

УДК 533.9

## ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ СИСТЕМЫ ДИАГНОСТИКИ ПО ПОТОКАМ АТОМОВ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ДЛЯ МЕЖДУНАРОДНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ИТЭР

С.Я. Петров<sup>1</sup>, В.И. Афанасьев<sup>1</sup>, А.Д. Мельник<sup>1</sup>, М.И. Миронов<sup>1</sup>, А.С. Наволоцкий<sup>1</sup>, В.Г. Несеневич<sup>1</sup>, М.П. Петров<sup>1</sup>, Ф.В. Чернышев<sup>1</sup>, И.В. Кедров<sup>2</sup>, Е.Г. Кузьмин<sup>2</sup>, Б.В. Люблин<sup>2</sup>, С.С. Козловский<sup>3</sup>, А.Н. Мокеев<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>АО «Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова», Санкт-Петербург, Россия

<sup>3</sup>Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург, Россия

<sup>4</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

Для осуществления оптимального режима горения в плазме термоядерного дейтерий-тритиевого (DT)-реактора ИТЭР необходимо обеспечить контроль изотопного отношения концентрации DT-топлива. Представленная в статье диагностическая система позволяет решить эту задачу путём измерения и анализа потоков атомов изотопов водорода, испускаемых плазмой. Разработка и поставка комплекса диагностики по потокам атомов для ИТЭР поручена Российской Федерации, и соответствующие работы проводятся в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе. Основу данного комплекса составляют два анализатора: LENPA (Low Energy Neutral Particle Analyzer), работающий в диапазоне энергии 10—200 кэВ, и HENPA (High Energy Neutral Particle Analyzer) в диапазоне энергии 0,1—4,0 МэВ. Использование анализаторов в разных энергетических диапазонах позволяет измерять отношение концентрации DT-топлива как в центральной зоне (зоне термоядерного горения), так и на краю плазмы. При создании этого комплекса необходимо было учитывать влияние нескольких факторов: наличие интенсивных потоков нейтронного и гамма-излучения; необходимость использования прямого вакуумного канала, соединяющего анализаторы с плазменной камерой реактора; повышенные требования к надёжности работы всех узлов и механизмов системы; дефицит пространства для размещения диагностического оборудования на установке ИТЭР. В статье описана конструкция диагностического комплекса и технические решения, позволяющие проводить измерения в условиях токамак-реактора. Предложенные технические решения позволяют обеспечить единый вакуумный канал прохождения атомов изотопов водорода в систему двух анализаторов атомов, надёжный с точки зрения воздействия тепловых и механических нагрузок, эффективно экранировать анализаторы атомов от влияния рассеянного магнитного поля установки, обеспечить дистанционное управление комплексом, а также соединение и отсоединение вакуумного трубопровода от вакуумной камеры токамака, удовлетворить требования по радиационной безопасности, предъявляемые к диагностической системе на установке ИТЭР, и обеспечить проведение измерений изотопного соотношения топлива при наличии сильного нейтронного и гамма-излучения.

**Ключевые слова:** ИТЭР, изотопный состав, диагностика плазмы, анализатор атомов перезарядки.

## DESIGN FEATURES OF NEUTRAL PARTICLE DIAGNOSTIC SYSTEM FOR ITER

S.Ya. Petrov<sup>1</sup>, V.I. Afanasyev<sup>1</sup>, A.D. Melnik<sup>1</sup>, M.I. Mironov<sup>1</sup>, A.S. Navolotsky<sup>1</sup>, V.G. Nesenevich<sup>1</sup>, M.P. Petrov<sup>1</sup>, F.V. Chernyshev<sup>1</sup>, I.V. Kedrov<sup>2</sup>, E.G. Kuzmin<sup>2</sup>, B.V. Lyublin<sup>2</sup>, S.S. Kozlovski<sup>3</sup>, A.N. Mokeev<sup>4</sup>

<sup>1</sup>A.F. Ioffe Physicotechnical Institute, St.-Petersburg, Russia

<sup>2</sup>JSC «D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus», St.-Petersburg, Russia

<sup>3</sup>Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University, St.-Petersburg, Russia

<sup>4</sup>Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

The control of plasma fuel isotopic ratio (DT) has to ensure the best performance of the deuterium-tritium fusion reactor ITER. The diagnostic system, described in this paper, allows to measure this ratio using neutral particle analysis (NPA). The procurement of NPA diagnostics for ITER is delegated to the Russian Federation. This diagnostics is being developed in Ioffe Institute. It consists of two analyzers - LENPA (Low Energy Neutral Particle Analyzer) with 10—200 keV energy range and HENPA (High Energy Neutral Particle Analyzer) with 0.1—4.0 MeV energy range. Simultaneous operation of both analyzers gives the opportunity to measure DT fuel ratio in the central burning plasma and at the edge, as well. During the development, it was necessary to account for high levels of neutron and gamma radiation; presence of the vacuum atomic beam channel, connecting the analyzers with the ITER plasma chamber; strict requirements to reliability of separate parts and units and the limited space available for deployment of the diagnostics hardware at ITER. The technical solutions, which make it possible to conduct the measurements under such conditions and the complex design are described in the paper. The suggested technical solutions allow to: provide common vacuum channel for hydrogen atoms to reach the analyzers, safe with relation to thermal and mechanic loads; efficiently shield the analyzers from ITER stray magnetic field (up to 1 kGs); provide remote handling means for the NPA diagnostic complex, in particular, to connect/disconnect NPA vacuum beamline from ITER vessel; meet ITER radiation safety requirements and ensure fuel isotopic ratio measurements under high levels of neutron and gamma radiation.

**Key words:** ITER, fuel isotopic ratio, plasma diagnostics, neutral particle analyzer.

## ВВЕДЕНИЕ

Система диагностики по потокам атомов изотопов водорода, испускаемых плазмой реактора ИТЭР, основана на измерении абсолютных потоков этих атомов и анализе их энергетических спектров. Данная

диагностика служит прямым методом измерения изотопного соотношения ионов водорода в плазме, поскольку оно непосредственно связано с соотношением потоков атомов соответствующих изотопов водорода. В условиях термоядерного дейтерий-тритиевого реактора ИТЭР измерение и контроль изотопного соотношения DT-топлива в плазме является задачей первостепенной важности — её решение позволит обеспечить оптимальный режим термоядерного горения. В работе [1] показано, что плазма ИТЭР будет испускать потоки атомов дейтерия и трития, достаточно интенсивные для их надёжного измерения, что даст возможность с требуемой точностью (~10%) измерять изотопное соотношение топлива как в центральной области плазмы ИТЭР, так и на её периферии. Именно это послужило причиной включения диагностики по потокам атомов в приоритетный список диагностических систем на ИТЭР.

Следует подчеркнуть, что анализ потоков атомов, испускаемых плазмой термоядерных установок с магнитным удержанием, является основным методом получения информации о поведении ионов изотопов водорода в плазме и широко используется при исследовании горячей плазмы. Измерения проводятся с помощью анализаторов атомных частиц — приборов, в которых поток атомов из плазмы ионизируется при прохождении через тонкие плёнки или газовые мишени, а образующиеся при этом вторичные ионы анализируются по энергии и массе в электрическом и магнитном полях. Подробный обзор существующих систем атомных анализаторов и их применения на современных плазменных установках представлены в работе [2].

Разработка и поставка комплекса диагностики по потокам атомов для ИТЭР поручены Российской Федерации. Работы по его созданию проводятся в Физико-техническом институте им. А.Ф. Иоффе. Комплекс включает в себя два прибора: анализатор LENPA (Low Energy Neutral Particle Analyzer), работающий в диапазоне энергии атомов 10—200 кэВ, и HENPA (High Energy Neutral Particle Analyzer) на диапазон энергии 0,1—4,0 МэВ. Анализатор LENPA предназначен для измерения изотопного соотношения термоядерного топлива (D/T) во внешней области плазмы, анализатор HENPA — в центральной зоне (зоне термоядерного горения). Кроме того, анализаторы атомов будут использоваться для исследования энергетических функций распределения термоядерных альфа-частиц и других термоядерных продуктов, а также для изучения торможения быстрых ионов дейтериевых пучков, которые будут применяться для нагрева плазмы в ИТЭР, и для изучения эффективности методов ВЧ-нагрева ионов.

Важно отметить, что прототипы анализаторов, разрабатываемых в настоящее время для установки ИТЭР, уже были успешно использованы в экспериментах на крупнейших токамаках: JET (Евратом, Великобритания) [3, 4], TFTR (США) [5], JT-60U (Япония) [6]. Тем не менее при создании комплекса анализаторов атомов для ИТЭР необходимо учитывать влияние целого ряда дополнительных факторов, которые требуют принятия новых инженерных решений. К наиболее существенным из них можно отнести следующие факторы:

— наличие интенсивных потоков нейтронного и гамма-излучения, которые как минимум на два порядка превосходят существующие в современных плазменных экспериментах. Вдобавок следует учесть, что большая длительность рабочих импульсов ИТЭР (~1000 с) приведёт к очень высоким значениям флюенса ядерных излучений, которые должны будут выдерживать все элементы диагностической системы. Нейтронное и гамма-излучение оказывает нежелательное влияние на диагностическую систему и окружающие конструкции. Для уменьшения этого воздействия, очевидно, требуется разработка соответствующего защитного экранирования;

— комплекс анализаторов атомов соединён прямой вакуумной трубой с плазменной камерой реактора. Это требует учёта возможного проникновения трития из реактора в диагностическую систему и осаждения его внутри вакуумных камер анализаторов. При этом в случае разгерметизации системы возникает опасность выхода радиоактивного трития наружу. Поэтому к анализаторам, как и ко всем элементам диагностической системы, имеющим прямой контакт с вакуумной камерой ИТЭР, предъявляются особые требования по надёжности. Кроме того, необходимо учитывать и возможность обратного влияния диагностической системы на плазму реактора за счёт газового выделения из элементов диагностики. Это предъявляет особые требования к используемым материалам и существенно осложняет их выбор;

— наличие большого рассеянного магнитного поля в месте расположения анализаторов (до  $10^3$  Гс). Это требует разработки магнитных экранов для защиты как вакуумного и электронного оборудования, так и самих атомных анализаторов;

— при эксплуатации токамак-реактора обслуживание любого диагностического оборудования будет предельно ограничено. В этих условиях для сохранения работоспособности диагностической системы потребуется обеспечить повышенную надёжность работы всех её узлов и механизмов и разработать аппаратуру для её дистанционного управления;

— дефицит пространства для размещения диагностического оборудования на ИТЭР. В каждом диагностическом порту, имеющем прямой выход в плазму, будет располагаться максимальное количество диагностических систем. Это требует тщательной проработки интеграции диагностики в единый диагностический комплекс ИТЭР.

Все перечисленные факторы оказывают серьёзное влияние на разработку комплекса диагностики по потокам атомов для установки ИТЭР. Данная статья посвящена описанию конструкции комплекса и рассмотрению инженерно-конструкторских решений, использованных при его создании с учётом перечисленных проблем.

### СОСТАВ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА АНАЛИЗАТОРОВ АТОМОВ

В соответствии с функциональным назначением диагностический комплекс анализаторов можно разбить на несколько составных частей. Внешний вид комплекса представлен на рис. 1.

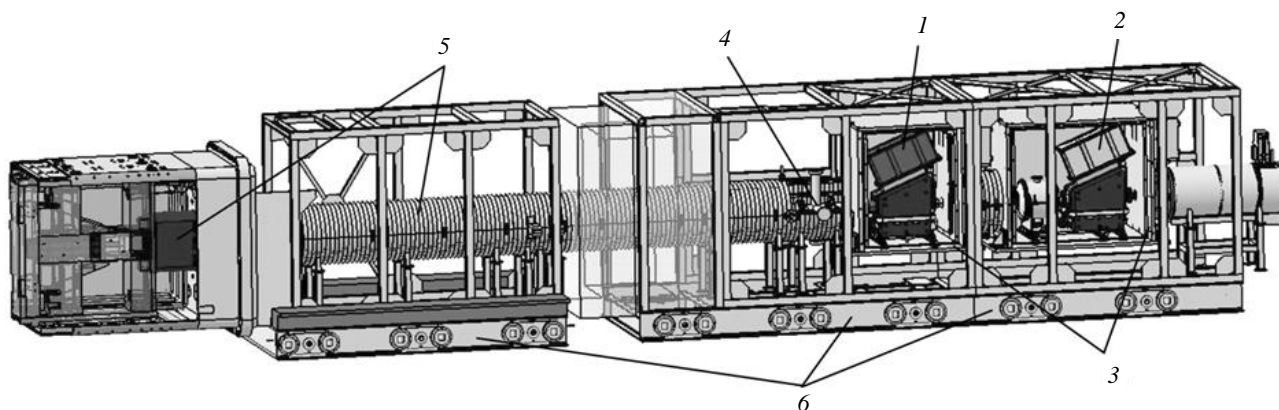


Рис. 1. Диагностический комплекс «Анализаторы атомов перезарядки (NPA)» на установке ИТЭР: 1 — анализатор атомов перезарядки HENPA (High Energy Neutral Particle Analyzer); 2 — анализатор атомов перезарядки LENPA (Low Energy Neutral Particle Analyzer); 3 — магнитные экраны анализаторов; 4 — вакуумный трубопровод; 5 — нейтронная защита; 6 — транспортные диагностические платформы

Основное назначение анализаторов атомов перезарядки HENPA (1) и LENPA (2) состоит в измерении и анализе потоков нейтральных атомов дейтерия и трития соответственно в сверхтепловом (0,1—4 МэВ) и тепловом (10—200 кэВ) диапазонах энергии, что позволит осуществлять оперативный контроль изотопного состава термоядерного горючего. Конструкторское проектирование и модельные расчёты параметров анализаторов показали, что реализовать в одном анализаторе измерение в требуемом широком интервале энергии невозможно без существенного ухудшения его рабочих характеристик. Поэтому было принято решение о необходимости использования тандема анализаторов на разные диапазоны энергии. Для того чтобы в условиях дефицита места разместить оба прибора на установке ИТЭР, было реализовано оригинальное предложение — расположить приборы друг за другом. При этом для соединения анализаторов с камерой токамак-реактора оказалось возможным использовать один и тот же вакуумный трубопровод 4. Важно отметить, что в конструкции трубопровода предусмотрено, чтобы линия видимости прибора, расположенного сзади, не перекрывалась элементами прибора, расположенного перед ним. Это позволяет обеспечить одновременную и независимую работу обоих анализаторов.

Для защиты анализаторов от воздействия рассеянного магнитного поля установки каждый из приборов будет помещён в пассивный магнитный экран 3. Особенности конструкции экранов рассмотрены далее.

Наиболее сложной в техническом отношении является нейтронная защита 5 диагностического оборудования. В соответствии с расположением и защищаемым компонентом диагностики её можно разбить на несколько частей: внутрипортовая защита, защита трубопровода от портовой заглушки до анализаторов и между анализаторами, защита вокруг самих анализаторов и, наконец, защита позади всей диагностической системы. Главное назначение нейтронной защиты — ослабить поток нейтронов до уровня, приемлемого с точки зрения активации оборудования, находящегося в непосредственной близости от данной диагностической системы.

Вследствие большого габаритного размера (~20×2×2 м) и веса диагностики (~50 т) было решено поместить её на трёх отдельных транспортных платформах 6,двигающихся по рельсам. При этом расстыковка вакуумного трубопровода будет осуществляться с помощью специально разработанных механизмов быстрой расстыковки, обеспечивающих также безопасность с точки зрения возможности выхода трития из вакуумного пространства наружу.

### КОНСТРУКЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПОНЕНТОВ СИСТЕМЫ НРА

**Анализаторы HENPA и LENPA.** Анализаторы атомов перезарядки HENPA и LENPA являются масс-спектрометрическими приборами. Они построены по традиционной схеме: ионизация входящего потока атомов в них осуществляется с помощью тонких углеродных плёнок толщиной около 100 Å, анализ вторичных ионов по энергии и массе — в параллельных друг другу магнитном и электрическом полях [1—6]. В анализаторе LENPA также используется специальный ускорительный модуль на напряжение до +100 кВ для увеличения энергии вторичных ионов и тем самым улучшения условий их регистрации при наличии большого нейтронного и гамма-фона. Основные конструктивные элементы приборов показаны на рис. 2.

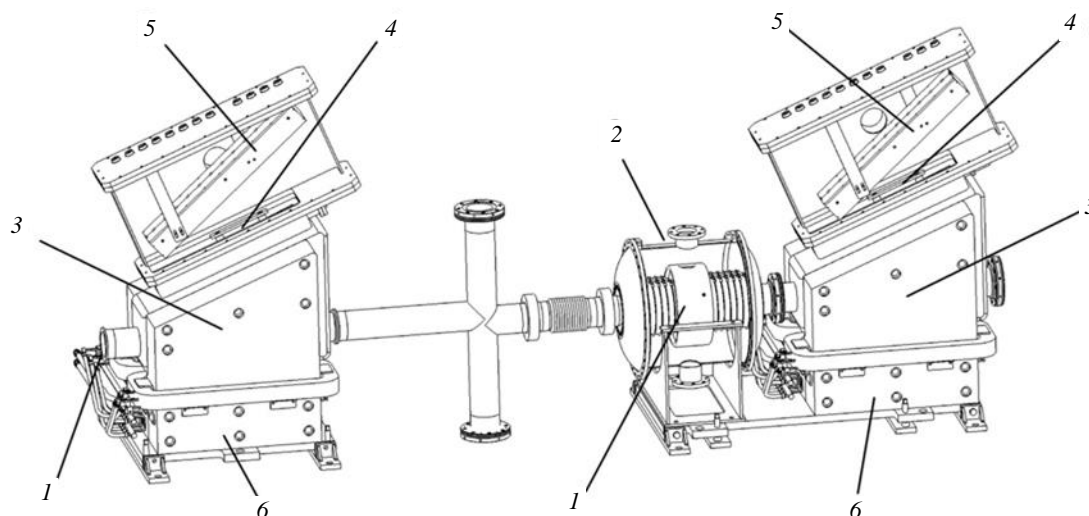


Рис. 2. Основные конструктивные элементы тандема анализаторов HENPA и LENPA: 1 — места размещения механизмов смены плёнок; 2 — ускоритель анализатора LENPA; 3 — электромагниты; 4 — электростатические конденсаторы; 5 — детекторные системы; 6 — системы поддержки и юстировки анализаторов

Механизмы смены плёнок 1 располагаются на входной оси анализаторов. В анализаторе LENPA этот механизм является составной частью высоковольтного электрода ускорительного модуля 2. Далее в каждом из анализаторов находятся анализирующие магнитные системы, которые представляют собой С-образные электромагниты 3. Магнитное поле в зазоре электромагнитов обладает фокусирующими свойствами, поскольку формируется полюсными наконечниками специально подобранной формы, что позволяет обеспечить фокусировку вторичных ионов на вход детекторов. С этой же целью подобрана и форма пластин электростатических конденсаторов 4, расположенных непосредственно на выходе из межполюсного зазора электромагнитов. Сразу за электростатическими конденсаторами находятся детекторные системы анализаторов 5, собранные на базе фотоэлектронных умножителей. Для обоих анализаторов предусмотрено использование систем

поддержки б, которые позволяют их юстировать в трёх направлениях. Входная ось анализатора LENPA изначально смещена на 50 мм по вертикали относительно входной оси анализатора HENPA. Как уже упоминалось, это сделано с целью обеспечения возможности одновременной и независимой работы анализаторов.

Необходимо отметить, что некоторые узлы анализаторов, а именно механизмы смены плёнок, ускорительный модуль и детекторные системы являются оригинальными разработками, никогда ранее не применявшимися в диагностических системах подобного типа. На особенностях их конструкции и рабочих параметрах остановимся более подробно.

**Механизм смены плёнок.** На рис. 3 в качестве примера представлен механизм смены плёнок анализатора LENPA. В этом случае он устанавливается непосредственно в корпус центрального электрода ускорительного модуля 1 и при работе ускорителя находится под напряжением +100 кВ.

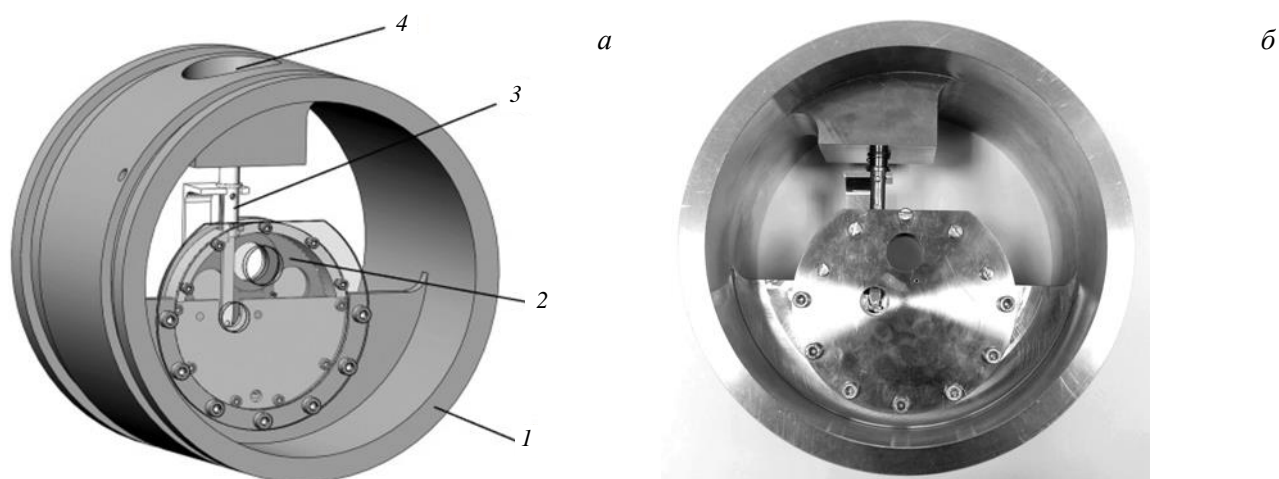


Рис. 3. Трёхмерная конструкторская модель (а) и внешний вид (б) механизма смены плёнки анализатора LENPA: 1 — корпус центрального электрода ускорительного модуля; 2 — вращающийся диск (кассета) с плёнками; 3 — электромагнитный привод механизма; 4 — катушка электромагнитного привода

Кольцевые оправы с помещёнными в них тонкими углеродными плёнками диаметром 20 мм в количестве пяти штук размещаются в кассете, имеющей форму вращающегося диска 2. Как показывают оценки вероятности разрушения плёнок, такой набор плёнок позволит обеспечить работу анализаторов в течение 20 000 полномасштабных плазменных разрядов ИТЭР, что соответствует примерно четырём годам его эксплуатации. Вращающийся диск приводится в движение с помощью электромагнитного привода 3. При этом высоковольтное напряжение с центрального электрода снимается, а на катушку 4 электромагнитного привода подаётся серия токовых импульсов, каждый из которых поворачивает диск на один угловой шаг, соответствующий углу  $360^\circ/84$ . Диск вращается только в одну сторону, и при этом происходит последовательная замена отработавшей плёнки на новую. Важно отметить, что в данном устройстве удалось реализовать передачу движения в вакуумную среду без использования сильфонов, вакуумных уплотнений и сварочной технологии, что существенно повысило его безопасность с точки зрения возможности выхода трития из вакуума в окружающую среду. Кроме того, в подвижных частях механизма не используются никакие смазочные материалы. Вместо этого поверхность всех трущихся деталей покрыта слоем нитрида титана толщиной около 10 мкм. Ресурсные испытания механизма смены плёнок и испытания его на устойчивость к воздействию вибрационных и ударных нагрузок подтвердили его высокую надёжность при работе в условиях, которые ожидаются на токамаке-реакторе. Разработанный механизм способен сохранить свою работоспособность в течение всего времени эксплуатации установки ИТЭР.

**Ускорительный модуль анализатора LENPA.** Основное назначение ускорительного модуля состоит в ускорении вторичных ионов, образованных после прохождения потока нейтральных атомов через обдирочную мишень, до энергии 100 кэВ. Увеличение энергии вторичных ионов приводит к соответствующему увеличению амплитуды полезного сигнала, регистрируемого детекторной системой анализатора, и даёт возможность выделить полезный сигнал над фоном даже при наличии интенсивного

нейтронного и гамма-излучения, создаваемого плазмой токамака-реактора. Схема построения ускорительного модуля и фотография его макета показаны на рис. 4.

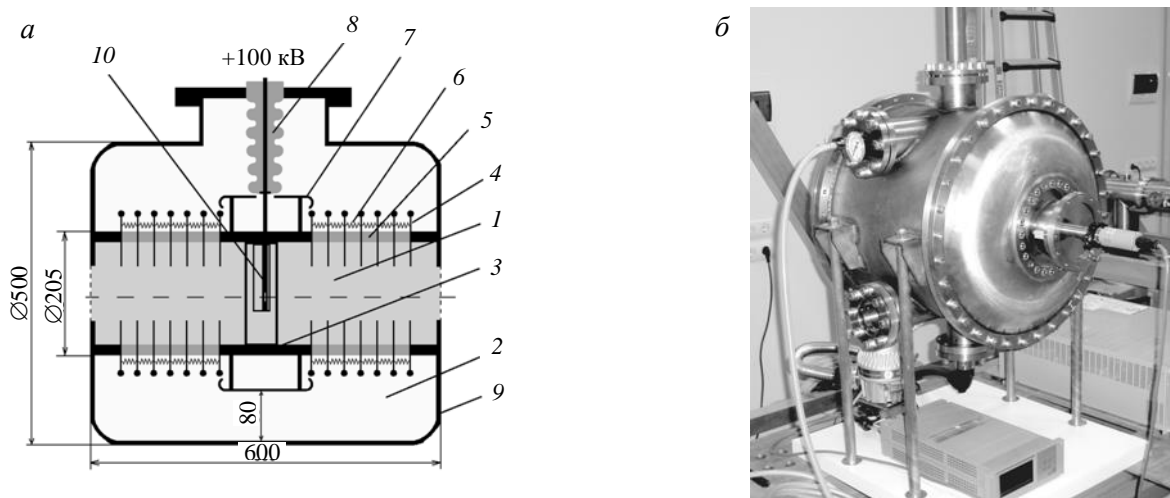


Рис. 4. Схема построения (а) и внешний вид (б) ускорительного модуля анализатора LENPA: 1 — вакуумный объём; 2 — газовый объём (N<sub>2</sub>); 3 — центральный электрод; 4 — кольцевые металлические диски (электроды); 5 — керамический изолятор; 6 — резисторы высоковольтного делителя; 7 — сглаживающий экран; 8 — высоковольтный разъём; 9 — внешний кожух ускорителя; 10 — механизм смены плёнок

Основу ускорителя составляет высоковольтная колонна, выполненная в виде металлокерамической сборки. Внутренний объём колонны 1 является вакуумным, её внешняя часть — частью газового изолирующего объёма 2. Колонна состоит из двенадцати кольцевых изоляторов 5 с внешним диаметром 200 мм и толщиной в направлении электрического поля 25 мм и 14 кольцевых металлических дисков-электродов 4 толщиной 1 мм, установленных по обеим сторонам изоляторов. В середине колонны расположен центральный электрод 3. Соединения всех электродов и изоляторов колонны выполнены с использованием специального вакуумного клея марки ПВА, который обладает высокой электрической прочностью, низким коэффициентом газового выделения и высокой стойкостью к радиационному излучению. Механически высоковольтная колонна является единым вакуумно-плотным узлом. На внешней стороне кольцевых дисков устанавливаются резисторы высоковольтного делителя 6. Для увеличения электрической прочности центральный электрод защищён сглаживающим экраном 7, в котором предусмотрено специальное отверстие для высоковольтного разъёма 8. Разъём имеет вакуумно-плотное соединение с кожухом ускорительного модуля. С помощью разъёма на центральный электрод высоковольтной колонны подаётся потенциал +100 кВ, её торцы находятся под нулевым потенциалом. В качестве изолирующего газа используется азот, который напускается в газовый объём ускорительного модуля до давления 6 атм. Испытания макета ускорителя показали, что азот при таком давлении обеспечивает электрическую прочность изолирующего промежутка до напряжения +150 кВ.

**Детекторная система.** Конструкции детекторных систем анализаторов практически одинаковы. Они представляют собой набор детекторных модулей, расположенных вдоль одной линии и окружённых снаружи общим магнитным экраном. На рис. 5 в качестве примера показана трёхмерная конструкторская модель детекторной системы анализатора HENPA. Детекторные модули построены на базе многоанодного ФЭУ H8500D производства фирмы HAMAMATSU (Япония) [7]. Аноды в них соединены таким образом, что каждый модуль практически представляет собой девять детекторов, имеющих общее питающее напряжение, но независимые каналы регистрации. Для каждого такого канала изготавливается кварцевое стекло, на которое методом вакуумного напыления наносится тонкий сцинтиллятор CsI(Tl) толщи-

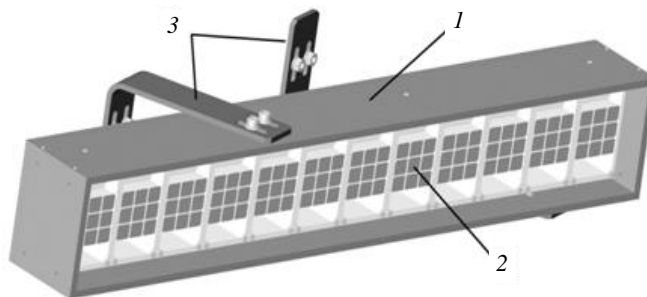


Рис. 5. Трёхмерная конструкторская модель детекторной системы анализатора HENPA: 1 — корпус общего магнитного экрана; 2 — детекторный модуль в индивидуальном магнитном экране; 3 — элементы крепления к детекторной камере

ной, равной пробегу частиц, регистрируемых в данном канале. Стёкла приклеиваются к входному окну с помощью вакуумного клея. Внутреннее устройство одного из детекторных модулей показано на рис. 6.

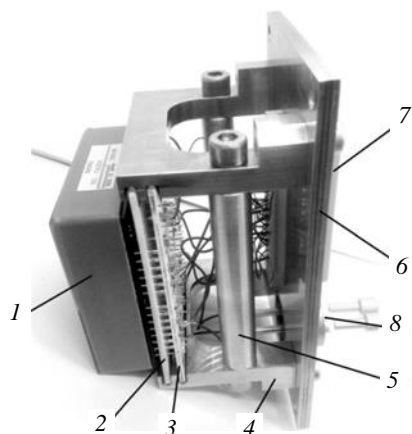


Рис. 6. Внутреннее устройство детекторного модуля анализаторов LENPA и HENPA: 1 — ФЭУ H8500D; 2 — керамическая плата; 3 — керамическая плата с высоковольтным делителем; 4 — опоры; 5 — стойки; 6 — задняя крышка индивидуального магнитного экрана; 7 — сигнальный разъём; 8 — высоковольтный ввод питания

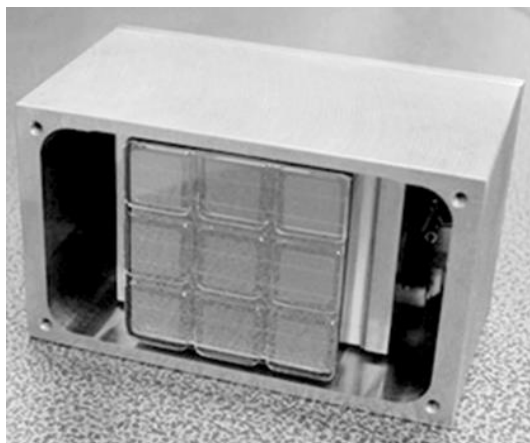


Рис. 7. Детекторный модуль, установленный в индивидуальный магнитный экран

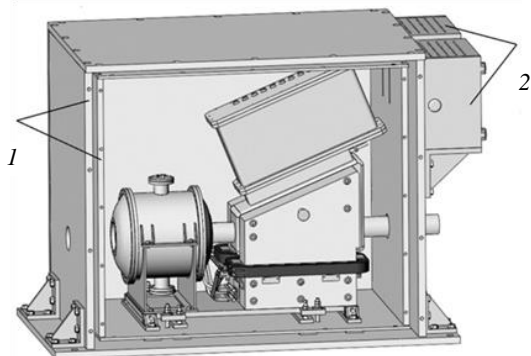


Рис. 8. Внешний вид магнитных экранов анализатора LENPA: 1 — двуслойный экран вокруг анализатора (боковая стенка снята для лучшего обзора внутреннего пространства экрана); 2 — два однослойных магнитных экрана для электронного оборудования

нитных экранов для электронного оборудования, которое должно быть размещено в непосредственной близости от анализатора. Эти экраны представляют собой короба с толщиной стенки 3 см. Как показывает компьютерное моделирование, выполненное с помощью кода КОМПЮТ [8], в целом применение

Электрические выводы ФЭУ H8500D 1 вставляются в керамические платы, одна из которых обеспечивает точное позиционирование выводов 2, а на второй собран высоковольтный делитель 3. С помощью опор 4 и стоек 5 платы устанавливаются на задней крышке детекторного модуля 6, на которой закрепляются также многостырьковый сигнальный разъём 7 и высоковольтный ввод 8 для питания ФЭУ. Крышка изготавливается из магнитно-мягкой стали и является частью индивидуального магнитного экрана модуля. Внешний вид детектора, установленного в индивидуальный магнитный экран, показан на рис. 7.

Необходимо отметить, что магнитное поле в месте расположения детекторных систем, в основном, определяется рассеянным магнитным полем электромагнитов самих анализаторов и составляет около 250 Гс. Использование двойного магнитного экранирования позволяет снизить это поле до приемлемой величины  $\sim 25$  Гс, сохраняя широкую входную апертуру детекторной системы.

Важно также отметить, что высоковольтный делитель, поставляемый фирмой HAMAMATSU, изготовлен с применением материалов, запрещённых к использованию в вакууме на установке ИТЭР. Поэтому был разработан и испытан новый делитель, выполненный на керамической плате. При этом пайка элементной базы делителя и всех соединительных проводов была выполнена в вакууме с применением специального вакуумного припоя и флюса, в качестве соединительных проводов использовались провода с керамической изоляцией.

**Магнитные экраны.** Как уже отмечалось, в месте расположения анализаторов рассеянное магнитное поле установки ИТЭР достигает значительной величины  $\sim 10^3$  Гс. Без использования магнитной защиты траектории вторичных ионов в приборах будут подвергаться существенному искажению их параметров и потерям регистрируемых частиц.

Для устранения влияния рассеянного магнитного поля ИТЭР на работу анализаторов было предложено окружить каждый из них индивидуальным пассивным магнитным экраном. При проведении расчётов выяснилось, что наиболее оптимальным в данной ситуации является использование двуслойного магнитного экрана. Тем не менее вследствие большой величины экранируемых объёмов суммарный вес обоих экранов оказывается равным около 10 т и составляет заметную долю веса всей диагностической системы ( $\sim 50$  т). Результаты проведённой оптимизации представлены на рис. 8, где показана трёхмерная конструкторская модель экрана, окружающего анализатор LENPA. На этом же рисунке на задней верхней части экрана показан внешний вид магнитных экранов для электронного оборудования, которое должно быть размещено в непосредственной близости от анализатора. Эти экраны представляют собой короба с толщиной стенки 3 см. Как показывает компьютерное моделирование, выполненное с помощью кода КОМПЮТ [8], в целом применение

магнитного экранирования позволяет снизить рассеянное магнитное поле как внутри анализаторов, так и внутри электронных блоков до приемлемой величины  $\leq 50$  Гс и надёжно защитить диагностическую аппаратуру.

**Вакуумный трубопровод системы НРА.** Анализаторы HENPA и LENPA расположены приблизительно на расстоянии 12—15 м от стенки вакуумной камеры установки ИТЭР. Вакуумный трубопровод диагностической системы служит для свободного прохождения потока атомов изотопов водорода из плазмы до входа в анализаторы. Его трёхмерная конструкторская модель показана на рис. 9. При разработке трубопровода был учтён целый ряд требований.

Во-первых, внутренняя конфигурация трубопровода обеспечивает телесные углы обзора плазмы апертурой обоих анализаторов, линии видимости которых разнесены в вертикальном направлении на 50 мм. Для этого наиболее оптимальным оказалось сделать трубопровод в виде набора соединённых между собой труб диаметром 100, 150 и 200 мм. При этом внутренние элементы трубопровода анализатора HENPA, расположенного спереди, не перекрывают угол обзора анализатора LENPA, находящегося сзади.

Во-вторых, в конструкцию трубопровода внесены элементы, позволяющие скомпенсировать пространственные смещения и динамические нагрузки, возникающие при работе токамака или при юстировке диагностической системы. Дело в том, что в рабочем режиме при горении плазмы вакуумная камера установки ИТЭР будет нагрета до температуры 100 °С. В месте крепления трубопровода к фланцу диагностического порта 8 нагрев приведёт к смещению трубопровода на 14,4 мм в радиальном и на 8,4 мм в вертикальном направлении. Кроме того, для улучшения вакуумных условий камера установки ИТЭР будет периодически прогреваться до температуры 240 °С. Это приведёт к дополнительному смещению фланца в радиальном и вертикальном направлении соответственно на 32,3 и 19,0 мм. Сильфон 1 предназначен для компенсации этих смещений. Также он компенсирует смещение фланца при срыве плазменного разряда — опасном явлении, которое приводит к существенным импульсным деформациям камеры. Другой узел — сдвоенный сильфон 4 позволяет осуществлять вращение и вертикальное и горизонтальное перемещение тандема анализаторов для настройки оптической оси системы на центр отверстия диагностической трубы, расположенный вблизи плазмы токамака.

В-третьих, в трубопроводе предполагается использовать два вакуумных затвора. Двойной металлический вакуумный затвор 3 устанавливается вблизи фланца вакуумного порта. Он предназначен для длительной изоляции вакуумных объёмов камеры токамака и трубопровода диагностической системы. Данный затвор должен быть разработан в Международной организации ИТЭР. Его главной особенностью будет устойчивость к сильным радиационным полям до  $10^8$  Гр. Ориентировочное время закрытия затвора ~20 с. Другой затвор VAT Series 771 5 будет установлен между сдвоенным сильфоном 4 и входом в анализатор HENPA. Этот затвор также является радиационно-стойким, но его главная особенность — сравнительно малое время закрывания ~15 мс, что даст возможность быстрого перекрывания вакуумного диагностического объёма в аварийной ситуации [9].

В-четвёртых, при конструировании трубопровода были предусмотрены меры для предотвращения возможного выхода трития из вакуумной среды в атмосферу в случае разгерметизации вакуумного объёма диагностической системы. Для этого в той части трубопровода, которая расположена между камерой токамака и двойным вакуумным затвором, предлагается использовать только двойные сильфоны и двойные металлические уплотнения. При этом объём внутри двойных сильфонов и уплотнительных прокладок будет подсоединён к вакуумной системе установки ИТЭР, которая обеспечит мониторинг давления и утилизацию тритиевого газа.

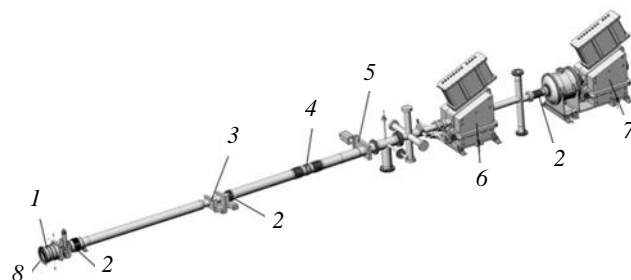


Рис. 9. Трёхмерная конструкторская модель трубопровода, соединяющего вакуумную камеру установки ИТЭР с анализаторами HENPA и LENPA: 1 — сильфон; 2 — узлы дистанционной расстыковки; 3 — двойной шибер; 4 — сильфонный блок; 5 — одинарный шибер; 6 — анализатор HENPA; 7 — анализатор LENPA; 8 — место крепления трубопровода к фланцу диагностического порта камеры ИТЭР



В-пятых, в конструкции трубопровода использованы результаты оригинальной разработки узла быстрой дистанционной расстыковки вакуумных соединений 2. Необходимость применения такого узла продиктована тем, что интенсивный поток нейтронов и гамма-излучения во время горения реакторной плазмы приводит к высокому уровню активации стенок трубопровода (~70 мЗв/ч через 12 дней после остановки реактора) и невозможности привлечения обслуживающего персонала для выполнения работ по отсоединению трубопровода от вакуумной камеры токамака-реактора. Конструкция узла расстыковки и фотография его макета показаны на рис. 10.

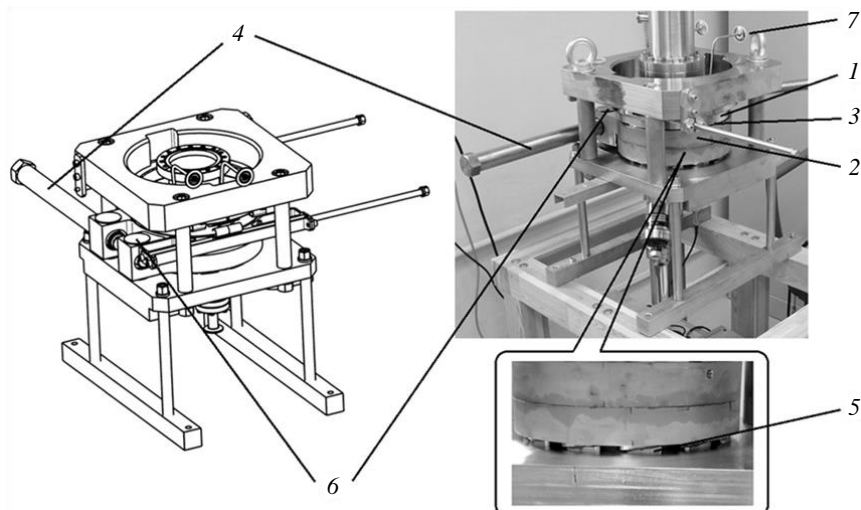


Рис. 10. Трёхмерная конструкторская модель и фотография макета узла расстыковки системы анализаторов от вакуумной камеры установки ИТЭР: 1 — уплотняемый неподвижный фланец; 2 — уплотняемый подвижный фланец; 3 — место установки двойного металлического уплотнения; 4 — уплотняющий болт; 5 — клинообразные вставки; 6 — фиксирующий болт; 7 — вакуумные отводы

Механизм узла позволяет осуществить движение одного из уплотняемых фланцев 2 навстречу неподвижному фланцу 1 и создаёт усилие ~420 Нм, необходимое для раздавливания двойного металлического уплотнения 3. Это движение предполагается осуществлять с помощью шагового двигателя (не показан на рисунке), который будет вращать уплотняющий болт 4. Далее вращательное движение трансформируется в линейное перемещение с помощью клинообразных вставок 5, позволяя подвижному фланцу двигаться навстречу неподвижному фланцу, закреплённому фиксирующим болтом 6. В качестве вакуумного уплотнения предполагается использовать двойное серебряное уплотнение типа HELICOFLEX [10], диаметр внешнего уплотнительного кольца которого равен 248 мм, внутреннего 208 мм. В несжатом состоянии толщина уплотнительных колец равна 3,8 мм, в сжатом состоянии 3,0 мм. Через вакуумные отводы 7 будут осуществляться откачка и мониторинг давления между уплотнительными кольцами двойного уплотнения. Предварительные испытания данного узла показали хорошие результаты и подтвердили правильность концептуального подхода к решению проблемы дистанционной расстыковки вакуумного трубопровода [11].

**Нейтронная защита.** Вакуумный трубопровод, соединяющий систему анализаторов с установкой ИТЭР, является каналом проникновения нейтронного потока, излучаемого термоядерной плазмой, в межпортовое (Interspace) пространство и портовое помещение (Port Cell), где располагаются анализаторы. Нейтроны, рассеиваясь на элементах трубопровода, активируют как сам трубопровод, так и окружающие его конструкции. Для снижения уровня активации диагностического оборудования необходимо применение нейтронной защиты вокруг вакуумного трубопровода. Как уже упоминалось, разработка такой защиты является наиболее сложной составляющей конструкторского моделирования диагностики.

Результаты данной разработки представлены на рис. 11, где показана трёхмерная конструкторская модель нейтронной защиты всей диагностической системы. В зависимости от места расположения нейтронную защиту можно разбить на четыре составные части:

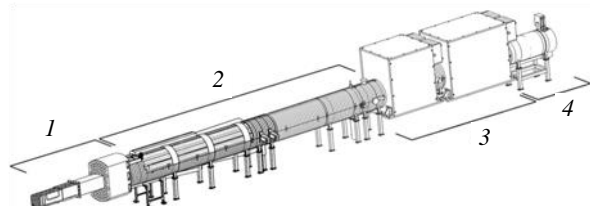


Рис. 11. Компоненты нейтронной защиты системы анализаторов перезарядки: 1 — в диагностическом порту; 2 — вокруг вакуумного трубопровода в межпортовом пространстве и портовом помещении; 3 — вокруг анализаторов и между ними; 4 — в торце диагностической системы анализаторов

— элементы нейтронной защиты, являющиеся частью портовой заглушки (Port Plug) диагностического порта (1);

— нейтронная защита, устанавливаемая вокруг вакуумного трубопровода в межпортовом пространстве и портовом помещении (2);

— нейтронная защита вокруг анализаторов LENPA и HENPA и части вакуумного трубопровода между ними (3);

— нейтронная ловушка, расположенная в торце всей диагностической системы анализаторов (4).

Основным требованием по безопасности, которому должен удовлетворять комплекс нейтронной защиты, является ограничение на максимальную величину контактной дозы в двух зонах размещения диагностики. В межпортовом пространстве контактная доза не должна превышать значения 30 мкЗв/ч через 12 дней после остановки реактора ИТЭР, и в помещении, где установлены анализаторы, контактная доза не должна превышать значения 3 мкЗв/ч через 24 ч после остановки реактора ИТЭР. Нейтронная защита спроектирована таким образом, чтобы это требование было выполнено при возможно малом весе и габаритах всех её компонентов.

На рис. 12 представлена конструкция диагностического порта, где показано расположение двух компонентов нейтронной защиты — вольфрамового коллиматора 1 и нейтронной защиты 2, являющейся частью диагностического защитного модуля (DSM — Diagnostic Shield Module).

Вольфрамовый коллиматор 1 является наиболее критическим элементом нейтронной защиты. Он расположен на расстоянии 0,5 м от первой стенки установки ИТЭР и по сравнению с другими элементами комплекса наиболее подвержен тепловым, нейтронным и электромагнитным нагрузкам. Его основное назначение заключается в сужении угла разлёта нейтронов, вылетающих из плазмы, и уменьшении их полного потока за счёт поглощения.

Коллиматор представляет собой модульную систему (рис. 13). Каждый модуль собирается из вольфрамовых пластин 1 толщиной 2 мм и имеет габаритные размеры 200 × 200 мм. В пластинах имеются специальные пазы и выступы, с помощью которых они крепятся друг к другу и к корпусу коллиматора 2, который изготовлен из нержавеющей стали. Набор из пяти модулей вставляется последовательно в корпус коллиматора и фиксируется пятью крышками 3, которые привариваются к основному телу корпуса. К диагностическому защитному модулю коллиматор крепится с помощью болтовых соединений через приваренный к корпусу фланец 4. На внешней стороне передней части коллиматора, обращённой к плазме, предусмотрено размещение трубки 5 с проточной водой, предназначенной для его охлаждения. Трубка имеет диаметр 10 мм и толщину стенки 1,5 мм и подсоединяется к системе охлаждения портовой заглушки. Использование водяного охлаждения коллиматора позволяет снизить температуру корпуса во время работы токамака-реактора до приемлемой величины ~250 °С.

Расчёты показывают, что использование коллиматора позволяет довольно эффективно снизить поток нейтронов и уменьшить уровень контактной дозы в межпортовом пространстве приблизительно в 7 раз. При этом полезный сигнал (поток нейтральных атомов) уменьшается незначительно, примерно на 20%.

Нейтронная защита 2 (см. рис. 12), являющаяся частью диагностического защитного модуля, представляет собой защиту гетерогенного типа, состоящую из 50% стали и 50% карбида бора В<sub>4</sub>С в объёмном

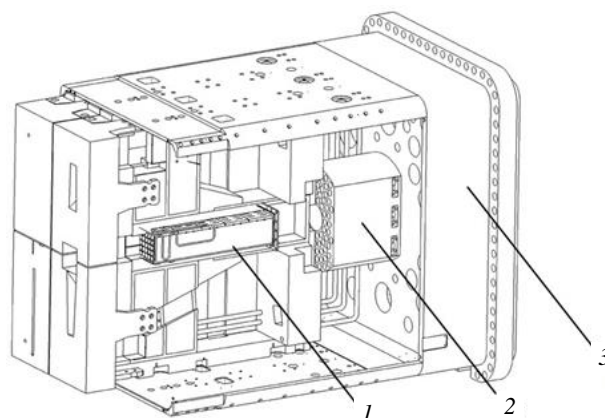


Рис. 12. Конструкция внутренней части диагностического порта: 1 — вольфрамовый коллиматор; 2 — нейтронная защита; 3 — диагностический порт

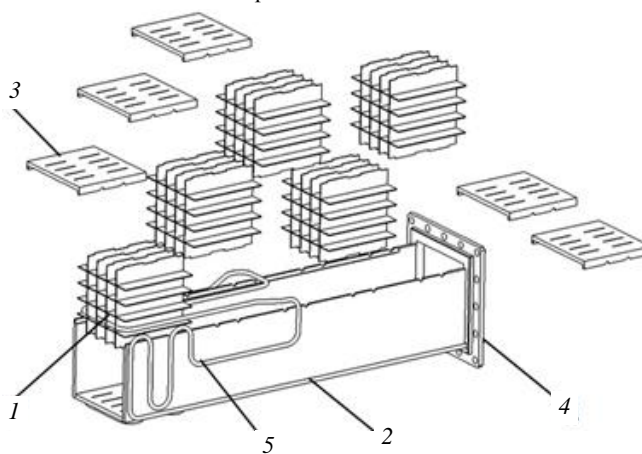


Рис. 13. Конструкция вольфрамового коллиматора: 1 — вольфрамовые пластины; 2 — корпус; 3 — крышка; 4 — фланец; 5 — трубка водяного охлаждения

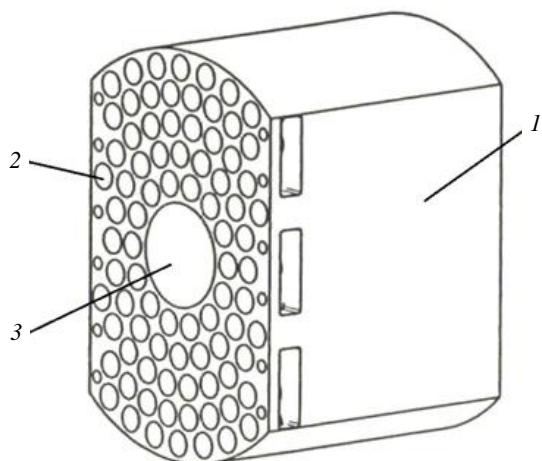


Рис. 14. Конструкция нейтронной защиты внутри диагностического порта: 1 — поковка; 2 — стержни из карбида бора; 3 — канал для прохождения потока

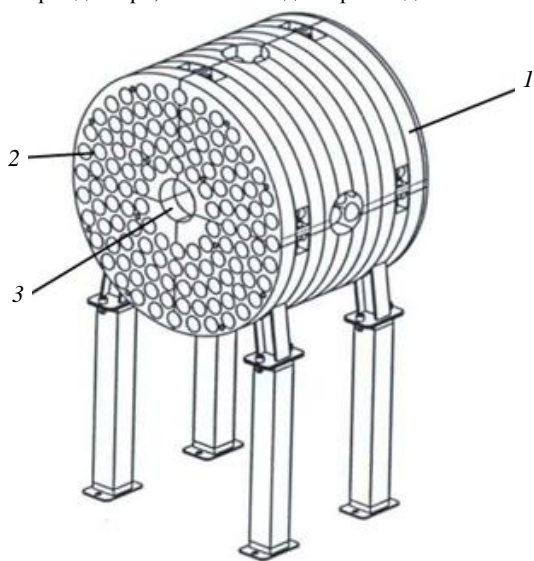


Рис. 15. Модуль нейтронной защиты трубопровода: 1 — корпус; 2 — стержни из карбида бора; 3 — отверстие для трубопровода

в торце всей диагностической системы анализаторов 4 (см. рис. 11). Её основной задачей является предотвращение попадания прямого потока нейтронов в пространство за анализаторами. Как показывают расчёты, для этого достаточно в качестве материала ловушки использовать борированный бетон и обеспечить толщину защиты ~1 м.

Компьютерное моделирование всего рассмотренного комплекса нейтронной защиты [12] показывает, что он обеспечивает эффективное снижение нейтронного потока из плазмы токамака-реактора и способен обеспечить уровень радиационной безопасности, предъявляемый к таким системам на установке ИТЭР.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана конструкция системы диагностики по потокам атомов изотопов водорода, испускаемых плазмой токамака-реактора ИТЭР. Предложенные при этом технические решения позволяют:

- обеспечить единый вакуумный канал прохождения атомов изотопов водорода в систему двух анализаторов атомов. При этом конструкция трубопровода является надёжной с точки зрения воздействия тепловых и механических нагрузок;
- эффективно экранировать анализаторы атомов от влияния рассеянного магнитного поля установки;
- обеспечить дистанционное отсоединение вакуумного трубопровода диагностической системы от вакуумной камеры токамака-реактора без привлечения обслуживающего персонала в зону реактора;

соотношении. Её конструкция показана на рис. 14. Она изготавливается в виде поковки 1, в которой высверлены каналы диаметром 50 мм для установки стержней из спечённого карбида бора 2. В центре поковки имеется канал 3 диаметром 200 мм для прохождения потока нейтральных атомов.

Нейтронная защита, устанавливаемая вокруг вакуумного трубопровода в межпортовом пространстве, имеет аналогичный защите внутри диагностического порта состав: 50% стали и 50% карбида бора  $B_4C$  в объёмном соотношении.

Нейтронная защита в портовом помещении также является гетерогенной, но в этом случае оказывается наиболее оптимальным использовать другое соотношение её компонентов — 70% стали и 30%  $B_4C$ . Конструкция этой защиты более сложна, поскольку в ней необходимо предусмотреть пустоты для размещения многочисленных портов, отходящих от основного трубопровода. С этой целью защита разбита на несколько индивидуальных модулей, один из которых показан на рис. 15. Модуль представляет собой цилиндр с отверстием для вакуумного трубопровода, разрезанный вдоль оси на четыре секции. Каждая секция набирается до нужной толщины из секционных дисков, имеющих толщину 60 мм, и стягивается между собой болтовыми соединениями. В дисках имеются отверстия для размещения стержней из карбида бора.

Кроме рассмотренных частей нейтронной защиты диагностической системы, предполагается также окружить каждый из анализаторов дополнительной защитой, состоящей из чистого карбида бора. Эту защиту предлагается разместить внутри магнитных экранов, окружающих анализаторы. При этом, как показывают расчёты, достаточно обеспечить толщину защиты 15 и 3 см для анализаторов HENPA и LENPA соответственно.

Самым последним элементом в комплексе нейтронной защиты является нейтронная ловушка, расположенная в

— удовлетворить требования по радиационной безопасности, предъявляемые к диагностической системе на установке ИТЭР;

— осуществить интеграцию диагностики в общий диагностический комплекс установки ИТЭР.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Проектного центра ИТЭР в рамках договоров № 02-14/01 и № 03-14/01 с ФТИ им А.Ф. Иоффе и АО «Техноэксан» соответственно.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

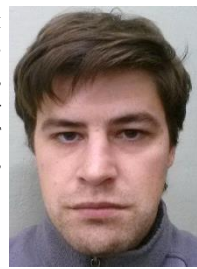
1. **Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I., Kozlovski S.S., Ljublin B.V., Mironov M.I., Melnik A.D., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya.** Neutral particle analysis on ITER — present status and prospects. — Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, 2010, vol. A 621, p. 456—467.
2. **Medley S.S., Donné A.J.H., Kaita R., Kislyakov A.I., Petrov M.P., Roquemore A.L.** Contemporary Instrumentation and application of charge exchange neutral particle diagnostics in magnetic fusion experiments (invited overview). — Review of Scientific Instruments, 2008, vol. 79 (1).
3. **Petrov M.P., Afanasyev V.I., Corti S., Gondhalekar A., Khudoleev A.V., Korotkov A.A., Maas A.C.** Neutral particle analysis in the MeV range in JET. — In: Intern. Conf. on Plasma Physics. Innsbruck, 1992, vol. 16C, Part II. European Physical Society, Geneva, 1992, p. 1031.
4. **Mironov M.I., Afanasyev V.I., Murari A., Santala M., Beaumont P.** Tritium transport studies with use of the ISEP NPA during tritium trace experimental campaign on JET. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2010, vol. 52, p. 10.
5. **Petrov M.P., Budny R.V., Duong H.H., Fisher R.K., Gorelenkov N.N., McChesney J.M., Mansfield D.K., Medley S.S., Parks P.B., Redi M.H., Roquemore A.L.** Studies of energetic confined alphas using the pellet charge exchange diagnostic on TFTR. — Nuclear Fusion, 1995, vol. 35 (12), p. 1437—1443.
6. **Kusama Y., Nemoto M., Afanassiev V.I., Kozlovskij S.S., Petrov S.Ya., Satoh M., Tsukahara Y., Kislyakov A.I., Petrov M.P., Takeuchi H.** Neutral particle analyzer with energy range up to 4 MeV for both alpha particles and protons. — Fusion Engineering and Design, 1997, vol. 34—35, p. 531—534.
7. [http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500\\_H10966\\_TPMH1327E02.pdf](http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/etd/H8500_H10966_TPMH1327E02.pdf).
8. **Amoskov V.M., Belov A.V., Belyakov V.A., Belyakova T.F., Gribov Yu.V., Kukhtin V.P., Lamzin E.A., Sytchevsky S.E.** Computation technology based on KOMPOT and KLONDIKE codes for magnetostatic simulations in tokamaks. — Plasma Devices and Operations, 2008, vol. 16, № 2, p. 89—103.
9. [http://www.vatvalve.com/products/catalog/F/771\\_1\\_V](http://www.vatvalve.com/products/catalog/F/771_1_V).
10. <https://www.techneticsgroup.com/bin/Helicoflex.pdf>.
11. **Afanasyev V., Mironov M., Nesenevich M., Petrov M., Petrov S., Kedrov I., Kuzmin E., Lyublin B.** Pilot testing of NPA system components intended for ITER. — In: 1st EPS Conf. on Plasma Diagnostics. Frascati, Italy, April 14—17, 2015.
12. **Vukolov K., Borisov A., Deryabina N., Orlovskiy I.** Development of ITER diagnostics: neutronic analysis and radiation hardness. — Fusion Engineering and Design, 2015, vol. 96—97, p. 177—180.



Сергей Яковлевич Петров, с.н.с., к.ф.-м.н., Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Ст.-Петербург, Политехническая ул. 26, Россия  
spetrov@npd.ioffe.ru



Валерий Иванович Афанасьев, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Ст.-Петербург, Политехническая ул. 26, Россия  
val@npd.ioffe.ru



Андрей Дмитриевич Мельник, н.с.; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Ст.-Петербург, Политехническая ул. 26, Россия  
amelnik@npd.ioffe.ru



Максим Игоревич Миронов, с.н.с., к.ф.-м.н.; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Ст.-Петербург, Политехническая ул. 26, Россия  
maxim@npd.ioffe.ru



Андрей Сергеевич Наволоцкий, старший лаборант; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Ст.-Петербург, Политехническая ул. 26, Россия  
anavolotsky@mail.ioffe.ru



Владислав Георгиевич Несенеvич, н.с.; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Ст.-Петербург, Политехническая ул. 26, Россия  
nesenevich@npfl.ioffe.ru



Михаил Петрович Петров, г.н.с., д.ф.-м.н.; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Ст.-Петербург, Политехническая ул. 26, Россия  
mpetrov@npd.ioffe.ru



Федор Всеволодович Чернышев, с.н.с., д.ф.-м.н.; Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021 Ст.-Петербург, Политехническая ул. 26, Россия  
fvc@npd.ioffe.ru



Игорь Валерьевич Кедров, ведущий конструктор; Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, 196641 Ст.-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия  
kedrov@sintez.niiefa.spb.su



Евгений Георгиевич Кузьмин, начальник группы, ветеран атомной энергетики и промышленности; Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, 196641 Ст.-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия  
kuzmin@sintez.niiefa.spb.su



Борис Владимирович Люблин, в.н.с, к.ф.-м.н., ветеран атомной энергетики и промышленности; Научно-исследовательский институт электрофизической аппаратуры им. Д.В. Ефремова, 196641 Ст.-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия  
lyublin@sintez.niiefa.su



Станислав Станиславович Козловский, к.ф.-м.н., доцент; Санкт-петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251 Ст.-Петербург, ул. Политехническая 29, Россия  
skozlovski@mail.ru



Александр Николаевич Мокеев, в.н.с., к.ф.-м.н.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123182 Москва, пл. Академика Курчатова 1, стр. 3, Россия  
a.mokeyev@itertf.ru

Статья поступила в редакцию 12 октября 2015 г.  
Вопросы атомной науки и техники.  
Сер. Термоядерный синтез, 2016, т. 39, вып. 1, с. 67—80.