

УДК 533.9

ЗОНДОВОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ С ДИВЕРТОРОМ ТОКАМАКА TRT

© 2022 г. А. А. Айрапетов^а, *, Л. Б. Беграмбеков^а, Я. А. Садовский^а^а Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Москва, Россия

*e-mail: AAAirapetov@mephi.ru

Поступила в редакцию 09.06.2022 г.

После доработки 07.10.2022 г.

Принята к публикации 10.10.2022 г.

Выбор материалов, контактирующих с плазмой, и конфигурации для энергетических термоядерных реакторов до сих пор неочевиден. Помочь решить этот вопрос должен создаваемый токамак с реакторными технологиями (TRT). В этой связи максимально полное изучение воздействия плазмы на дивертор токамака при различных типах разрядов и анализ его последствий имеют большое значение. Диверторные зонды – устройства, измеряющие термические и корпускулярные потоки на поверхность дивертора и/или фиксирующие результаты их воздействия на дивертор, нашли широкое применение в термоядерных установках. В статье рассмотрены особенности, достоинства и недостатки представленных в литературе диверторных зондов, а также случаи использования образцов материалов или устройств для решения отдельных задач, выполняемых диверторными зондами. Представлена предварительная конструкция и тепловые расчеты диверторного зонда для токамака TRT, способного, по мнению авторов, выполнить комплекс измерений, позволяющих составить заключение о механизмах и закономерностях процессов на поверхности дивертора в зависимости от параметров и условий плазменного облучения, а также ускорить определение оптимальных материалов и режимов плазменного облучения тайлов дивертора.

Ключевые слова: токамак, TRT, дивертор, диверторный зонд, измерения, облучение дивертора, модификация материала

DOI: 10.31857/S0367292122600625

ВВЕДЕНИЕ

Проблеме дивертора как элемента токамака, подвергающегося наиболее интенсивному плазменному воздействию, уделяется большое внимание как на стадии разработки и создания практически каждого токамака, так и в течение его эксплуатации. В случае токамака с реакторными технологиями (TRT) связанные с дивертором проблемы – конструкция, материалы, условия его плазменного облучения, методы диагностики – требуют особого внимания, поскольку до сих пор нет адекватного решения для диверторов токамаков с длинными разрядными импульсами или квазистационарными режимами, приводящими к интенсивным длительным потокам плазмы на дивертор, и именно такие режимы предполагается получить на TRT [1]. Основные параметры TRT приведены в табл. 1.

Для разработки материалов и режимов плазменного облучения диверторов токамаков следующего поколения, способных работать в квазистационарном режиме, важно выявить специфику и параметры процессов взаимодействия

плазмы с дивертором в условиях экстремально высоких температур и интенсивностей плазменного облучения, реализуемых на его поверхности [3]. Для выполнения этой задачи TRT должен обладать диагностикой, позволяющими получить требуемую информацию. Рассмотрев методы диагностики, информация о которых опубликована на данный момент [4] (помимо статей данного выпуска), можно выделить несколько групп диагностик. Первая группа направлена на измерение основных параметров плазмы: активная спектроскопия [5], диагностики по потокам атомов [6, 7], измерение электронной плотности плазмы [8], диагностики быстрых ионов и убегающих электронов [9], диагностический инжектор пучков атомов [10]. Вторая группа касается измерения диверторной плазмы: диагностика примесей и водорода в диверторной плазме [11]; диагностика краевой и диверторной плазмы, совмещенными с томсоновским рассеянием/ЛИФ [12]. Эти диагностики позволяют определить параметры диверторной плазмы и влияние дивертора на нее. Непосредственно диагностике поверхности, контактирующей с плазмой, посвящена лазерная ди-

Таблица 1. Основные параметры ТРТ

Средняя плотность плазмы ($\langle n_e \rangle$), м^{-3}	до 2×10^{20} [1]
Длительность разряда, с	до 100 [1]
Температура плазмы T , кэВ	6–8 [1]
Плотность плазмы на сепаратрисе, м^{-3}	$n_{es} \gtrsim 0.5n_e$ [2]
Пиковая нагрузка на дивертор (без газовой мишени), $\text{МВт}/\text{м}^2$	30–40 [3]
Тепловая нагрузка на дивертор (в случае классического дивертора), $\text{МВт}/\text{м}^2$	До 15 [4]
Охлаждение дивертора	Деминерализованная вода [3]
Температура охлаждающей воды на входе в дивертор	70°C [3]

агностика первой стенки [13]. Таким образом, видно, что для решения отмеченной выше задачи необходимо разработать способ, позволяющий непосредственно проводить изучение материала дивертора после воздействия плазмы токамака на него.

Вопрос воздействия плазмы на материалы является одним из самых важных для создания термоядерного реактора. Для его решения проводится много исследований как на токамаках, так и на других установках [14]. Для изучения воздействия плазмы токамаков на материалы на разных установках применяются разные подходы. Практически на всех токамаках выполняется анализ диверторных тайлов или их отдельных элементов после воздействия плазмы токамаков. Такой подход является основным для токамаков JET [15, 16] и WEST [17, 18]. Такие исследования проводят после того, как элементы дивертора выработают свой ресурс, производится их замена или модернизация. Информация, получаемая таким образом, является интегральной за все время экспонирования, включающая разряды в различных режимах, по-разному воздействующих на дивертор. Поэтому на ее основе трудно сделать определенные заключения о закономерностях и процессах, инициируемых плазмой на поверхности дивертора. В ряде случаев часть анализа может проводиться без удаления дивертора из вакуумной камеры, путем размещения диагностического оборудования на манипуляторе внутри вакуумной камеры [19]. Это позволяет определить, когда и какие элементы дивертора получили значительные повреждения, и когда необходимо их удалять или забирать на полноценный анализ. Однако проведение даже такого предварительного анализа возможно лишь во время длительных этапов обслуживания токамака.

С целью анализа воздействия плазмы на материал широко используются специальные образцы, устанавливаемые на первой стене или на элементах дивертора [20]. При этом усреднение воздействия плазмы на материал дивертора происходит обычно уже по меньшему числу разрядов. Если такие образцы могут быть извлечены из

плазменной камеры без удаления элемента дивертора из вакуумной камеры, их анализ может выполняться проще и чаще. Такая диагностика будет применяться, например, в установке ITER [21, 22]. При этом в большинстве случаев для этого требуется развакуумирование камеры и проведение работ либо вручную, либо с применением манипуляторов. Это приводит к тому, что время, когда можно провести замену образцов, определяется общим планом работы установки, и удаление образцов для анализа не может быть проведено “по требованию”.

Этих недостатков лишены зонды, служащие для экспозиции образцов в плазме и имеющие собственную систему, обеспечивающую передвижение образцов без нарушения вакуума в камере токамака. Конструкция и функционал таких зондов сильно зависят от параметров токамака, месторасположения зонда, режима облучения. При этом каждый зонд (как и каждый токамак) является уникальной конструкцией, и, зачастую, имеет собственное имя, например, DIMES, MATEO, MAPP, MAPES.

Зонды для экспонирования образцов вне диверторной области используются во многих установках: COMPASS [23], HT-7 [24], TOMAS [25], EAST [26], KSTAR [27]. Они имеют собственную систему перемещения, отдельную вакуумную систему, но, обычно, не имеют активной системы охлаждения образцов. Отсутствие системы охлаждения объясняется либо низкими потоками энергии на стенку, либо малыми длительностями разрядов. Неохлаждаемые зонды могут размещаться и в диверторной области. Так для COMPASS проектируют неохлаждаемый зонд, рассчитанный на короткие импульсы с длительностями до 2 с и с потоками до $10 \text{ МВт}/\text{м}^2$ [28]. Также неохлаждаемыми являются системы зондов DIMES в токамаке DIII-D [29]; MAPP в NSTX [30]; не являющийся зондом, но очень близким по конструкции и функциям является лимитер токамака TEXTOR [31].

В некотором смысле неохлаждаемым “диверторным зондом” является дивертор токамака KTM

[32, 33]. В нем дивертор устроен так, что каждая из кассет дивертора может быть заменена без нарушения вакуума в токамаке. Это возможно было реализовать за счет того, что дивертор является неохлаждаемым при потоке тепла на дивертор $2\text{--}20\text{ МВт/м}^2$ и длительности импульса $2\text{--}4\text{ с}$.

Существуют диверторные зонды, которые обладают собственной системой охлаждения. Примером таких конструкций являются система DIM-II в токамаке ASDEX Upgrade [34] и МАТЕО в стеллараторе W7-X [35]. В случае DIM-II зондом является часть дивертора (2 из 128 внешних пластин), и в нем реализована та же система охлаждения, что и в самом диверторе. Есть два режима работы зонда: в первом — на зонд устанавливаются небольшие легкоосъемные образцы, а во втором — зонд повторяет конструкцию дивертора. При этом в первом режиме допустимы нагрузки значительно меньше, чем во втором. Максимальная длительность разряда при этом составляет 10 с, а время между разрядами — 20 минут, что определяется режимом тепловой нагрузки на дивертор.

В случае стелларатора W7-X зонд проектируется (активное проектирование было запланировано на 2018–2019 г. [36], о ходе работ было опубликовано в 2021 г. [35]) с собственной системой охлаждения, за счет чего возможно облучать отдельные образцы в стационарном режиме с плотностью мощности до 2 МВт/м^2 , а с большей плотностью мощности (до 10 МВт/м^2) можно облучать только поверхность самого зонда [35]. Одной из отличительных особенностей этого зонда относительно DIM-II является то, что зонд в данном случае не является частью дивертора, и возможна работа установки без зонда. Это является компромиссным решением, которое не позволяет получить на зонде характерные для дивертора режимы облучения. В случае МАТЕО его функции не ограничиваются (по крайней мере на ранней стадии проекта) облучением образцов, и предполагается, что он будет содержать несколько элементов, включая наборы зондов Ленгмюра, термомпары, зонд Маха, выводы оптоволоконка и пьезоэлектрический клапан для подачи газа [36]. Некоторые из перечисленных элементов применяются и в других зондах, но в меньшем количестве и при меньших тепловых нагрузках, чаще всего в диверторных зондах встречаются зонды Ленгмюра. Иногда диверторные зонды используются даже не для изучения взаимодействия плазмы с материалами, а только для измерения параметров плазмы. Так на диверторном зонде в установке TCV на подвижном вводе располагается только набор зондов Ленгмюра [37].

Широкое применение зондов Ленгмюра в токамаках [38] объясняется сравнительно простой реализацией. Они применимы в широких диапазонах параметров плазмы; их функционирова-

ние подробно описано теорией, позволяющей однозначно интерпретировать результаты, полученные с их помощью. Почти в каждой установке такие зонды присутствуют в диверторной области: EAST [39], W7-X [40], DIII-D [41], WEST [42], KSTAR [43], они будут применяться и в диверторе установки ITER [44]. Зонды позволяют измерять параметры плазмы (температуру, плотность), определять тепловой поток на поверхность. Они могут работать с плотностями порядка 10^{20} м^{-3} [45], при плотностях потока энергии 15 МВт/м^2 и выше, успешно применяются в режиме отрыва плазмы от дивертора (детачмент) [46, 47].

При экспонировании образца в плазме необходимо знать параметры, при которых он облучался, желательно проводить измерения в той же точке, а лучше на самом образце. Поэтому оптимальным является возможность использовать сам исследуемый образец в качестве зонда Ленгмюра. Для этого необходимо обеспечить нужную геометрию (поверхность зонда должна быть заглублена в плазму) и возможность измерения тока при подаче на него напряжения до 200 В.

В большинстве случаев сведения о взаимодействиях, полученных в термоядерных установках относились к случаям сравнительно кратковременных воздействий на материалы. Так как режимы облучения материалов, ожидаемые в токамаке ТРТ, достижимы на сравнительно небольшом количестве установок [1, 3, 48], то информация о развитии процессов с изменением структуры, фазового состояния, плотности материалов, которую можно будет получить на ТРТ, представляет интерес для создания диверторов токамаков следующих поколений.

Перечисленные обстоятельства побудили авторов предлагаемой статьи приступить к разработке диверторного зонда для работы в токамаке ТРТ. Далее представлены основные задачи, для решения которых создается диверторный зонд, а также способы их реализации; описаны общая структура зонда, компоненты зонда, особенности конструкции и условия их работы.

ЗАДАЧИ, РЕШАЕМЫЕ ДИВЕРТОРНЫМ ЗОНДОМ

В соответствии с целями создания токамака ТРТ можно говорить о двух основных задачах, стоящих перед создаваемым зондом. Первой задачей является получение комплекса данных, необходимых для однозначной интерпретации результатов измерений и разработки на их основе описания процессов, инициируемых на поверхности дивертора плазменным облучением. Для успешного выполнения этой задачи зонд должен параллельно обеспечивать измерение параметров плазмы, воздействующей на дивертор, и реги-

страцию изменений, происходящих на поверхности и в объеме материала дивертора в результате плазменного облучения с измеренными параметрами. Этот комплекс измерений включает: измерение температуры дивертора, плотности тока ионов и электронов на дивертор, а также исследования, позволяющие судить о воздействии плазменного облучения на поверхность дивертора в течение одного или серии однотипных импульсов.

Вторая задача заключается в проведении измерений, необходимых для выявления процессов в материале дивертора при длинных импульсах с большой корпускулярной и термической нагрузкой на его поверхность. Такое исследование должно включать анализ процессов эрозии поверхности дивертора, изучение модификации состава и структуры его материала. Для выполнения этой задачи описанные выше исследования будут дополняться также анализом взаимосвязи характера модификации материала дивертора при длительном воздействии потоков плазмы с явлениями перенапыления частиц материала. С этой целью предполагается использовать современные методы анализа материалов, лабораторные установки, имитирующие условия эксплуатации диверторов следующего поколения термоядерных установок.

ДИВЕРТОРНЫЙ ЗОНД В ТОКАМАКЕ ТРТ

Конструкцию зонда и устройства, обеспечивающего его работу, определила необходимость отвечать всем перечисленным выше требованиям, а также соответствовать особенностям конструкции дивертора и его расположения относительно патрубка вакуумной камеры ТРТ.

Обращенные к плазме поверхности дивертора сформированы пятью компонентами: внутренней и наружной вертикальными мишенями (ВВМ и НВМ), внутренней и наружной отражающими мишенями (ВОМ и НОМ) и куполом [3]. Положение сепаратрисы в стационарном режиме и в случае качания и положение дивертора относительно вакуумного патрубка позволяют разместить диверторный зонд на наружной вертикальной мишени. При этом может быть выбрано размещение зонда в области сепаратрисы, в зоне ее качания или в удаленной от нее области.

Зонд предполагается вводить в вакуумную камеру ТРТ через фланец диверторного патрубка и подводить к дивертору по направляющей трубе с помощью трубы-манипулятора (предварительная геометрия представлена на рис. 1). Так как часть зонда, обращенная к плазме, должна быть параллельна облучаемой плоскости дивертора, то логично сделать так, чтобы диверторный зонд подходил к дивертору перпендикулярно его плос-

кости. Поэтому труба-манипулятор должна позволять проходить как минимум один изгиб направляющей трубы, т.е. быть условно гибкой. В качестве материала условно гибкой трубы может выступать титан, как это реализуется в эндоскопе диагностики пыли Dust Monitor ITER [49]. Величина предела упругости титана позволяет изгибать трубку диаметром 8 мм с радиусом изгиба 0.8 м без перехода в режим пластической деформации (на рис. 1 радиус изгиба направляющей трубы составляет 0.8 м).

КОНСТРУКЦИЯ ДИВЕРТОРНОГО ЗОНДА

Конструкция зонда определяется его функциями. Для возможности оперативного проведения анализа результатов воздействия плазмы на зонд его облучаемая часть должна быть выполнена в виде съемного исследуемого образца. Соответствие условий облучений сменного образца зонда условиям облучения тайла достигается при предотвращении заметной разницы их температур при плазменном облучении, что в свою очередь обеспечивается наличием системы охлаждения сменного образца. Наконец, для измерения токов ионов и электронов на зонд и использования его в режиме зонда Ленгмюра, требуется изолирование сменного образца от остальных частей зонда (характерная разность потенциалов между ними может составлять до 200 В).

Исходя из вышеперечисленного, была разработана конструкция зонда. На рис. 2а представлено расположение зонда в диверторе. Тайл (1) представляет собой массив циркониевой бронзы (2) с каналом охлаждения диаметром 12 мм, к которому через медный слой толщиной 1–2 мм крепятся вольфрамовые плитки толщиной 4 мм [3]. Так как канал охлаждения тайла занимает приблизительно половину его ширины (2), зонд располагается между двумя соседними тайлами (3) уменьшенной ширины так, что его поверхность находится в одной плоскости с поверхностью тайлов. Сменный образец в представленной конструкции имеет размеры облучаемой поверхности $8 \times 21 \text{ мм}^2$, которые определяются высотой тайла (в представленной конструкции – 22 мм), зазорами между тайлами 0.5 мм и зазорами между зондом и тайлами 1 мм.

Сменный образец представлен на рис. 2б. В базовом варианте материалом, облучаемым плазмой, является вольфрам. Вольфрамовая часть образца (1) толщиной 3 мм припаяется к медному основанию (2), толщина которого также равна 3 мм. В нем располагается отверстие для термопары (3). Фиксация сменного образца на держателе осуществляется с помощью упругих бронзовых лапок (3), которые припаяны к основанию.

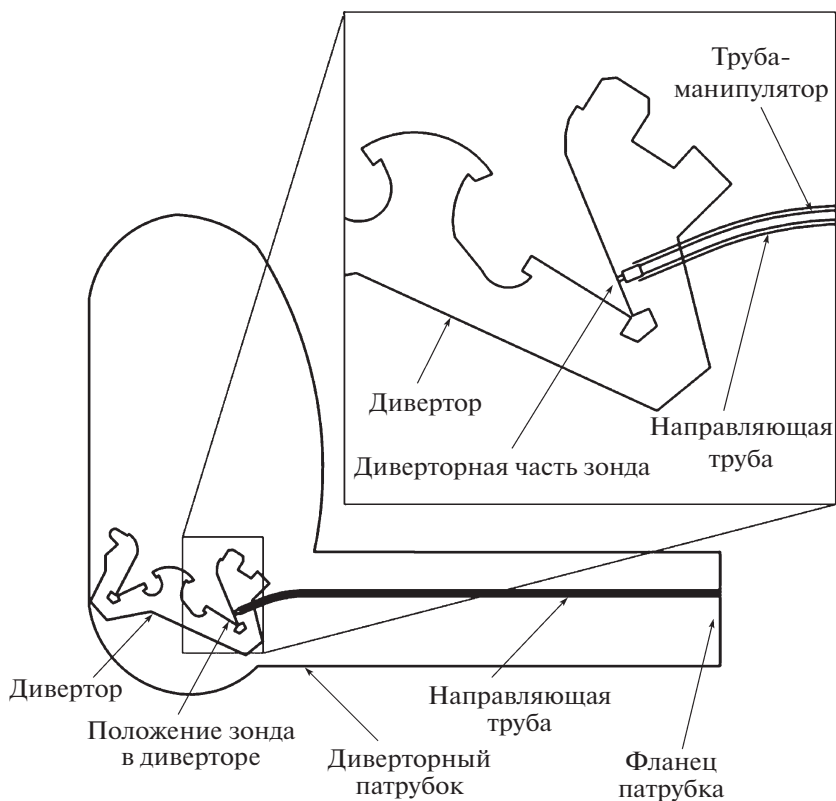


Рис. 1. Геометрия ввода диверторного зонда в вакуумную камеру токамака и его положение в токамаке ТРТ.

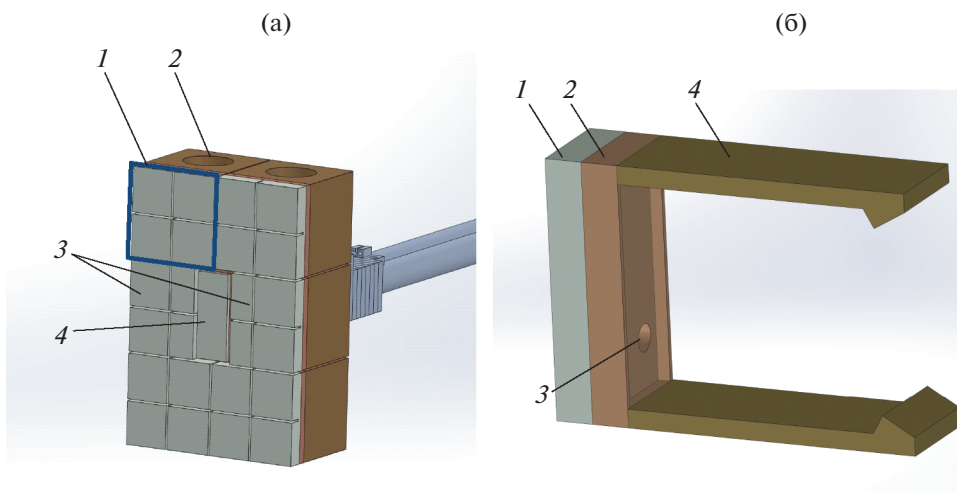


Рис 2. а) – Расположение сменного образца в диверторе: 1 – тейл стандартной ширины, 2 – бронзовое основание тейла с каналом охлаждения, 3 – тейлы уменьшенной ширины, 4 – сменный образец; б) – сменный образец: 1 – вольфрамовая часть образца, 2 – медное основание, 3 – отверстие для термпары, 4 – бронзовые лапки.

Сменный образец, расположенный на держателе, представлен на рис. 3, и так как зонд несимметричный, плоскость разреза проходит под углом к боковым поверхностям. Сменный образец (1) с помощью упругих лапок прижимается к охлаждаемому держателю из циркониевой брон-

зы (2). Форма лапок и основания подобраны так, чтобы при установленном образце они находились в деформированном состоянии и обеспечивали прижим образца к держателю. Охлаждение держателя обеспечивается потоком деминерализованной воды через канал охлаждения (3) и ко-

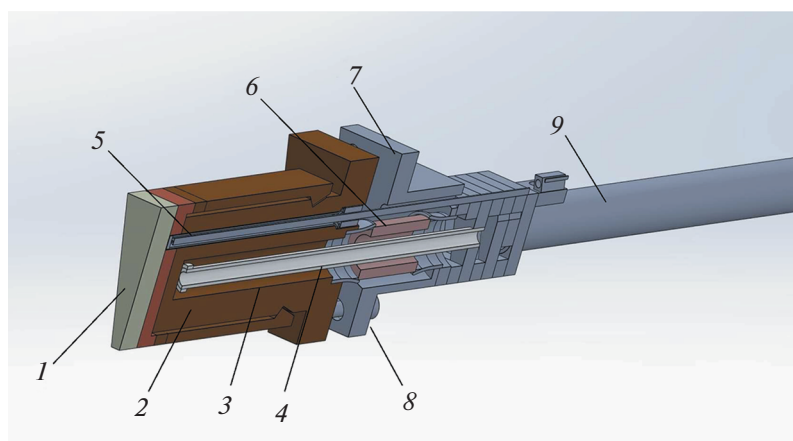


Рис. 3. Диверторный зонд и его элементы: 1 – сменный образец, 2 – охлаждаемый держатель, 3 – канал охлаждения, 4 – внутренняя диэлектрическая трубка охлаждения, 5 – термопара образца, 6 – внешняя керамическая трубка охлаждения, 7 – оголовник ввода, 8 – винты с изоляторами, 9 – трубы охлаждения (вторая находится вне плоскости разреза).

аксиально расположенную в нем диэлектрическую трубку (4). Также через охлаждаемое основание проходит термопара (5) от образца. Охлаждающая жидкость подается в канал охлаждения через керамическую трубку (6), которая одним концом припаяна к охлаждаемому основанию, а другим – к оголовнику ввода (7). Крепление охлаждаемого основания к оголовнику дублируется винтами с изоляторами (8), через один из этих винтов подводится провод, подающий напряжение на зонд (на рис. 3 не показан). С другой стороны к оголовнику подходят трубы охлаждения (9). Так как, исходя из размеров, охлаждение держателя образца реализуется концентрическими трубками, а подвод и отвод охлаждающей жидкости предпочтительно делать параллельными трубками, одна из функций оголовника – это перевод охлаждающих потоков из параллельных в коаксиальные. Это осуществляется с помощью сваренных пластин с внутренними отверстиями разной геометрии.

Приведенная выше конструкция создавалась на основе тепловых расчетов. Для оценки теплового контакта между сменным образцом и его держателем можно использовать данные для коэффициента теплоотдачи между двумя плоскими деталями из меди ($5000 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ при сдвигивающем усилии 0.6 МПа , шероховатость около 1 мкм [49]). При потоке 15 МВт/м^2 за счет такого теплового сопротивления перепад температур поверхностей составит величину около 3000 К . Для уменьшения теплового сопротивления может быть использована термопаста на силиконовой основе (например, [50], рабочая температура до 350°C , теплопроводность 12.5 Вт/мК) или высокотемпературная вакуумная паста (например, PELCO 16047, с рабочей температурой до 927°C и

теплопроводностью 9 Вт/мК [51]). Использование этих термопаст может обеспечить коэффициент теплоотдачи порядка $10^6 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ при рекомендованной толщине около 10 мкм (аналогично никелевому припою при толщине 100 мкм). Соответственно, при таком тепловом контакте перепад температуры составит около 15 К .

Так как стоит задача сравнить температуры облучаемой поверхности зонда и тайла, то были проведены расчеты для обеих конструкций. Для проведения тепловых расчетов необходимо знать температуру поверхностей, охлаждаемых водой. Для тайла оценка коэффициента теплопередачи при скорости воды 10 м/с , температуре на входе 70°C через канал диаметром 12 мм [3] без учета “закрученности” дает значение $5 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$. Закрученность увеличивает теплопередачу более чем в два раза [52]. Поток тепла на тайл при плотности мощности 15 МВт/м^2 составляет около 7 кВт , площадь охлаждаемой водой поверхности около 800 мм^2 . Соответственно, разница температур воды и стенки трубы при коэффициенте теплопередачи $1 \times 10^5 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ составит 90°C . Оценка коэффициента теплопередачи для зонда составляет при той же скорости и температуре потока величину порядка $7 \times 10^4 \text{ Вт/м}^2 \text{ К}$ (без учета разворота потока, который увеличивает теплопередачу). На поверхность зонда приходит поток тепла около 2.5 кВт , что при охлаждаемой площади 500 мм^2 дает разницу температур воды и стенки около 70°C . Так как разница температуры стенок, охлаждаемых водой, для тайла и зонда незначительна, в дальнейших расчетах будет применяться одинаковая температура стенок, равная 160°C , для обоих случаев.

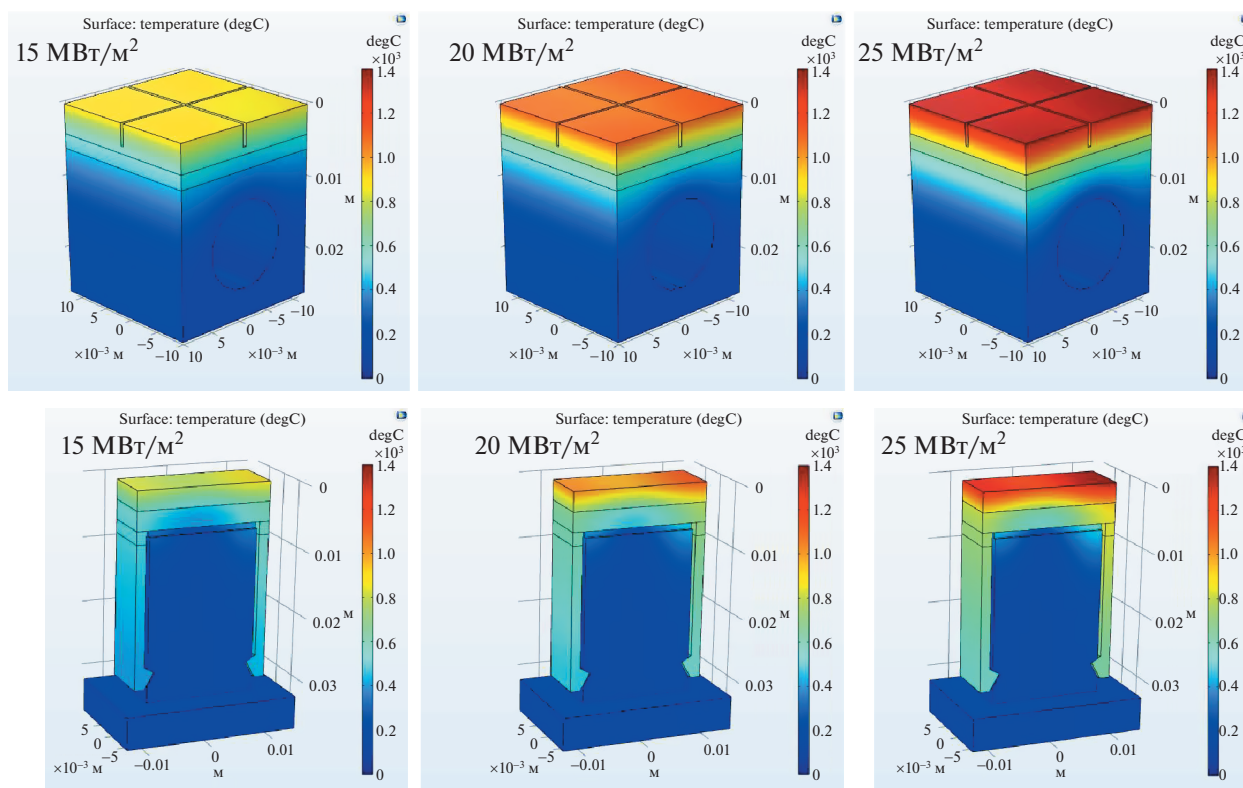


Рис. 4. Распределение температур для тайла (вверху) и зонда (внизу) при тепловых потоках на облучаемую поверхность 15, 20, 25 МВт/м².

В среде COMSOL Multiphysics был проведен расчет температур для зонда и тайла при тепловых потоках на облучаемые поверхности 15, 20, 25 МВт/м². Температура охлаждаемых стенок была взята 160°С, коэффициенты серости поверхностей – 0.2, коэффициент теплопередачи паянных контактов и контакта образец-держатель составляют 10⁶ Вт/м² К.

Полученные распределения температур представлены на рис. 4 (тепловые шкалы везде одинаковы: от 0 до 1400°С). Полученные результаты показывают, что температура облучаемой поверхности тайла составляет величины около 900, 1100 и 1400°С, образца – 850–900, 1000–1100, 1200–1400 при потоках 15, 20, 25 МВт/м². Температура поверхности зонда имеет небольшую неоднородность за счет несимметричности зонда, и на большей части поверхности соответствует температуре поверхности тайла.

В ходе тепловых расчетов была проведена также оценка разницы температуры, измеряемой термопарой, и температуры поверхности зонда. Эта величина составила 200°С при тепловом потоке 15 МВт/м².

С целью проверки результатов теплового расчета зонда предполагается тестирование его прототипа на установке СОПТМАТ (НИЯУ МИФИ,

Москва) [53, 54]. Данная установка позволяет проводить облучение образцов ионами или электронами в импульсном или стационарном режиме с мощностью до 270 МВт/м² [55]. В ходе тестирования будут получены данные для возможной модификации конструкции зонда.

ОСОБЕННОСТИ И ФУНКЦИИ ДИВЕРТОРНОГО ЗОНДА

Конструкция диверторного зонда позволит провести измерения термических и корпускулярных потоков, облучающих тайл дивертора, а также изучить процессы на поверхности и в объеме тайла в течение одиночного или многочисленных длинных разрядных импульсов токамака.

Изоляция сменного образца от тайла сделает возможным измерения токов ионов плазмы на образец. Для работы в режиме зонда Ленгмюра диверторный зонд будет устанавливаться так, чтобы поверхность сменного образца оказывалась выдвинутой над облучающей поверхностью тайла.

Измерение в реальном времени “in situ” температуры сменных образцов и тока облучающих ионов при выполнении перечисленных выше и других измерений сделает возможным установить

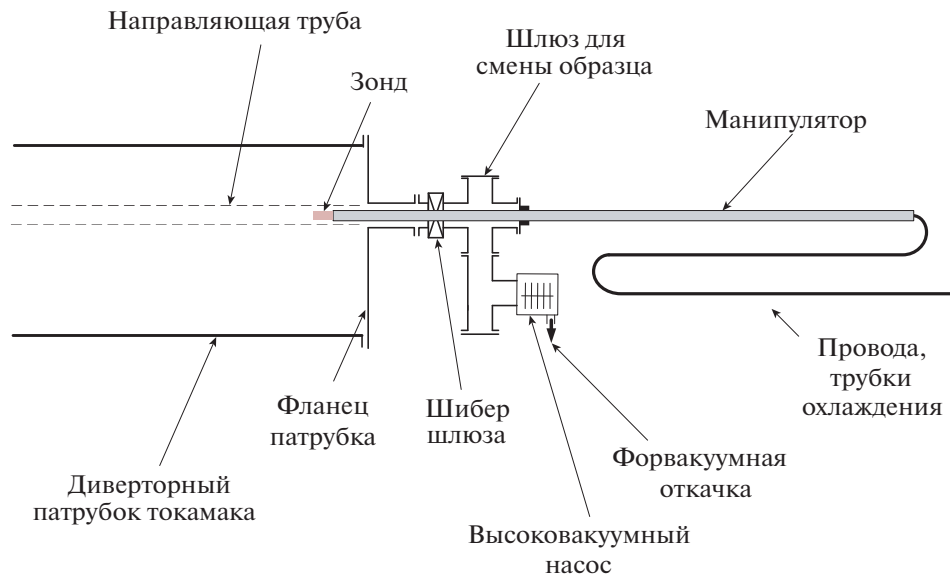


Рис. 5. Общая схема зондового устройства и вакуумной системы зонда.

соответствие между параметрами плазменного воздействия на дивертор и характером процессов на его поверхности и в объеме материалов.

Анализ экспонированных в плазме образцов, выполненных из материала дивертора, позволит определить скорость распыления дивертора; характер модификации структуры и рельефа его поверхности; количество и состав твердотельной примеси, осевшей на поверхности дивертора; составы и свойства поверхностных слоев, сформировавшихся на поверхности при осаждении примесей, а также количество и характер удержания дивертором газов, внедрившихся в его объем, в том числе при осаждении примесей.

Возможность извлекать из токамака и анализировать экспонированные в плазме образцы, заменять их без нарушения вакуума в камере токамака и нарушения работы дивертора, позволит изучать динамику развития процессов на его поверхности, их зависимость от длительности облучения, типов и параметров разряда, температуры поверхности дивертора.

ЗОНДОВОЕ УСТРОЙСТВО И ВАКУУМНАЯ СИСТЕМА ЗОНДА

Зондовое устройство (рис. 5) присоединяется к токамаку через диверторный патрубок и обеспечивает возможность смены образца без нарушения вакуума в камере токамака. Устройство включает шибер, шлюз для смены образцов, вакуумный ввод, через который проходит труба-манипулятор, вакуумную систему, включающую вакуумные насосы, клапаны, датчики, а также не показанные на рис. 5 элементы, обеспечивающие

возможность проводить работы по монтажу и обслуживанию зондового устройства и вакуумной системы.

Рассматривается два варианта устройства: для проведения манипуляций с образцами вручную и с помощью автоматической механизированной системы. Во втором случае в шлюзе располагается автоматизированная система смены образцов с камерой хранения свежих образцов и камерой хранения экспонированных образцов.

В обоих вариантах общий порядок работы устройства следующий. На зонд устанавливается образец (при необходимости – с использованием термопасты), после чего он с помощью манипулятора перемещается в токамак и фиксируется в диверторе. Позиционирование манипулятора внутри токамака осуществляется направляющей трубой, закрепленной на вакуумной камере.

После экспонирования образца зонд выводится в шлюз, где экспонированный образец убирается с зонда, и на зонд устанавливается новый образец. Экспонированный образец после этого может либо передаваться дальше на анализ, либо храниться внутри системы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлена концептуальная конструкция диверторного зонда для токамака ТРТ, предназначенного для выполнения измерений параметров как плазменного облучения дивертора, так и процессов на поверхности и в объеме материала дивертора при одиночных разрядах и при длительном плазменном облучении.

Зонд вводится в плазменную камеру через диверторный порт и устанавливается в тайле наружной отражающей мишени так, что поверхность его сменного образца располагается в плоскости облучаемой поверхности тайла. Зонд сможет измерять “in situ” характеристики ионных и термических потоков на сменный образец, также предусматривается возможность использовать зонд в качестве зонда Ленгмюра. Анализ экспонированных в плазме образцов, выполненных из материала дивертора, позволит определить скорость распыления дивертора, характер модификации структуры и рельефа его поверхности, количество и состав твердотельной примеси, осевшей на поверхности дивертора, состав и структуру образовавшихся поверхностных слоев, количество газов, внедрившихся в его объем и особенности их удержания.

Зондовое устройство и вакуумная система зонда обеспечивают установку сменного образца на зонд, ввод зонда в токамак, его фиксацию в тайле дивертора, вывод зонда из токамака после экспонирования сменного образца в плазме и его замену на новый образец. Предусматриваются варианты с ручной и автоматизированной работой зондового устройства, а также автоматизированное управление программой выполнения измерений и работой зондовой системы.

Предполагается, что измерение “in situ” температуры сменных образцов и тока облучающих ионов плазмы, а также возможность извлекать из токамака и анализировать сменные образцы без нарушения работы дивертора позволит устанавливать соответствие между параметрами плазменного воздействия на дивертор и характером процессов на его поверхности и в объеме материала и изучать динамику развития этих процессов от длительности облучения, типов и параметров разряда.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. 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>
2. Кукушкин А.С., Пшенов А.А. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 12. С. 1123–1129. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110202>
3. Мазуль И.В., Гиниятуллин Р.Н., Кавина А.А., Литуновский Н.В., Маханьков А.Н., Пискарев П.Ю., Тандчук В.Н. // Физика плазмы. 2021. Т. 47. № 12. С. 1103. <https://doi.org/10.31857/S0367292121110214>
4. Тез. докл. XIX Всероссийская конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, 27 сентября–01 октября 2021 г., Сочи. URL: <http://dvp.iterrf.ru/tezisy>
5. Тугаринов С.Н., Красильников А.В., Кузьмин Н.В., Серов В.В., Серов С.В. // Тез. докл. XIX Всероссийской конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 71.
6. Афанасьев В.И., Гончаров П.Р., Козловский С.С., Мельник А.Д., Миронов М.И., Наволоцкий А.С., Несеичев В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В. // Тез. докл. XIX Всероссийская конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 73.
7. Артемьев К.К., Красильников А.В., Кормилицын Т.М., Миронов М.И., Афанасьев В.И., Петров М.П., Петров С.Я., Кедров И.В., Антропов Д.А. // Тез. докл. XIX Всероссийская конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 92.
8. Афонин А.Ю., Афонин К.Ю., Вершков В.А., Петров В.Г., Субботин Г.Ф., Шелухин Д.А. // Тез. докл. XIX Всероссийская конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 81.
9. Шевелев А.Е., Хилькевич Е.М., Ильясова М.В., Дойников Д.Н., Полуновский И.А., Найденов В.О. // Тез. докл. XIX Всероссийская конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 79.
10. Иванов А.А., Давыденко В.И., Ступишин Н.В. // Тез. докл. XIX Всероссийская конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 84.
11. Вукулов К.Ю., Андреев Е.Н., Горбунов А.В. // Тезисы докладов XIX Всероссийская конференция Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 68.
12. Мухин Е.Е., Толстяков С.Ю., Курские Г.С., Горбунов А.В., Вукулов К.Ю., Лисица В.С., Левашова М.Г., Жильцов Н.С., Соловей В.А., Бабинов Н.А., Корнев А.Ф., Коваль А.Н., Чернаков П.В. // Тез. докл. XIX Всероссийская конф. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 75.
13. Раздобарин А.Г., Дмитриев А.М., Елец Д.И., Мухин Е.Е., Снугирев Л.А., Гаспарян Ю.М., Булгадарян Д.Г., Вовченко Е.Д., Ефимов В.С., Ефимов Н.Е., Крат С.А., Синельников Д.Н., Алексеев И.В. // Тезисы докладов XIX Всероссийская конференция. Диагностика высокотемпературной плазмы, Сочи. 2021. С. 86.
14. Linsmeier Ch., Unterberg B., Coenen J.W., Doerner R.P., Greuner H., Kreter A., Linke J., Maier H. // Nuclear Fusion. 2017. 57 (9). 092012. <https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa4feb>
15. Coad J.P., Matthews G.F., Widdowson A.M., Rubel M., Likonen J., Bekris N., Brezinsek S., Mayer M. // Fusion Engineering and Design. 2019. V. 138. P. 78. <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2018.10.002>
16. Rubel M., Coad J.P., Widdowson A., Matthews G.F., Esser H.G., Hirai T., Likonen J., Linke J., Lungu C.P., Mayer M., Pedrick L., Ruset C. // Journal of Nuclear Materials. 2013. V. 438. P. S1204. <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2013.01.266>
17. Tsitron E., Pegourie B., Gunn J.P., Bernard E., Bruno V., Corre Y., Delpech L., Diez M., Douai D., Ekedahl A., Fedorczak N., Gallo A., Loarer T., Vartanian S., Gaspar J., Le Bohec M., Rigollet F., Bisson R., Brezinsek S., Dittmar T., De Temmerman G., Hakola A., Wauters T., Balden M., Mayer M., and WEST Team // Nuclear Fu-

- sion. 2022. V. 62. № 7. 076028.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2ef3>
18. Gunn J.P., Bucalossi J., Corre Y., Diez M., Delmas E., Fedorczak N., Grosjean A., Firdaouss M., Gaspar J., Loarer T., Missirlian M., Moreau P., Nardon E., Reux C., Richou M., Tsitroni E. // *Nuclear Materials and Energy*. 2021. V. 27.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100920>
 19. Diez M., Corre Y., Delmas E., Fedorczak N., Firdaouss M., Grosjean A., Gunn J.P., Loarer T., Missirlian M., Richou M., Tsitroni E., the WEST Team // *Nucl. Fusion*. 2021. V. 61. 106011.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac1dc6>
 20. Hakola A., Brezinsek S., Douai D., Balden M., Bobkov V., Carralero D., Greuner H., Elgeti S., Kallenbach A., Krieger K., Meisl G., Oberkofler M., Rohde V., Schneider P., Schwarz-Selinger T., Lahtinen A., De Temmerman G., Caniello R., Ghezzi F., Wauters T., Garcia-Carrasco A., Petersson P., Bogdanovic Radovic I., Siketic Z., ASDEX Upgrade Team and EUROfusion MST Team // *Nuclear Fusion*. 2017. V. 57. № 6. 066015.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa69c4>
 21. Campbell D.J., Akiyama T., Barnsley R., Bassan M., Baylor L.R., Bertalot L., Escourbiac F., Giancarli L.M., Gitton P., Guirao J., Kocan M., Krasilnikov V., Kruezi U., Lehnen M., Maruyama S., Ma Y., Merola M., Mitchell N., Pitcher C.S., Raffray A.R., Reichle R., Shigin P., Sirinelli A., Udintsev V., van der Laan J.G., Vayakis G., Wallander A., Walsh M., Watts C. // *Journal of Fusion Energy*. 2019. 38 (1). P. 11.
<https://doi.org/10.1007/s10894-018-0187-9>
 22. Reichle R., Andrew P., Bates P., Bede O., Casal N., Choi C.H., Barnsley R., Damiani C., Bertalot L., Dubus G., Ferreol J., Jagannathan G., Kocan M., Leipold F., Lisgo S.W., Martin V., Palmer J., Pearce R., Philipps V., Pitts R.A., Pampin R., Passedat G., Puiu A., Suarez A., Shigin P., Shu W., Vayakis G., Veshchev E., Walsh M. // *Journal of Nuclear Materials*. 2015. V. 463. P. 180.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2015.01.039>
 23. Matějček J., Weinzettel V., Macková A., Malinský P., Havránek V., Naydenkova D., Klevarová V., Petersson P., Gasior P., Hakola A., Rubel M., Fortuna E., Kolehmainen J., Tervakangas S. // *Journal of Nuclear Materials*. 2017. V. 493. P. 102.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2017.06.009>
 24. Zhu D.H., Chen J.L., Zhou Z.J., Yan R., Ding R. // *Journal of Nuclear Materials*. 2012. V. 435. № 1–3. P. 107.
<https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.12.044>
 25. Gorjaev A., Wauters T., Möller S., Brakel R., Brezinsek S., Buermans J., Crombé K., Dinklage A., Habrichs R., Höschel D., Krause M., Kovtun Yu., López-Rodríguez D., Louche F., Moon S., Nicolai D., Thomas J., Ragona R., Rubel M., Rüttgers T., Petersson P., Brunzell P., Linsmeier Ch., Van Schoor M. // *Review of Scientific Instruments*. 2021. V. 92. 023506.
<https://doi.org/10.1063/5.0033229>
 26. Liu H., Zhou H., Zhao M., Wu J., Xu Y., Wang J., Zhang Y., Sun N., Ding F., Xu Q., Luo G. // *IEEE Transactions on Plasma Science*. 2018. V. 46. № 6. P. 2198–2202.
<https://doi.org/10.1109/TPS.2018.2825234>
 27. Son S.H., Hong S.-H., Kim J., Kim J.Y., Kim H.S., Ding F., Luo G.-N., Németh J., Zoletnik S., Fenyvesi A., Pitts R. // *Fusion Engineering and Design*. 2016. V. 109–111. Pt. A. P. 286–289.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2016.03.011>
 28. Lukes S., Horacek J., Veselovsky V., Vondracek P., Sestak D., Adamek J., Weinzettel V., Duran I. // *Journal of Instrumentation*. 2022. V. 17. C02007.
<https://doi.org/10.1088/1748-0221/17/02/C02007>
 29. Wong C.P.C., Junge R., Phelps R.D., Politzer P., Puhn F., West W.P., Bastasz R., Buchenauer D., Hsu W., Brooks J., Hua T. // *Journal of Nuclear Materials*. 1992. V. 196–198. P. 871.
[https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(06\)80159-5](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(06)80159-5)
 30. Taylor C.N., Heim B., Gonderman S., Allain J.P., Yang Z., Kaita R., Roquemore A.L., Skinner C.H., Ellis R.A. // *Review of Scientific Instruments*. 2012. V. 83. 10D703.
<https://doi.org/10.1063/1.4729262>
 31. Schweer B., Brezinsek S., Esser H.G., Huber A., Mertens Ph., Musso S., Philipps V., Pospieszczyk A., Samm U., Sergienko G., Wienhold P. // *Fusion Science and Technology*. 2005. 47:2. P. 138.
<https://doi.org/10.13182/FST05-A695>
 32. Azizov E.A., Dokouka V.N., Dvorkin N.Ya., Khayrutdinov R.R., Korotkov V.A., Kovan I.A., Krylov V.A., Leykin I.N., Mineev A.B., Shapovalov G.V., Shestakov V.P., Shkolnik V.S., Tazhibaeva I.L., Tikhomirov L.N., Velikhov E.P. // *Plasma Devices and Operations*. 2003. 11:1. P. 39.
<https://doi.org/10.1080/1051999031000088457>
 33. Korotkov V.A., Azizov E.A., Cherepnin Yu.S., Dokouka V.N., Dvorkin N.Ya., Khayrutdinov R.R., Krylov V.A., Kuzmin E.G., Leykin I.N., Mineev A.B., Shkolnik V.S., Shestakov V.P., Shapovalov G.V., Tazhibaeva I.L., Tikhomirov L.N., Yagnov V.A. // *Fusion Engineering and Design*. 2001. V. 56. P. 831–835.
[https://doi.org/10.1016/S0920-3796\(01\)00361-1](https://doi.org/10.1016/S0920-3796(01)00361-1)
 34. Zammuto I., Herrmann A., Jaksic N., Li M., Balden M., Rohde V., Vorbrugg S., Greuner H., Neu R., Kallenbach A. // *Fusion Eng. Des.* 2019. V. 146. Pt. B. P. 2434.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.04.011>
 35. Hubeny M., Höschel D., Neubauer O., Hoek R., Czymbek G., Naujoks D., Hathiramani D., Bardawil D., Unterberg B., König R., Brezinsek S., Linsmeier Ch. // *Fusion Eng. Des.* 2021. V. 167. 112297.
<https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2021.112297>
 36. Hubeny M., Höschel D., Rack M., Neubauer O., Czymbek G., Unterberg B., Brezinsek S., Linsmeier C., Bozhenkov S., König R., Hathiramani D. // *Nuclear Materials and Energy*. 2019. V. 18. P. 77.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2018.11.028>
 37. De Oliveira H., Theiler C., Elaian H., and TCv Team // *Review of Scientific Instruments*. 2021. 92. 043547.
<https://doi.org/10.1063/5.0043523>
 38. Matthews G.F. // *Plasma Physics and Controlled Fusion*. 1994. V. 36. № 10. 1595
<https://doi.org/10.1088/0741-3335/36/10/002>
 39. Meng L.Y., Xu J.C., Liu J.B., Wang L., Qian X.Y., Chen L., Liu X., Xu G.S., Liang R.R., Huang J., Lan H., Mao S.T., Duan Y.M., Li A., Yu L., Wang P., Yang Q.Q., Zhang B., Wang Y.M. // *Nuclear Materials and Energy*.

2021. V. 27. 100996.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.100996>
40. Rudischhauser L., Endler M., Höfel U., Hammond K.C., Kallmeyer J.P., Blackwell B.D., and Wendelstein 7-X Team // Review of Scientific Instruments. 2020. 91. 063505.
<https://doi.org/10.1063/1.5143013>
41. Wang H.Q., Watkins J.G., Guo H.Y., Groth M., Jarvinen A.E., Leonard A.W., Ren J., Thomas D.M., Boedo J. // Physics of Plasmas. 2021. V. 28. 052509.
<https://doi.org/10.1063/5.0048609>
42. Gaspar J., Corre Y., Fedorczak N., Gunn J.P., Bourdelle C., Brezinsek S., Bucalossi J., Chanet N., Dejarnac R., Firdaous M., Gardarein J.-L., Laffont G., Loarer T., Pocheau C., Tsitroni E. and the WEST Team // Nuclear Fusion. 2021. V. 61. № 9. 096027.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac1803>
43. Bak J.G., Oh Y.S., Kim H.S., Hahn S.H., Yoon S.W., Jeon Y.M., Xiao W.W., Ko W.H., Kim W.C., Kwak J.G., Woo H.J., Chung K.S., the KSTAR project team // Contrib. Plasma Phys. 2013. V. 53. P. 69.
<https://doi.org/10.1002/ctpp.201310012>
44. Zhao W., Wang Y., Jin Y., Zhao L., Zhou H., Nie L., Zhong G., Liu C., Watts C., Gunn J.P. // Fusion Science and Technology. 2020. V. 76. Is. 2. P. 79.
<https://doi.org/10.1080/15361055.2019.1674123>
45. Kuang A.Q., Brunner D., LaBombard B., Leccacorvi R., Vieira R. // Review of Scientific Instruments. 2018. V. 89(4). 043512.
<https://doi.org/10.1063/1.5023905>
46. Guillemaut C., Lennholm M., Harrison J., Carvalho I., Valcarcel D., Felton R., Griph S., Hogben C., Lucock R., Matthews G.F., Perez Von Thun C., Pitts R.A., Wiesen S., JET contributors // Plasma Physics and Controlled Fusion. 2017. V. 59. № 4. 045001.
<https://doi.org/10.1088/1361-6587/aa5951>
47. Liu J.B., Wang L., Guo H.Y., Wang H.Q., Xu G.S., Ding F., Xu J.C., Liu X.J., Yuan Q.P., Wu K., Liu S.C., Sang C.F., Meng L.Y., Feng W., Hyatt A., Leonard A.W., Thomas D., Zhang T., Zhou T.F., Xiao B.J., Gong X.Z., Li J., Wan B.N., the EAST Team // Nuclear Fusion. 2019. V. 59. № 12. 126046.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ab4639>
48. Bucalossi J. et al. // Nucl. Fusion. 2022. 62. 042007.
<https://doi.org/10.1088/1741-4326/ac2525>
49. Tariq A., Asif M. // Heat Mass Transfer. 2016. V. 52. P. 291.
<https://doi.org/10.1007/s00231-015-1551-1>
50. Thermal Grizzly. High performance cooling solutions: Kryonaut Thermal Grease Paste, URL: <https://www.thermal-grizzly.com/produkte/2-kryonaut> (Дата обращения 25.08.2022).
51. Ted Pella, Inc. Microscopy Products for Science and Industry, URL: https://www.tedpella.com/tech-note_html/16047-TN-V1-06232009.pdf (Дата обращения 25.08.2022).
52. Salah El-Din El-Morshedy // Nuclear Materials and Energy. 2021. V. 28. 101035.
<https://doi.org/10.1016/j.nme.2021.101035>
53. Азизов Э.А., Айрапетов А.А., Беграмбеков Л.Б., Бужинский О.И., Вергазов С.В., Грунин А.В., Гордеев А.А., Захаров А.М., Калачев А.М., Мазуль И.В., Рахманов Р.А., Садовский Я.А., Шигин П.А. // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. 2014. Т. 37. № 4. С. 30.
<https://doi.org/10.21517/0202-3822-2014-37-4-30-38>
54. Ayrapetov A.A., Begrambekov L.B., Dyachenko M.Yu., Evsin A.E., Grunin A.V., Kalachev A.M., Sadovskiy Ya.A., Shigin P.A. // Journal of Physics: Conf. Ser. 2016. T. 700. № 1. C. 012041.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/700/1/012041>
55. Sadovskiy Ya., Begrambekov L., Shigin P., Ayrapetov A., Bidlevich O., Grunin A., Utkov N. // Journal of Physics: Conf. Ser. 2017. V. 789. 012044.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/789/1/012044>