

УДК 533.9.08

## ТРЕБОВАНИЯ К ИЗМЕРЕНИЯМ ХАРАКТЕРИСТИК ПЛАЗМЫ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ TRT

© 2022 г. Ю. А. Кащук<sup>a,\*</sup>, С. В. Коновалов<sup>a,b</sup>, А. В. Красильников<sup>a</sup><sup>a</sup> Частное учреждение государственной корпорации по атомной энергии “Росатом”,  
“Проектный центр ИТЭР”, Москва, Россия<sup>b</sup> Национальный исследовательский центр “Курчатовский институт”, Москва, Россия

\*e-mail: y.kashchuk@iterrf.ru

Поступила в редакцию 25.08.2022 г.

После доработки 29.09.2022 г.

Принята к публикации 01.10.2022 г.

Сформулирован перечень требований к измерениям характеристик высокотемпературной плазмы, которые должны обеспечить безопасность работы и защиту токамака с реакторными технологиями, а также управление плазменным шнуром и исследование физики термоядерной плазмы. Особое внимание уделяется измерениям, данные которых необходимы для отработки плазменных технологий будущих квазистационарных термоядерных реакторов. Определены диапазоны изменений плазменных параметров, в том числе определены требования к разрешению, с которым эти параметры должны быть измерены. Эти требования являются исходными данными при выборе измерительных систем, разработке конструкции и последующей интеграции диагностик на установке. Предложена классификация диагностик в зависимости от решаемых задач и стадийность создания диагностического комплекса токамака с реакторными технологиями.

*Ключевые слова:* токамак, термоядерный реактор, характеристики плазмы, диагностика плазмы

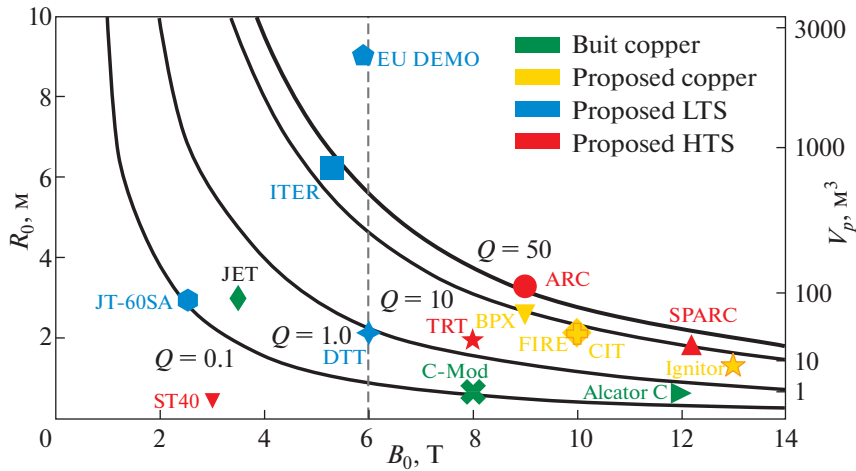
**DOI:** 10.31857/S0367292122700214

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Значительный прогресс, достигнутый в последнее время в технологии изготовления высокотемпературных сверхпроводников (ВТСП) 2-го поколения (2G HTS), позволяет создавать магнитные катушки с сильным рабочим магнитным полем [1]. Использование ВТСП дает возможность приступить к созданию квазистационарных термоядерных установок с небольшими размерами по сравнению с токамак-реактором ИТЭР. В таких установках может быть обеспечено достижение режимов зажигания и горения термоядерной плазмы с выходом энергии нейтронного потока по отношению к вложенной энергии при ее нагреве  $Q > 1$ . Сегодня в этом направлении ведутся исследования в нескольких лабораториях мира – это такие проекты как TRT [2], ARC [3], SPARC [4, 5]. Также магнитные катушки на основе высокотемпературных сверхпроводников 2-го поколения планируются использовать в токамаке ST40 [6], в том числе с целью демонстрации реализуемости новых технологических достижений при создании электромагнитных систем современных установок управляемого термоядерного синтеза (УТС).

В проекте TRT, помимо реализации перспективной для термоядерного реактора ВТСП электромагнитной системы, закладываются инновационные решения для разрешения ключевых проблем на пути создания токамака-реактора, – это обеспечение квазистационарных режимов с контролируемым взаимодействием плазмы с первой стенкой и дивертором, оптимальное функционирование систем дополнительного нагрева плазмы, безындукционной генерации тока в плазме и управления ее параметрами, корректное функционирование системы подачи топлива, а также целого ряда технологических систем, необходимых для осуществления плазменных разрядов с реакторными характеристиками. Создаваемая новая технологическая платформа TRT будет способствовать интеграции технологических разработок ИТЭР в российскую программу УТС на пути создания как “чистого”, так и гибридного термоядерного реактора. В то же время ожидаемые характеристики плазмы позволяют рассматривать TRT как реальный плазменный прототип термоядерного источника нейтронов для гибридного (синтез-деление) реактора.

Разработка плазменных технологий квазистационарного термоядерного реактора помимо тра-



**Рис. 1.** Проектные (предельно достижимые) значения  $Q$  термоядерных установок с теплыми медными (Copper), низкотемпературными (LTS) и высокотемпературными (HTS) сверхпроводящими электромагнитными системами:  $B_0(T)$  – значение магнитной индукции установки в Теслах,  $R(m)$  – большой радиус тороидальной камеры токамака в метрах,  $V_p(m^3)$  – объем плазмы в кубических метрах.

диционных измерений характеристик параметров разряда токамака, таких как магнитное поле, ток плазмы, форма сечения плазменного шнура, горизонтальное и вертикальное смещения, положение X-точки сепаратрисы, МГД-активность, должна включать оптимизацию профилей нагрева и генерации тока, обеспечение удержания энергии и частиц в плазме, а также контроль потоков энергии и частиц на первую стенку и дивертор. Для этого необходимо обеспечить управление профилем тока в плазме, измерения плотностей и температур ионов и электронов как в центре плазменного шнура, так и в областях транспортных барьеров, и на периферии плазмы. Также важны измерения распределений плотностей и температур ионов, электронов и примесей в диверторной области, а также ряда других технологических параметров таких как поток энергии на стенку и пластины дивертора, температура материалов стенки и дивертора в критических областях. Все эти измерения необходимо выполнять с требуемыми пространственным и временным разрешениями.

Роль проекта TRT в современных термоядерных исследованиях наглядно показана на рис. 1, где представлены проектные (предельно достижимые) значения  $Q$  термоядерных установок с теплыми медными (copper), низкотемпературными (LTS) и высокотемпературными (HTS) сверхпроводящими электромагнитными системами [4].

В табл. 1 и 2 представлены основные технические параметры и сценарии разрядов токамака TRT, соответственно [2].

Диагностический комплекс TRT должен обеспечить безопасность работы установки, разработку и оптимизацию плазменных термоядерных технологий квазистационарного разряда плазмы с выходом на термоядерное зажигание, и проводить измерения указанных выше параметров и характеристик термоядерной плазмы во всем диапазоне их изменения в разрядах TRT как длительностью 100 секунд и выходом DD-нейтронов  $\sim 10^{18}$  н/с, так и длительностью 5 секунд и выходом DT-нейтронов  $\sim 10^{19}$  н/с с требуемыми временными, частотным и пространственным разрешениями. Наряду с обеспечением требуемых измерений в центральной области плазмы, особое внимание будет уделено измерениям характеристик на ее периферии: на пьедестале, в слое плазмы вблизи стенки вакуумной камеры токамака (Scrape of Layer – SOL) и в диверторной области.

## 2. КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗМЕРЕНИЙ

Учитывая накопленный опыт работы измерительных систем на термоядерных установках и опыт создания диагностического комплекса токамака-реактора ИТЭР, все измерения характеристик плазмы в токамаке TRT (табл. 3) можно, как и для ИТЭР, разделить на несколько классов в зависимости от решаемых задач. Это задача безопасности работы и защиты установки (1.1а); базовое управление токамаком (1.1б), продвинутое управление плазменным разрядом с реакторными характеристиками (1.2) и измерения, необходимые для детального исследования диверторной плазмы (1.2д). Группа измерений (1.2д) включает в себя параметры, необходимые для детального

**Таблица 1.** Параметры токамака с реакторными технологиями TRT

| Название  | Параметр              | Значение |
|---|-----------------------|----------|
| Большой радиус, м   | $R_0$                 | 2.15     |
| Малый радиус, м   | $a$                   | 0.57     |
| Аспектное отношение   | $A$                   | 3.77     |
| Магнитное поле на оси, Тл   | $B_{i0}$              | 8        |
| Ток в плазме, МА  | $I_p$                 | 5        |
| Вытянутость   | $\kappa_{sep}$        | 1.8      |
| Треугольность   | $\delta_{sep}$        | 0.3      |
| Длительность разряда, с   | $\Delta t_{flatop}$   | 100/<10* |
| Запас потока в индукторе, Вс  | $\Phi_{tot}$          | ~33      |
| Средняя плотность, $10^{20} \text{ м}^{-3}$                             | $\langle n_e \rangle$ | до 2     |
| Энергетическое время жизни плазмы, с                                    | $\tau_e$              | 0.33     |
| Мощность дополнительного нагрева, МВт                                   | $P_{aux}$             | до 40    |
| Термоядерная мощность, МВт  | $P_{fus}$             | ~0.5/40* |
| Отношение мощности, выносимой на сепаратрису, к большому радиусу, МВт/м | $P_{sep}/R$           | 14/16*   |
| Отношение термоядерной мощности к мощности нагрева                      | $Q$                   | 0.01/>1* |

\*TRT с плазмой D + малая добавка T/D–T-плазма.

**Таблица 2.** Основные сценарии разрядов токамака TRT (проект 2020 г., электромагнитная система ВТСП). Расчеты выполнены кодом PART с параметрами: H-мода с  $P_{aux} = 40$  МВт ( $P_{NBI} = 25$  МВт,  $P_{ECRH} = 10$  МВт,  $P_{ICRH} = 5$  МВт) и  $n_e = 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$ 

| Топливо  | D       | D + 1%T | D + T    |
|--|---------|---------|----------|
| Длительность импульса $\Delta t_{pulse}$ , с   | 100–150 | ~100    | <10      |
| Температура плазмы $T$ , кэВ   | 6–8     | 6–8     | 7–8      |
| Коэффициент улучшенного удержания в H-моду $H_{y,2}$                                 | 1.0–1.2 | 1.0–1.2 | 1.0–1.3  |
| $\beta_N$  | 1.4     | 1.4     | 1.6      |
| Запас устойчивости, $q_{95}$   | 3.3     | 3.3     | 3.3      |
| Энергетическое время жизни плазмы $\tau_E$ , с                                       | 0.3     | 0.3     | 0.3      |
| Макс. выход нейтронов $Y_n$ , $10^{18}$ н/с  | 0.5     | 1       | ~15      |
| Термоядерная мощность $P_{fus}$ , МВт  | 0.3     | 0.6     | ~40      |
| Отношение мощности, выносимой на сепаратрису, к большому радиусу $P_{sep}/R$ , МВт/м | 14      | 14      | 17       |
| Отношение термоядерной мощности к мощности нагрева $Q$                               | 0.01    | 0.02    | $\geq 1$ |

исследования характеристик плазмы в SOL и диверторе. Эти измерения включают контроль формы плазменного шнура, в частности положение X-точки, измерение тепловых потоков на диверторные мишени, определение потоков атомов и профиля радиационного излучения, измерение плотности и температуры диверторной плазмы. Детальные изучения диверторной плазмы являются важными для общей программы исследований на TRT.

Последний класс измерений (группа 2) ориентирован на изучение физики высокотемпературной плазмы, включая L–H транспортные переходы, такие колебания как ELM, МГД-активность, физики “быстрых ионов” и других явлений в термоядерной плазме с реакторными параметрами.

Измерения некоторых плазменных характеристик могут вносить разный вклад во все обозначенные задачи при том, что требования к измерениям могут быть разными в зависимости от роли в экспериментах и работе установки. Наиболее

Таблица 3. Классификация измерений и диапазоны изменения плазменных параметров TRT

| №  | Измерения  | Параметр                              | Диапазон изменений   | Требуемые разрешения |
|--|--|---------------------------------------|--|----------------------|
| Измерения, необходимые для безопасной работы и защиты установки (1.1а)                                 |  |                                       |  |                      |
| 1  | Ток в плазме   | $I_p$                                 | 0–5 МА   | 0.1 мс, интегрально  |
| 2  | Скорость смещения плазменного шнура  | $dZ/dt, dR/dt$                        | 0–5 м/с  | 1 мс                 |
| 3  | Напряжение на обходе   | $V_{loop}$                            | 0–30 В   | 1 мс                 |
| 4  | Отношение газокINETического давления плазмы к давлению тороидального магнитного поля | $\beta_t$                             | 0–0.05   | 0.1 мс, интегрально  |
| 5  | Контроль МГД-активности плазмы   |                                       | $m/n = 2/1$  | 1 мс                 |
| 6  | Полные радиационные потери при срыве   | $P_{rad}$                             | 0.3–300 МВт  | 0.1 мс, интегрально  |
| 7  | Средняя электронная плотность  | $\int n_e dl / \int dl$               | $10^{18} - 2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$                  | 1 мс, интегрально    |
| 8  | Убегающие электроны  | $I_{runaway}$<br>$E_{max}$            | 0.5–1.0 МА<br>10–30 МэВ                                      | 10 мс                |
| 9  | Температура поверхности дивертора  | $t_{div}^{\circ}$                     | 200–3000°C   | 2 мс                 |
| Измерения, необходимые для базового управления установкой (1.1б)                                       |  |                                       |  |                      |
| 1  | Положение плазменного шнура (расстояние до первой стенки)                            | $D_{sep}$                             | —  | 10 мс                |
| 2  | Радиационные потери основной плазмы  | $P_{rad}$                             | 0.1–40 МВт   | 1 мс, интегрально    |
| 3  | Удельное радиационное излучение основной плазмы                                      | $P_{rad}$                             | 5 кВт/м <sup>3</sup> –<br>3 МВт/м <sup>3</sup>               | 1 мс, 2 см           |
| 4  | Полный нейтронный выход  | $Y_n$                                 | $10^{15} - 2 \times 10^{19} \text{ н/с}$                     | 1 мс, интегрально    |
| 5  | Топливное отношение в центре плазменного шнура                                       | $n_H/n_D$                             | 0.1–10   | 100 мс, 5 см         |
| 6  | Относительная концентрация примесей Be, W, Li, Ne и др.                              | $n_{imp}$                             | $10^{-4} - 5 \times 10^{-2}$                                 | 10 мс, интегрально   |
| 7  | Температура поверхности первой стенки  | $t_{FW}^{\circ}$                      | 200–3000°C   | 10 мс, 0.5 см        |
| 8  | Тороидальное магнитное поле  | $B_T$                                 | 0–8.0 Тл   | 1 сек                |
| 9  | Профиль тока   | $q(r)$                                | 0.5–9  | 10 мс, 3 см          |
| Измерения, необходимые для разработки технологий продвинутого управления плазменным разрядом TRT (1.2) |  |                                       |  |                      |
| 1  | Профиль нейтронного/ $\alpha$ -источников  | $Neutron/$<br>$/\alpha\text{-source}$ | $10^{14} - 6 \times 10^{18} \text{ н/(м}^3 \times \text{с)}$ | 1 мс, 5 см           |
| 2  | Профиль температуры электронов в центре плазмы                                       | $T_e \text{ Core}$                    | 0.5–30 кэВ   | 10 мс, 2 см          |
| 3  | Профиль плотности электронов основной плазмы   | $n_e \text{ Core}$                    | $3 \times 10^{19} -$<br>$2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$    | 10 мс, 2 см          |
| 4  | Профиль плотности электронов на краю плазмы  | $n_e \text{ Edge}$                    | $5 \times 10^{18} -$<br>$2 \times 10^{20} \text{ м}^{-3}$    | 10 мс, 1 см          |
| 5  | Профиль температуры ионов в центре   | $T_i \text{ Core}$                    | 0.5–30 кэВ   | 20 мс, 5 см          |
| 6  | Относительная концентрация “гелиевой золы”   | $n_{He}$                              | 0.1–5%   | 20–30 мс, 2 см       |
| Измерения, необходимые для исследований характеристик диверторной плазмы (1.2 д)                       |  |                                       |  |                      |
| 1  | Радиационные потери в диверторе  | $P_{rad} \text{ Div}$                 | 0.03–40 МВт  | 1 мс, интегрально    |
| 2  | Профиль радиационного излучения в диверторе  | $P_{rad} \text{ Div}$                 | 50 кВт/м <sup>3</sup> –<br>100 МВт/м <sup>3</sup>            | 1 мс, 5 см           |

Таблица 3. Окончание

| №   | Измерения   | Параметр           | Диапазон изменений   | Требуемые разрешения           |
|---|---|--------------------|--|--------------------------------|
| 3   | Температура поверхности дивертора   | $t_{div}^o$        | 200–3000°С   | 2 мс                           |
| 4   | Плотность электронов плазмы вблизи диверторной мишени   | $n_e$              | $10^{18}$ – $10^{22}$ м <sup>-3</sup>                                    | 1 мс, 1 см                     |
| 5   | Температура электронов плазмы вблизи диверторной мишени   | $T_e$              | 1–150 эВ   | 1 мс, 1 см                     |
| 6   | Давление газа в диверторе   | $P_{div}$          | $10^{-4}$ –20 Па   | 50 мс, 20%                     |
| 7   | Поток атомов в диверторе  | $\Phi_{div}$       | $10^{19}$ – $10^{25}$ атом/с   | 1 мс, 20%                      |
| 8   | Плотность нейтралов в диверторе   | $nH, nD, nHe$      | $10^{17}$ – $10^{21}$ м <sup>-3</sup>                                    | 1 мс, 20%                      |
| Измерения, необходимые для изучения физики высокотемпературной плазмы (2) |   |                    |  |                                |
| 1   | Контроль H-моды, ELMов и индикатора L-H перехода: плотность на пьедестале температура на пьедестале |                    | $5 \times 10^{18}$ –<br>$2 \times 10^{20}$ м <sup>-3</sup><br>0.5–10 кэВ | 0.1 мс, 1–2 см<br>1 мс, 2–3 см |
| 2   | Быстрые ионы  |                    |  | 5–10 мс                        |
| 3   | Неудерживаемые быстрые ионы   |                    |  | 1 мс                           |
| 4   | Z эфф   | $Z_{eff}$          | 1–4  | 20 мс, 5 см                    |
| 5   | Скорость тороидального вращения плазмы  | $V_{TOR}$          | 1–200 км/с   | 20 мс, 2 см                    |
| 6   | Скорость полоидального вращения плазмы  | $V_{POL}$          | 1–50 км/с  | 20 мс, 2 см                    |
| 7   | Визуальный и температурный контроль первой стенки при ELM   | $^{\circ}C FW ELM$ | 400–3000°С   | 0.2 мс, 1 см                   |
| 8   | Профиль температуры электронов на краю плазмы   | $T_e Edge$         | 0.5–10 кэВ   | 10 мс, 1 см                    |
| 9   | Профиль температуры ионов на краю   | $T_i Edge$         | 0.05–10 кэВ  | 100 мс, 2 см                   |
| 10  | Плотность электронов в диверторе  | $n_e$              | $10^{19}$ – $10^{22}$ м <sup>-3</sup>                                    | 1 мс, 5 см                     |
| 11  | Температура электронов в диверторе  | $T_e$              | 0.3–200 эВ   | 1 мс, 5 см                     |
| 12  | Температура ионов в диверторе   | $T_i$              | 0.3–200 эВ   | 1 мс, 5 см                     |

полный список параметров, измеряемых в экспериментах с высокотемпературной плазмой, представлены в последней версии проектных требований к ИТЭР и в статье [7]. В этих работах представлены более ста режимов измерений плазменных характеристик, охватывающие все сценарии работы токамака-реактора. Для токамака TRT перечень параметров менее масштабный. Это обусловлено прежде всего целями и научной программой проекта. Так же существуют технические ограничения, связанные с тем, что количество патрубков в TRT (16) меньше, чем в ИТЭР (18). Патрубки TRT имеют меньшие геометрические размеры, что физически не позволяет разместить на установке все современные диагностики, используемые для исследования высокотемпературной плазмы токамаков. Список основных плазменных параметров TRT, диапазон изменений и требуемые разрешения собраны в табл. 3. Представленный список параметров не является полным. Диапазоны измерений, также, как и требования к разрешениям, будут уточняться

и дополняться по мере развития проекта и становления диагностического комплекса TRT. С учетом стадийности наращивания операционных возможностей TRT можно выделить три этапа работы установки: режимы работы токамака с плазмой без нейтронов (разряды в водороде и в гелии), режимы работы с плазмой с умеренным выходом нейтронов до  $5 \times 10^{17}$  н/с (разряды в дейтерии) и режимы работы с максимально допустимыми нейтронными нагрузками до  $15 \times 10^{18}$  н/с (разряды в смеси дейтерия и трития).

Контроль всех параметров, обеспечивающих защиту и управление плазмой в TRT, является обязательным. Это требование становится особенно актуальным в экспериментах с плазменными разрядами с высоким уровнем термоядерной нагрузки. В экспериментах по изучению физики высокотемпературной плазмы токамаков и оптимизации плазменных технологий возможно измерение части параметров из группы 2 при условии полного контроля всех параметров групп 1. Ia,

1.1б, 1.2 и 1.2д. Готовность к полномасштабной реализации программы исследований токамака с реакторными технологиями определяется возможностью диагностического комплекса проводить измерения плазменных параметров в указанном диапазоне с требуемым разрешением (временным, частотным, пространственным, энергетическим).

### 3. ДИАГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС TRT

На настоящем этапе с учетом разрабатываемого эскизного проекта вакуумной камеры и ее патрубков начато формирование диагностического комплекса TRT, который должен обеспечить максимальное выполнение требований к измерениям характеристик плазмы TRT, представленных в табл. 3. Планируется, что диагностический комплекс TRT будет включать: многокомпонентную электромагнитную диагностику, корпускулярную диагностику с несколькими перпендикулярными и тангенциальными конусами регистрации [8, 9], многоканальные коллиматоры нейтронов [10], болометрическую и рентгеновскую томографии, многоканальные спектрометры нейтронов, рентгеновского, гамма-излучения [11] и неударяемых в плазме быстрых ионов, многоканальные спектрометры излучений примесей и водородных линий для основной плазмы и плазмы в диверторе, многоканальные интерферометрию, рефлектометрию и рефрактометрию [12, 13], мониторы потока нейтронов [14], многоканальную активную спектроскопию [15], спектроскопию на основе динамического эффекта Штарка (MSE) и томсоновского рассеяния [16], оптический [17] и зондовый контроль первой стенки [18], оптические измерения в диверторе [19, 20] и зондовые измерения в диверторе [21] и некоторые другие диагностики. Более детально диагностический комплекс TRT будет сформирован после проведения интеграции вышеназванных диагностик в разрабатываемый проект патрубков TRT с учетом стадийности реализации проекта.

### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные цели создания токамака с реакторными технологиями [2] определяют сформулированные в настоящей статье требования к измерениям характеристик плазменного разряда TRT (табл. 3). Начаты работы по анализу возможности создания диагностик и определению состава диагностического комплекса, который позволит измерять основные характеристик плазмы TRT [8–21].

Работа выполнена при финансовой поддержке Госкорпорации Росатом в рамках Государственного контракта № Н.4ф.241.09.22.1135 от

12.09.2022 г. по реализации комплексной программы “Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года” [22].

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Molodyk A., Samoilenkov S., Markelov A., Degtyarenko P., Lee S., Petrykin V., Gaifullin M., Mankevich A., Vavilov A., Sorbom B., Cheng J., Garberg S., Kesler L., Hartwig Z., Gavrilkina S., Tsvetkov A., Okada T., Awaji S., Abrahimov D., Francis A., Bradford G., Larbalestier D., Senatore C., Bonura M., Pantoja A.E., Wimbush S.C., Strickland N.M., Vasiliev A.* // Sci Rep. 2021. V. 112084. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-81559-z>
2. *Красильников А.В., Коновалов С.В., Бондарчук Э.Н., Мазуль И.В., Родин И.Ю., Минеев А.Б., Кузьмин Е.Г., Кавин А.А., Карпов Д.А., Леонов В.М., Хайрутдинов Р.Р., Кукушкин А.С., Портнов Д.В., Иванов А.А., Бельченко Ю.И., Денисов Г.Г.* // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 970. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110196>
3. *Sorbom B.N., Ball J., Palmer T.R., Mangiarotti F.J., Sierchio J.M., Bonoli P., Kasten C., Sutherland D.A., Barnard H.S., Haakonsen C.B., Goh J., Sung C., Whyte D.G.* // Fusion Eng. and Design. 2015. V. 100. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2015.07.008>
4. *Creely A.J., Greenwald M.J., Ballinger S.B., Brunner D., Canik J., Doody J., Fülöp T., Garnier D.T., Granetz R., Gray T.K., Holland C., Howard N.T., Hughes J.W., Irby J.H., Izzo V.A., Kramer G.J., Kuang A.Q., LaBombard B., Lin Y., Lipschultz B., Logan N.C., Lore J.D., Marmar E.S., Montes K., Mumgaard R.T., Paz-Soldan C., Rea C., Reinke M.L., Rodriguez-Fernandez P., Särkimäki K., Sciortino F., Scott S.D., Snicker A., Snyder P.B., Sorbom B.N., Sweeney R., Tinguely R.A., Tolman E.A., Umansky M., Vallhagen O., Varje J., Whyte D.G., Wright J.C., Wukitch S.J., Zhu J. and the SPARC Team* // J. Plasma Phys. 2020. V. 86. <https://doi.org/10.1017/S0022377820001257>
5. *Rodriguez-Fernandez P., Creely A.J., Greenwald M.J., Brunner D., Ballinger S.B., Chrobak C.P., Garnier D.T., Granetz R., Hartwig Z.S., Howard N.T., Hughes J.W., Irby J.H., Izzo V.A., Kuang A.Q., Lin Y., Marmar E.S., Mumgaard R.T., Rea C., Reinke M.L., Riccardo V., Rice J.E., Scott S.D., Sorbom B.N., Stillerman J.A., Sweeney R., Tinguely R.A., Whyte D.G., Wright J.C., Yuryev D.V.* // Nucl. Fusion. 2022. V. 62. 042003. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac1654>
6. *Gryaznevich M., Asunta O.* // Fusion Eng. and Design. 2017. V. 123. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2017.03.011>
7. PROGRESS IN THE ITER PHYSICS BASIS, Ch. 7: Diagnostics // Nucl. Fusion. 2007. 47 (6), S337. <https://doi.org/10.1088/0029-5515/47/6/S07>
8. *Афанасьев В.И., Гончаров П.Р., Мельник А.Д.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 675. <https://doi.org/10.31857/S0367292122100031>
9. *Афанасьев В.И., Козловский С.С., Мельник А.Д.* // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 685. <https://doi.org/10.31857/S0367292122100043>

10. Немцев Г.Е., Родионов Р.Н., Хафизов Р.Р. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1166.
11. Шевелев А.Е., Хилькевич Е.М., Бахарев Н.Н., Ильясова М.В., Скрекель О.М., Полуновский И.А. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1193.
12. Вершков В.А., Петров В.Г., Субботин Г.Ф. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 731.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292122700159>
13. Шелухин Д.А., Субботин Г.Ф., Вершков В.А. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 747.  
<https://doi.org/10.31857/S036729212260042X>
14. Кормилицын Т.М., Кацук Ю.А., Родионов Р.Н., Артемьев К.К., Панкратенко А.В., Немцев Г.Е., Красильников А.В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1174.
15. Серов С.В., Тугаринов С.Н., Серов В.В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 700.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292122100262>
16. Курские Г.С., Мухин Е.Е., Коваль А.Н., Жильцов Н.С., Соловей В.А., Толстяков С.Ю., Ткаченко Е.Е., Раздобарин А.Г., Дмитриев А.М., Корнев А.Ф., Макаров А.М., Горшков А.В., Асадулин Г.М., Кукушкин А.Б., Сдвиженский П.А., Чернаков П.В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 711.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292122100134>
17. Раздобарин А.Г., Гаспарян Ю.М., Богачев Д.Л., Дмитриев А.М., Елец Д.И., Коваль А.Н., Курские Г.С., Мухин Е.Е., Булгадарян Д.Г., Крат С.А., Маренков Е.Д., Алексеенко И.В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1216.
18. Беграмбеков Л.Б., Грунин А.В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1244.
19. Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Курские Г.С. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 722.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292122100146>
20. Вуколов К.Ю., Андреев Е.Н., Горбунов А.В. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 8. С. 761.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292122100110>
21. Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Садовский Я.А. // Физика плазмы. 2022. Т. 48. № 12. С. 1233.
22. Ильгисонис В.И., Ильин К.И., Новиков С.Г., Оленин Ю.А. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 11. С. 963.  
<https://doi.org/10.31857/S0367292121110172>