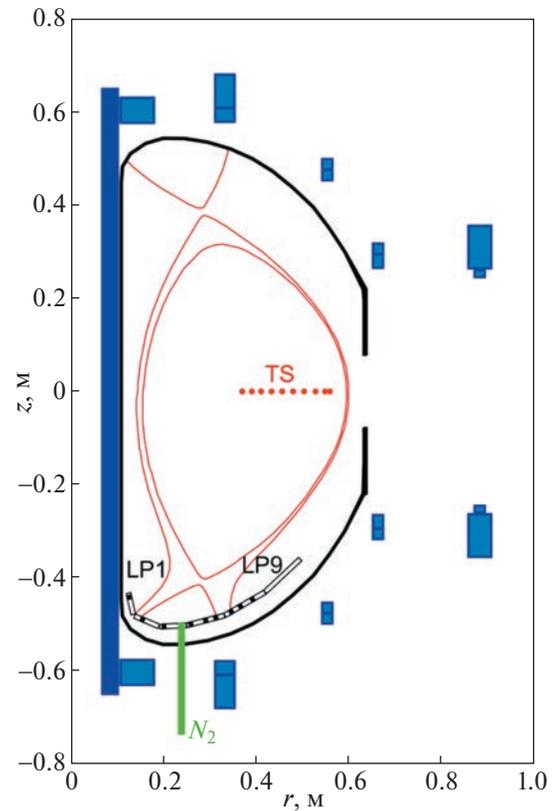
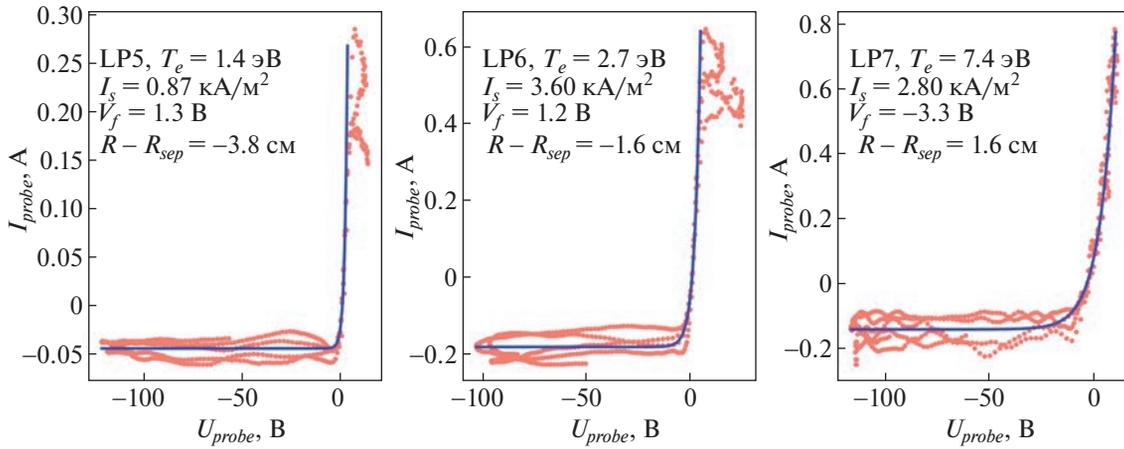


Рис. 1. Расположение диверторных ленгмюровских зондов (LP1–LP9), пространственных точек измерения диагностики томсоновского рассеяния (TS), сепаратрис и капилляра для инжекции азота в описываемых экспериментах. Зонд LP10 имеет ту же координату по большому радиусу, что и зонд LP6.

соновского рассеяния (TS) в десяти пространственных точках с частотой до 330 Гц, временное разрешение составляло 15 нс [6]. Для получения параметров плазмы вблизи дивертора использовались десять плоских ленгмюровских зондов (LP), встроенных в нижние диверторные пластины. Их расположение, а также магнитная конфигурация, которая устанавливалась в данных экспериментах, показаны на рис. 1. В большей части экспериментов работали 6 зондов на внешней пластине, так как на нее идут основные потоки тепла и частиц [7]. Измерения осуществлялись путем снятия зондовых вольтамперных характеристик (ВАХ), при этом потенциал зондов относительно камеры токамака изменялся в диапазоне от  $-120$  до  $40$  В с частотой около 2.5 кГц. Подробно эта диагностика описана в работе [8]. Следует отметить, что измерение низких ( $< 5$  эВ) электронных температур с помощью диверторных ленгмюровских зондов часто сопряжено со значительными трудностями. Эта проблема детально анализируется в [9], где указывается, что возможными причинами могут быть флуктуации



**Рис. 2.** Вольтамперные характеристики трех диверторных ленгмюровских зондов на внешней пластине при инъекции азота. Разряд #40459,  $t = 190.6$  мс. Запись осуществлялась в течение 1 мс, сплошная линия показывает аппроксимацию для нахождения электронной температуры, ионного тока насыщения и плавающего потенциала.

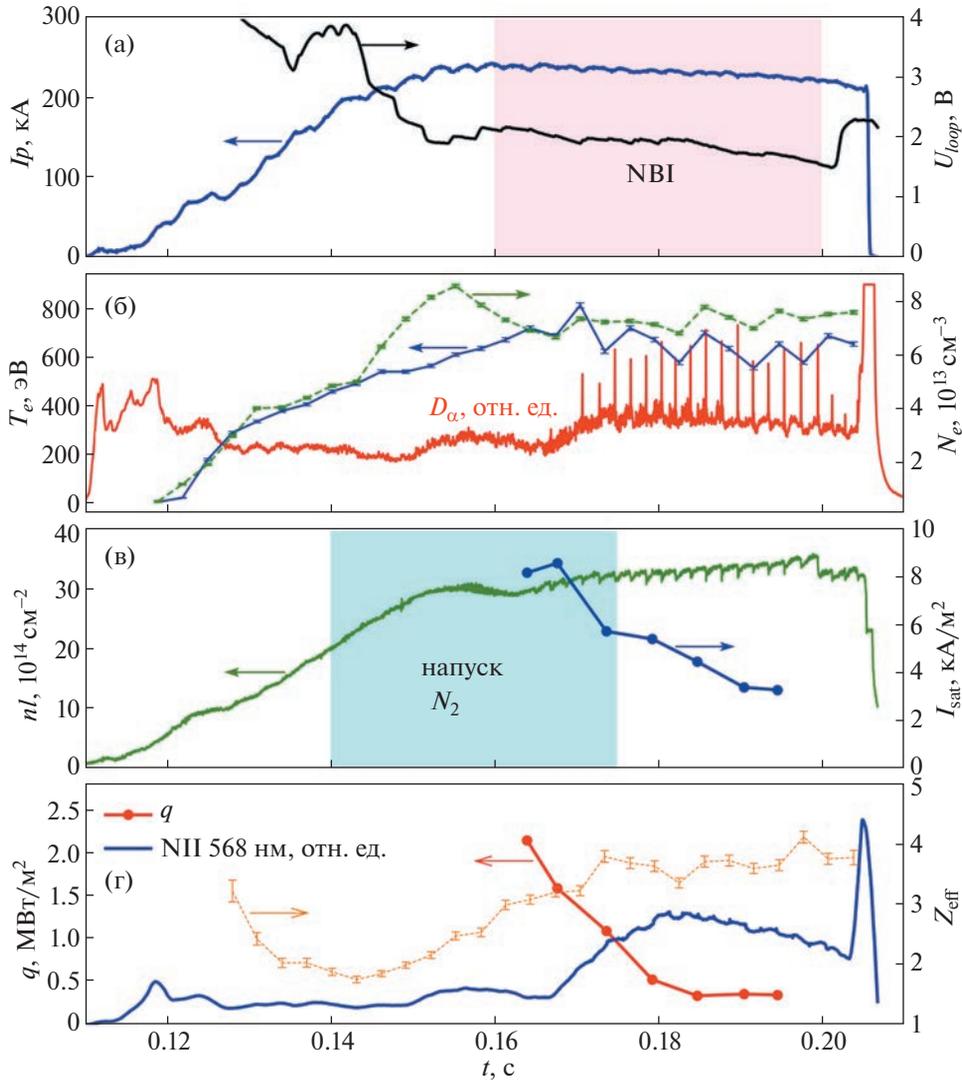
плотности и температуры электронов, ненулевое сопротивление плазмы и электронных цепей системы регистрации, а также ограничения зондового тока из-за конечной площади опорного электрода. В данных экспериментах достаточно уверенно регистрировались температуры  $< 3$  эВ, что, по-видимому, в основном связано с относительно низким тороидальным магнитным полем, которое свойственно сферическим токамакам и расположением зондовой схемы на минимально возможном расстоянии от диверторных пластин. Для иллюстрации на рис. 2 приведены зондовые вольт-амперные характеристики во время инъекции азота. С целью уменьшения влияния плазменных флуктуаций производилась запись нескольких характеристик в течение 1–2 мс, которые затем обрабатывались совместно. Зондовые характеристики имеют более или менее “классический” вид, четко видна область ионного тока насыщения и экспоненциальный рост электронного тока. Несмотря на плоскую форму зондов, угол между их поверхностью и силовыми линиями магнитного поля в описываемых экспериментах превышал  $5^\circ$ . В этом случае, согласно [10], вольтамперную характеристику зонда на участке ниже потенциала плазмы можно описать формулой

$$I_{pr} = I_{isat} \left[ \exp \left\{ e(V_{pr} - V_{fl}) / kT_e \right\} - 1 \right], \quad (1)$$

где  $I_{pr}$  и  $V_{pr}$  – ток зонда и напряжение на нем,  $I_{isat}$  – ионный ток насыщения,  $T_e$  – температура электронов и  $V_{fl}$  – плавающий потенциал. Для нахождения этих трех параметров экспериментально записанная ВАХ аппроксимировалась зависимостью (1) с помощью стандартного математического пакета.

### 3. ВРЕМЕННЫЕ ЗАВИСИМОСТИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПРИ ИНЖЕКЦИИ АЗОТА

Эксперименты проводились в дейтериевых разрядах с двумя X-точками. Нижняя X-точка относилась к основной (внутренней) сепаратрисе, так что основная часть потока тепла поступала на нижние диверторные пластины. Тороидальное магнитное поле равнялось  $0.7$  Тл, ток плазмы был в диапазоне  $200$ – $250$  кА. Дополнительный нагрев осуществлялся пучком нейтрального дейтерия с энергией  $28$  кэВ и длительностью  $40$  мс, который включался на  $160$ -й миллисекунде. Вкладываемая мощность составляла около  $700$  кВт. В разрядах с напуском азота магнитная конфигурация, ток плазмы, тороидальное магнитное поле и мощность дополнительного нагрева были такими же, как и в реперных разрядах без напуска. Клапан, регулирующий напуск азота открывался на  $140$ -й мс, инъекция продолжалась в течение  $35$  мс. Скорость напуска подбиралась таким образом, чтобы добиться как можно более сильного уменьшения теплового потока без деградации параметров центральной плазмы. На рис. 3 для типичного разряда с напуском азота (#41028) показаны осциллограммы тока плазмы, напряжения на обходе, температуры и плотности электронов в центре плазмы, интенсивности свечения линии D-alpha, интегральной по хорде плотности, максимального значения плотности ионного тока насыщения диверторных ленгмюровских зондов, интенсивности света азотной линии, среднехордового эффективного заряда плазмы и максимального значения плотности теплового потока на внешнюю диверторную пластину. Датчик азотной линии был направлен в диверторную область и показывал значительный рост интенсив-

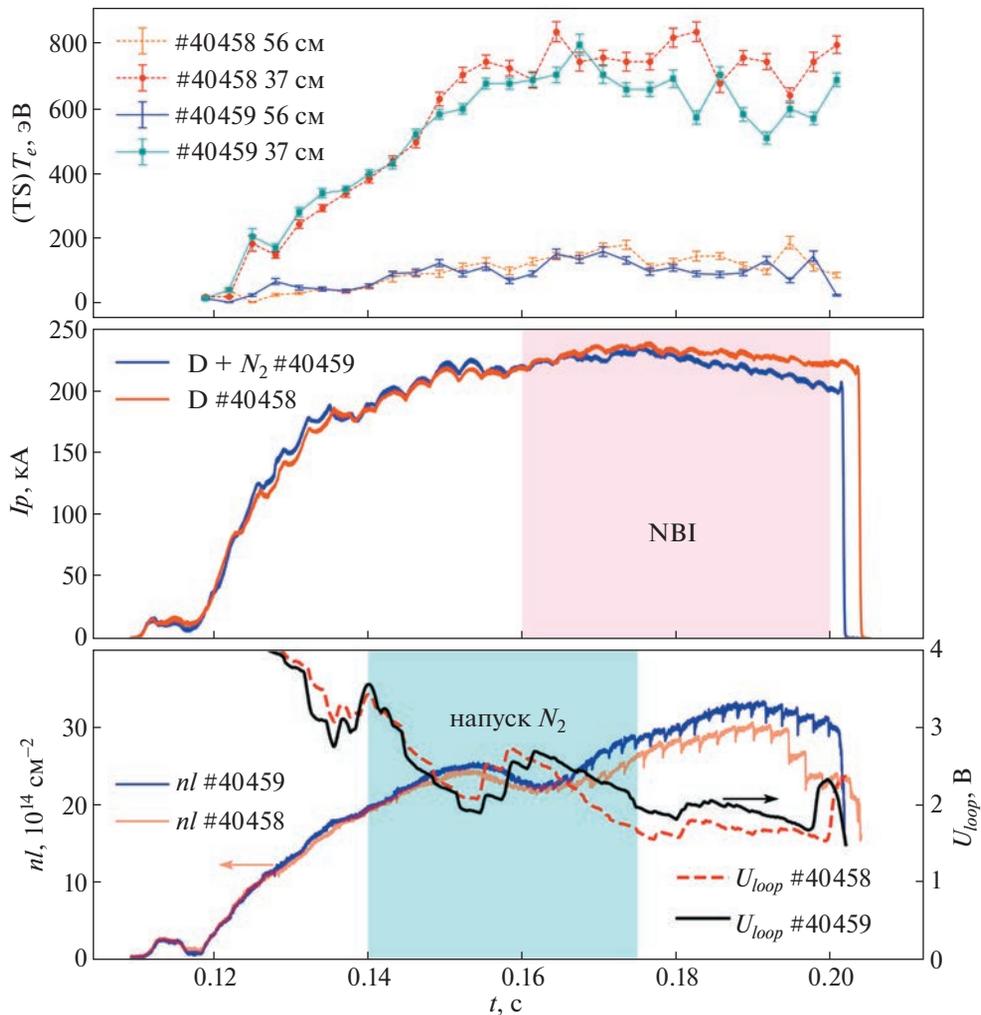


**Рис. 3.** Осциллограммы тока плазмы и напряжения на обходе (а), температуры и плотности электронов в центре плазмы по данным диагностики томсоновского рассеяния, интенсивности свечения линии D-alpha (б), интегральной по хорде плотности и максимального значения плотности ионного тока насыщения (в), интенсивности свечения азотной линии, максимального значения плотности теплового потока на внешнюю диверторную пластину и эффективного заряда плазмы (г) для разряда #41028. Также отмечены интервалы времени напуска азота и дополнительного нагрева с помощью нейтральной инжекции (NBI).

ности через 30 мс после включения клапана газонапуска примеси, при этом максимальная плотность теплового потока резко уменьшалась. Из рис. 3б видно, что в процессе инжекции параметры основной плазмы, измеренные с помощью диагностики томсоновского рассеяния, не претерпели существенного изменения. Эффективный заряд плазмы (рис. 3г) увеличился с 2 до довольно высокого значения 3.7. Это связано с тем, что на компактных установках с открытым дивертором сложно получить хорошее экранирование примеси. На рис. 3в приведены временные зависимости максимального значения плотности ионного тока насыщения и среднечордовой плотности. Как

известно [11], уменьшение ионного тока насыщения является одним из признаков “отрыва” дивертора, т.е., несмотря на рост плотности в основной плазме, поток частиц на диверторные пластины падает. В режиме с усиленным рециклингом, который обычно реализуется на токамаке Глобус-М2, ионный ток насыщения должен возрастать с увеличением плотности и зависимость согласно двухточечной модели должна быть близка к квадратичной [12].

Сравнение разрядов с инжекцией азота и без нее было выполнено для двух следующих друг за другом разрядов (#40458 и #40459), чтобы исключить различия связанные с состоянием стенок ка-



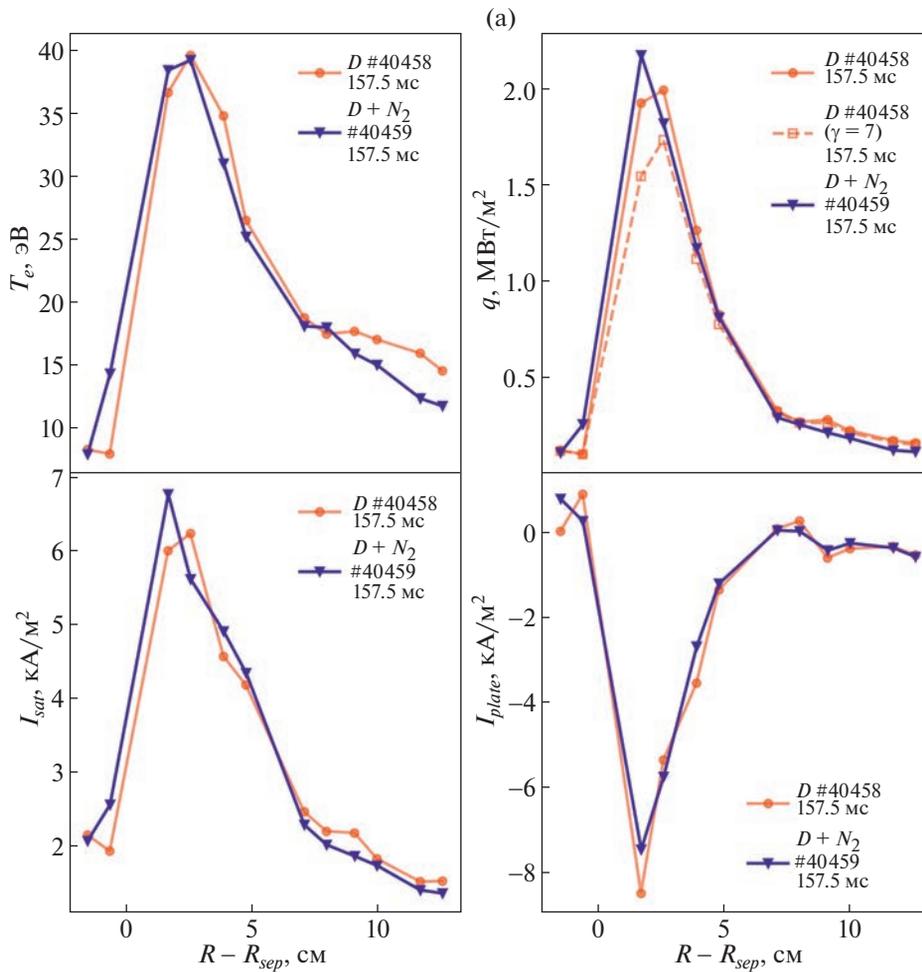
**Рис. 4.** Сравнение временных зависимостей параметров разряда с напуском азота (#40459) и реперного разряда без напуска (#40458). Сверху вниз: температура электронов в центре (37 см) и на границе основной плазмы (56 см); ток плазмы; интегральная по хорде плотность и напряжение на обходе. Также отмечены интервалы времени напуска азота и дополнительного нагрева с помощью нейтральной инжекции (NBI).

меры. Осциллограммы тока плазмы, температуры электронов в центре и на границе основной плазмы, интегральной по хорде плотности и напряжения на обходе приведены на рис. 4. Как и в большинстве разрядов этой серии с инжекцией азота, среднечордовая плотность приблизительно на 10% выше, а температура электронов на 10% ниже, чем в разрядах без инжекции, т.е. существенного изменения параметров основной плазмы не происходит. Напряжение на обходе в разряде с инжекцией в среднем выше на 0.3 В. Оценка времени удержания энергии для обоих разрядов дает значение порядка 5 мс.

#### 4. ПРОФИЛИ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ВБЛИЗИ ДИВЕРТОРНЫХ ПЛАСТИН

На рис. 5а и 5б приводятся профили температуры электронов, плотности потока тепла, плот-

ности ионного тока насыщения и плотности тока на пластину для внешней пластины дивертора для разрядов #40458 и #40459, измеренные встроенными лентмюровскими зондами в интервале 157–160 мс, когда влияние напуска азота еще не сказывается и в интервале 174–180 мс, когда оно максимально и присутствует дополнительный нагрев с помощью нейтральной инжекции. Время усреднения вольт-амперных характеристик составляло 2 мс, их запись производилась между моментами вспышек краевой неустойчивости (ELM). Движение сепаратрисы вдоль внешней диверторной пластины с достаточно большой скоростью (около 2 м/с) позволило осуществить “сканирование” и отобразить на одном профиле точки для двух моментов времени, соответственно сместив их на несколько мм [13]. Плотность тока на диверторные пластины измерялась путем подачи на зонды нулевого потенциала относи-



**Рис. 5.** а) Профили температуры электронов, плотности теплового потока, плотности ионного тока насыщения и плотности тока на пластину на внешней пластине дивертора в разряде с инжекцией азота (#40459) и в реперном разряде (#40458). Пунктиром показана плотность теплового потока, подсчитанная без учета зависимости коэффициента передачи тепла в слое  $\gamma$  от разницы потенциалов  $V$  между пластиной и плазмой. В интервале измерений инжекция азота еще не сказывается на параметрах разряда (азот поступает через капилляр длиной 870 мм); б) профили температуры электронов, плотности теплового потока, плотности ионного тока насыщения и плотности тока на пластину на внешней пластине дивертора в разряде с инжекцией азота (#40459) и в реперном разряде (#40458). Пунктиром показана плотность теплового потока, подсчитанная без учета зависимости коэффициента передачи тепла в слое  $\gamma$  от разницы потенциалов  $V$  между пластиной и плазмой. В интервале измерений влияние инжекции азота максимально.

тельно камеры, т.е. они служили мониторами тока. Рисунок 5а подтверждает, что до инжекции азота параметры двух разрядов весьма близки. На рис. 5б можно заметить, что в реперном разряде #40458 максимальное абсолютное значение плотности тока на камеру значительно превышает максимальное значение плотности ионного тока насыщения. Данное обстоятельство необходимо учитывать при нахождении плотности теплового потока. Обычно используют формулу  $q = \gamma k T_e I_{sat} / (e S_{pr})$ , где  $S_{pr}$  – площадь собирающей поверхности зонда,  $T_e$  – температура электронов,  $I_{sat}$  – ионный ток насыщения,  $\gamma$  – коэффициент передачи тепла в слое, и делают предположение, что  $T_i \approx T_e$ , что дает  $\gamma = 7$  [14]. Эта формула применима если токи электронов и ионов на зонд равны (суммарный ток равен нулю), т.е. зонд или диверторная пластина находится под плавающим потенциалом

относительно плазмы. Наличие значительного тока на пластину свидетельствует о том, что следует учитывать зависимость  $\gamma$  от разницы потенциалов  $V$  между пластиной и плазмой (2) [12].

$$\gamma(V) = 2.5 T_i / T_e - eV / k T_e + 2[(2\pi m_e / m_i)(1 + T_i / T_e)]^{1/2} \exp(eV / k T_e) \quad (2)$$

Из этой формулы следует, что если  $V$  становится по абсолютной величине меньше плавающего потенциала (порядка  $3kT_e/e$  для дейтериевой плазмы) то  $\gamma(V)$  начинает резко возрастать, что является следствием экспоненциального роста потока электронов на пластину. На рис. 5а и 5б сплошной линией, а пунктиром – оценка при использовании постоянного значения  $\gamma = 7$ . В данных условиях не учет зависимости  $\gamma(V)$  приводит к занижению плотности теплового потока на 20%. Можно

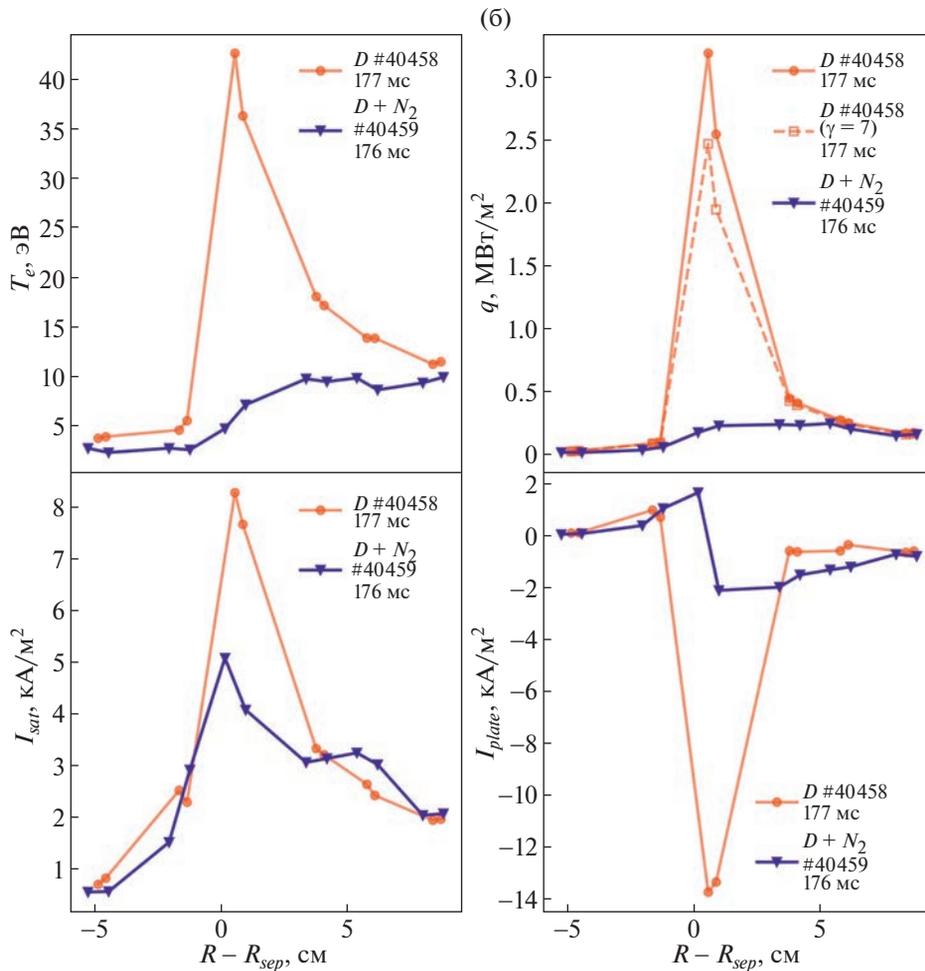


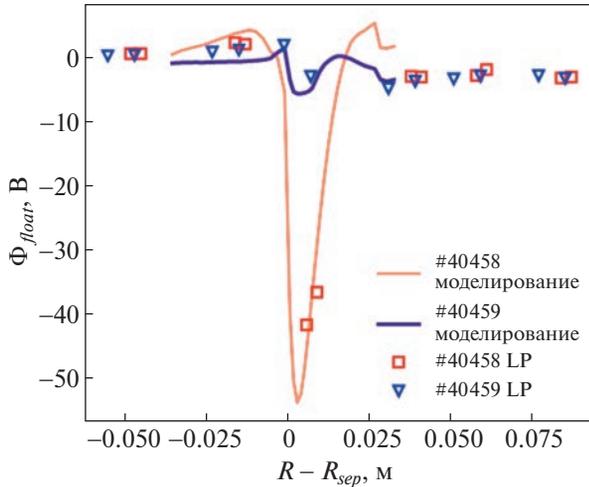
Рис. 5. Окончание

отметить, что в разряде #40458 нейтральная инжекция приводит к увеличению максимального значения плотности теплового потока на внешнюю пластину в полтора раза. Характерный масштаб спада плотности теплового потока  $\lambda_q$  является важным параметром, от которого зависят пиковые нагрузки на дивертор. С помощью полученных данных можно сделать оценку  $\lambda_q \approx 3$  мм (при переносе в экваториальную плоскость), что не противоречит известным скейлингам [15]. В разряде с напуском азота максимальная температура электронов вблизи диверторной пластины падает в четыре раза, причем около сепаратрисы температура становится меньше 5 эВ, что наряду с уменьшением ионного тока насыщения в два раза позволяет сделать предположение о частичном отрыве дивертора (partial detachment). Также следует отметить смещение максимума профиля электронной температуры наружу, что характерно для режимов с частичным отрывом [16] и связано с тем, что наиболее благоприятные условия для отрыва наблюдаются вблизи пересечения се-

паратрисы с диверторной пластиной. Соответственно, с уменьшением электронной температуры, максимальная плотность теплового потока уменьшается более чем на порядок. Ток на внешнюю пластину падает приблизительно в семь раз. Подобное уменьшение наблюдалось в экспериментах и моделировании разрядов на токамаке ASDEX Upgrade [17, 18] и может быть объяснено уменьшением термоэлектрического тока вследствие низких электронных температур вблизи дивертора. В работе [17] отмечается, что регистрация тока на пластину является удобным и достаточно надежным индикатором перехода в режим “отрыва”.

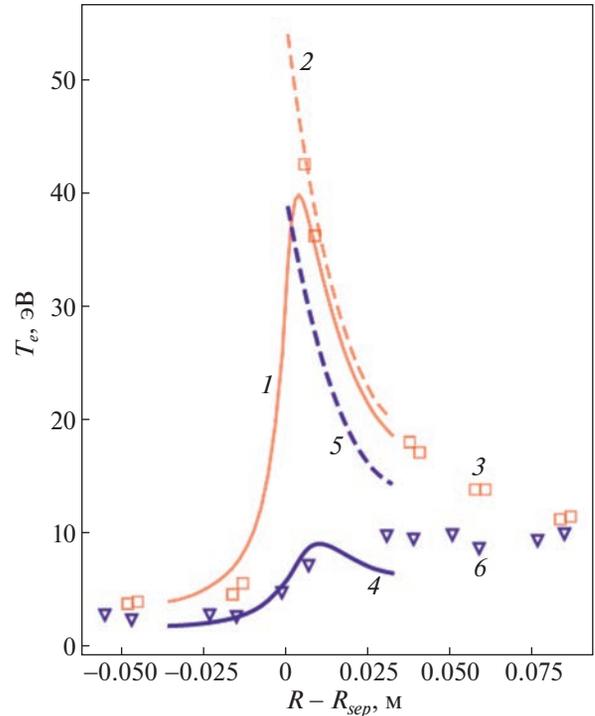
## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Для данных разрядов (#40458 и #40459) было проведено моделирование с помощью кода SOLPS-ITER с учетом дрейфов и электрических токов. Коэффициенты аномального транспорта задавались вручную, все частицы описывались



**Рис. 6.** Рассчитанные и измеренные плавающие потенциалы диверторных ленгмюровских зондов в разрядах с инжекцией азота (#40459) и без нее (#40458).

гидродинамически. В целом, результаты моделирования соответствуют экспериментальным результатам. Расчеты были выполнены для момента времени  $t = 175$  мс. Скорость напуска азота была выбрана на уровне  $7 \times 10^{19}$  ат/с. В разряде #40459 рассчитанная максимальная электронная температура уменьшилась на внешней пластине приблизительно в четыре раза по сравнению с реперным разрядом #40458, на внутренней — более чем на порядок: до значений порядка 1 эВ. Соответственно, эффективный заряд внутри сепаратрисы увеличивается с 2 до 3,5, причем при инжекции азота последний является основной излучающей примесью, а в разрядах без инжекции такой примесью был углерод. В разрядах без инжекции суммарная доля излучения внутри расчетной области составляет 17% от вводимой мощности, с инжекцией — 64%. Ток на внешнюю пластину упал более чем в три раза, тепловой поток — в 9 раз. На рис. 6 показано сравнение результатов моделирования и измерений для пространственных распределений плавающих потенциалов зондов, находящихся на внешней пластине. Видно, что наблюдается удовлетворительное согласие расчетов и эксперимента. Существенное уменьшение плавающих потенциалов при инжекции напрямую связано с падением тока на пластину и температуры электронов. На рис. 7 показаны пространственные распределения электронной температуры на внешней диверторной пластине. Также на этом рисунке отображены пространственные распределения электронной температуры в экваториальной плоскости, перенесенные на пластину по магнитным линиям. Легко заметить, что в разряде с инжекцией наблюдается значительное падение температуры вблизи дивертора по сравнению



**Рис. 7.** Результаты моделирования пространственных распределений температуры электронов на внешней диверторной пластине и в экваториальной плоскости при инжекции азота (#40459) в разряде и без нее (#40458). Также приведены результаты измерений с помощью диверторных ленгмюровских зондов (LP). 1 — пластина, #40458, моделирование; 2 — экваториальная плоскость, #40458, моделирование; 3 — пластина, #40458, LP; 4 — пластина, #40459, моделирование; 5 — экваториальная плоскость, #40459, моделирование; 6 — пластина, #40459, LP. Распределения из экваториальной плоскости перенесены на дивертор по магнитным линиям.

с экваториальной плоскостью, в разряде без инжекции эти температуры близки. Также можно отметить хорошее совпадение результатов измерений и моделирования. В общем, результаты моделирования можно охарактеризовать как наличие “отрыва” дивертора на внутренней пластине и частичный “отрыв” на внешней пластине. Более подробно моделирование описано в работе [19].

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На компактном сферическом токамаке Глобус-М2 были выполнены первые эксперименты по уменьшению тепловой нагрузки на диверторные пластины с помощью инжекции азота. Оценки плотности теплового потока, выполненные на основе измерений ионного тока насыщения и температуры электронов диверторными ленгмюровскими зондами показали возможность сниже-

ния тепловой нагрузки на порядок без существенного ухудшения режима удержания плазмы внутри сепаратрисы. Лучшее экранирование примесей по сравнению с тем, что наблюдалось в [4], может быть связано с тем, что на токамаке COMPASS очень небольшое расстояние между X-точкой и дивертором [20]. Данное обстоятельство увеличивает число нейтралей азота, которые проникают в зону удержания, не успев ионизоваться. Измеренные значения тока с пластины в плазму снаружи от пересечения внешней ветви сепаратрисы с диверторной пластиной превышают измеренные значения ионного тока насыщения. Протекающий ток необходимо учитывать при вычислении тепловой нагрузки на дивертор. Результаты моделирования с помощью кода SOLPS-ITER удовлетворительно согласуются с полученными экспериментальными данными.

Исследования проведены на УНУ “Сферический токамак Глобус-М”, входящей в состав ФЦКП “Материаловедение и диагностика в передовых технологиях”. Подготовка диагностических систем токамака (разд. 2) выполнена в рамках контракта 0034-2021-0001, анализ экспериментальных данных (разд. 3, 4) выполнен в рамках контракта 0040-2019-0023. Работа по моделированию (разд. 5) была поддержана Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере науки по проекту № 0784-2020-0020.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kukushkin A.S., Pacher H.D., Loarte A., Komarov V., Kotov V., Merola M., Pacher G.W. and Reiter D.* // Nucl. Fusion. 2009. V. 49. № 7. P. 075008. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/49/7/075008>
2. *Leonard A.W.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2018. V. 60. № 4. 044001 <https://doi.org/10.1088/1361-6587/aaa7a9>
3. *Reimold F., Wischmeier M., Bernert M., Potzel S., Kallenbach A., Müller H.W., Sieglin B., Stroth U. and the ASDEX Upgrade Team* // Nucl. Fusion. 2015. V. 55. № 3. P. 033004. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/55/3/033004>
4. *Komm M., Khodunov I., Cavalier J., Vondracek P., Henderson S., Seidl J., Horacek J., Naydenkova D., Adamek J., Bilkova P., Bohm P., Devitre A., Dimitrova M., Elmore S., Faitsch M., Hacek P., Havlicek J., Havranek A., Imrisek M., Krbec J., Peterka M., Panek R., Samoylov O., Sos M., Tomes M., Tomova K., Weinzettl V. and The EUROfusion MST1 Team* // Nucl. Fusion. 2019. V. 59. № 10. P. 106035. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab34d2>
5. *Kallenbach A., Bernert M., Dux R., Casali L., Eich T., Giannone L., Herrmann A., McDermott R., Mlynek A., Müller H.W., Reimold F., Schweinzer J., Sertoli M., Tardini G., Treutterer W., Viezzer E., Wenninger R., Wischmeier M. and the ASDEX Upgrade Team.* // Plasma Phys. Control. Fusion. 2013. V. 55. № 12. P. 124041. <https://doi.org/10.1088/0741-3335/55/12/124041>
6. *Курские Г.С., Жильцов Н.С., Коваль А.Н., Корнев А.Ф., Макаров А.М., Мухин Е.Е., Петров Ю.В., Сахаров Н.В., Соловей В.А., Ткаченко Е.Е., Толстяков С.Ю., Чернаков П.В.* // Письма в ЖТФ. 2021. Т. 47. Вып. 24. С. 41. <https://doi.org/10.21883/PJTF.2021.24.51799.19019>
7. *Counsell G.F., Ahn J.-W., Akers R., Arends E., Fiedling S.J., Helander P., Kirk A., Meyer H., Tabasso A., Wilson H., Yang Y.* // J. Nucl. Mater. 2003. V. 313–316. № 3. P. 804. [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(02\)01439-3](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(02)01439-3)
8. *Хромов Н.А., Векишина Е.О., Гусев В.К., Литуновский Н.В., Патров М.И., Петров Ю.В., Сахаров Н.В.* // ЖТФ. 2021. Т. 91. Вып. 3. С. 421. <https://doi.org/10.21883/JTF.2021.03.50518.227-20>
9. *Février O., Theiler C., De Oliveira H., Labit B., Fedorczak N., Baillod A.* // Review of Scientific Instruments. 2018. V. 89. № 5. P. 053502. <https://doi.org/10.1063/1.5022459>
10. *Kuang A.Q., Brunner D., LaBombard B., Leccacorvi R., Vieira R.* // Review of Scientific Instruments. 2018. V. 89. № 4. P. 043512. <https://doi.org/10.1063/1.5023905>
11. *Loarte A., Monk R.D., Martin-Solis J.R., Campbell D.J., Chankin A.V., Clement S., Davies S.J., Ehrenberg J., Errents S.K., Guo H.Y., Harbour P.J., Horton L.D., Ingeson L.C., Jäckel H., Lingertat J., Lowry C.G., Maggi C.F., Matthews G.F., McCormick K., O'Brien D.P., Reichle R., Saibene G., Smith R.J., Stamp M.F., Stork D., Vlases G.C.* // Nucl. Fusion. 1998. V. 38. № 3. P. 331. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/38/3/303>
12. *Stangeby P.C.* The Plasma Boundary of Magnetic Fusion Devices (IoP Publishing, Bristol), 2000.
13. *Antar G.Y., Counsell G., Ahn J.-W., Yang Y., Price M., Tabasso A., Kirk A.* // Phys. Plasmas. 2005. V. 12. № 3. 032506. <https://doi.org/10.1063/1.1861894>
14. *Stangeby P.C., McCracken G.M.* // Nucl. Fusion. 1990. V. 30. № 7. 1225. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/30/7/005>
15. *Eich T., Leonard A.W., Pitts R.A., Fundamenski W., Goldston R.J., Gray T.K., Herrmann A., Kirk A., Kallenbach A., Kardaun O., Kukushkin A.S., LaBombard B., Maingi R., Makowski M.A., Scarabosio A., Sieglin B., Terry J., Thornton A.* // Nucl. Fusion. 2013. V. 53. № 9. P. 093031. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/53/9/093031>
16. *Loarte A., Hughes J.W., Reinke M.L., Terry J.L., LaBombard B., Brunner D., Greenwald M., Lipschultz B., Ma Y., Wukitch S., Wolfe S.* // Phys. Plasmas. 2011. V. 18. № 5. P. 056105. <https://doi.org/10.1063/1.3567547>

17. *Kallenbach A., Dux R., Fuchs J.C., Fischer R., Geiger B., Giannone L., Herrmann A., Lunt T., Mertens V., McDermott R., Neu R., Pütterich T., Rathgeber S., Rohde V., Schmid K., Schweinzer J., Treutterer W. and ASDEX Upgrade Team* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2010. V. 52. № 5. P. 055002.  
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/52/5/055002>
18. *Rozhansky V., Kaveeva E., Senichenkov I., Sytova E., Veselova I., Voskoboynikov S., Coster D.* // *Contrib. Plasma Phys.* 2018. V. 58. № 6–8. P. 540.  
<https://doi.org/10.1002/ctpp.201700119>
19. *Vekshina E., Dolgova K., Rozhansky V., Kaveeva E., Senichenkov I., Molchanov P., Timokhin V., Khromov N., Zhiltsov N., Bakharev N., Kiselev E., Tuhmeneva E.* // *Phys. Plasmas.* 2023. V. 30. № 042504.  
<https://doi.org/10.1063/5.0134542>
20. *Khodunov I., Komm M., Havranek A., Adamek J., Bohm P., Cavalier J., Seidl J., Devitre A., Dimitrova M., Elmore S., Faitsch M., Hacek P., Havlicek J., Hron M., Imrisek M., Krbec J., Peterka M., Panek R., Samoylov O., Tomes M., Tomova K., Vondracek P., Weinzettl V. and the EUROfusion MSTI Team* // *Plasma Phys. Control. Fusion.* 2021. V. 63. № 6. P. 065012.  
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/abf03e>