

ISSN 0202—3822

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР  
«КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

# ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

СЕРИЯ  
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

2025

Том 48  
Выпуск 2

Представляем второй выпуск журнала «ВАНТ. Серия Термоядерный синтез» в 2025 году. В нём публикуются 14 статей с результатами работ по проблеме управляемого термоядерного синтеза (УТС). В рубрикации содержания выпуска сделан упор на причастность статей к установкам для УТС (токамаки ИТЭР, ТРТ, Т-11М, КТМ, плазменный линейный мультикасп ПЛМ, квазистационарный сильноточный плазменный ускоритель КСПУ) и тематическим направлениям (обзоры, диагностики, плазма—стенка).

Выпуск открывается обзором применения методов машинного обучения в задачах УТС по расчёту равновесия плазмы и его эволюции, а также в задачах управления плазмой. Авторами из МГУ рассмотрен широкий спектр методов — от достаточно простых полносвязных нейронных сетей до рекуррентных сетей, трансформеров, генеративных моделей.

В разделе «ИТЭР» представлены две работы по технологии изготовления элементов первой стенки и диагностике нейтронов. Авторы из НИИЭФА и Частного учреждения «ИТЭР-Центр» (далее ИТЭР-Центра) провели экспериментальное исследование влияния дефектов пайки вольфрамовых облицовочных плиток к водоохлаждаемым теплоотводам обращённых к плазме элементов центральной сборки дивертора. Авторы из ТРИНИТИ и ИТЭР-Центра провели испытания ионизационных камер деления, модернизированных для регистрации термоядерных нейтронов с помощью диагностики «Вертикальная нейтронная камера ИТЭР».

В разделе «ТРТ» представлены четыре работы. В первой статье авторы из ИТЭР-Центра, ФТИ им. А.Ф. Иоффе и СППУ Петра Великого проанализировали возможности применения корпускулярной диагностики для измерения ионной температуры и изотопного состава дейтериево-водородной плазмы на токамаке с реакторными технологиями. Вторая статья авторов из ИТЭР-Центра посвящена диагностике «Активная спектроскопия», обозначаемой в англоязычной литературе аббревиатурой CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy): в дополнение к ранее разработанной горизонтальной системе наблюдения представлена концепция вертикальной системы наблюдения. В третьей статье авторы из ТРИНИТИ, ВНИИНМ и НИИЭФА на частном примере ТРТ изложили принципы работы тритиевого технологического комплекса, рабочие характеристики аппаратов, обеспечивающих сбор, обработку и хранение трития для экспериментов по УТС. В четвёртой статье авторы из ИТЭР-Центра и ФТИ им. А.Ф. Иоффе исследовали возможность использования молибдена марки МЧВП в качестве материала внутривакуумных лазерных зеркал в токамаке ТРТ как альтернативы существенно более дорогим и сложным в производстве монокристаллическим зеркалам.

В статье авторов из ТРИНИТИ представлены результаты испытаний в токамаке Т-11М вертикального жидкометаллического литиевого лимитера на основе капиллярно-пористой структуры с внешней подачей лития в течение первых двух лет его использования.

Над разработкой и апробацией диагностики транспорта материала в камере токамака КТМ трудились авторы из МИФИ, трёх научных организаций Республики Казахстан и Фрязинского филиала ИРЭ РАН. В экспериментальных кампаниях 2023—2024 гг. показана работоспособность масштабируемой системы измерения баланса эрозии и осаждения на временах, сравнимых с временем экспериментальной кампании.

На установке ПЛМ авторами из МЭИ и НИЦ «Курчатовский институт» проведены эксперименты с жидкометаллическим капельным потоком, инжектируемым вертикально вниз в стационарный плазменный разряд. Результаты актуальны для оценки возможности защиты первой стенки токамака от перегрева.

В статье авторов из ТРИНИТИ представлена разработка архитектуры системы управления, сбора и архивации данных, обеспечивающей функционирование установки КСПУ в импульсно-периодическом режиме. Работа выполнена в рамках создания прототипов плазменных ракетных двигателей с повышенными параметрами тяги и удельного импульса.

Раздел «Диагностики» представлен статьёй авторов из НИЦ «Курчатовский институт», в которой продемонстрировано использование расчётного алгоритма на основе преобразования Стоквелла для анализа экспериментальных данных МГД-диагностики в токамаке.

Раздел «Плазма—стенка и материалы для УТС» содержит две статьи. В первой авторы из НИЦ «Курчатовский институт» провели численное моделирование старения каскадов атомных столкновений в ОЦК-металлах, железе и ванадии, которые могут стать основой малоактивируемых конструкционных материалов для термоядерных реакторов (ТЯР) и гибридных систем «синтез—деление». Во второй статье авторы из НИЦ «Курчатовский институт», РХТУ и ВНИИНМ исследовали изотопное замещение дейтерия протием в стали ЭК-181 (кандидатном материале бланкета в ТЯР) при её плазменном облучении.

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ЦЕНТР «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»

# ВОПРОСЫ АТОМНОЙ НАУКИ И ТЕХНИКИ

научно-технический сборник

СЕРИЯ  
ТЕРМОЯДЕРНЫЙ СИНТЕЗ

ИЗДАЁТСЯ С 1978 г.

Том 48  
Выпуск 2

МОСКВА — 2025

## Главный редактор

М.В. Ковальчук, президент НИЦ «Курчатовский институт»

## Редакционная коллегия:

А.Б. Кукушкин, зам. главного редактора, в.н.с., д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

А.Б. Алексеев, рук. департамента, д. техн. н., Международная организация ИТЭР, Сен-Поль-ле-Дюранс, Франция

А.В. Бурдаков, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор, ИЯФ им. Г.И. Будкера СО РАН, Новосибирск

В.А. Быков, нач. группы, к. техн. н., ИФП им. Макса Планка, Грайфсвальд, Германия

Ю.М. Гаспарян, зав. кафедрой, д.ф.-м.н., доцент, НИЯУ МИФИ, Москва

Л.Е. Захаров (Zakharov), в.н.с., д.ф.-м.н., Li-WFusion, Princeton, NJ, USA

Н.А. Кирнева, руководитель отделения, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

А.Е. Киселёв, зав. отделением, д. техн. н., ИБРАЭ РАН, Москва

Д.В. Коваленко, главный специалист отдела управления НИОКР, с.н.с., Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва

А.В. Козлов, советник директора, д. техн. н., АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Свердловская обл.

Е.Р. Корешева, г.н.с., и.о. зав. лабораторией, д.ф.-м.н., ФИАН им. П.Н. Лебедева, Москва

С.И. Крашенинников (Krashennikov), профессор, д.ф.-м.н., University of California at San Diego, San Diego, CA, USA

А.Ю. Лешуков, зам. начальника отдела, НИКИЭТ им. Н.А. Доллежала, Москва

И.В. Мазуль, г.н.с., д. техн. н., НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург

В.Б. Минаев, в.н.с., к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург

А.Б. Минеев, в.н.с., к.ф.-м.н., НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, Санкт-Петербург

С.В. Мирнов, научный руководитель отделения, д.ф.-м.н., профессор, АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Троицк, Москва

А.Н. Романников, заместитель директора по термоядерному синтезу и плазменным технологиям, д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

П.В. Романов, советник нач. отдела, к. техн. н., Государственная корпорация по атомной энергии «Росатом», Москва

В.Ю. Сергеев, профессор, д.ф.-м.н., СПб политехнический университет Петра Великого, Санкт-Петербург

А.В. Спицын, начальник отдела, к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

И.Л. Тажибаева, заместитель директора, д.ф.-м.н., профессор, ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан, Курчатов, Республика Казахстан

П.П. Хвостенко, научный руководитель комплекса, д. техн. н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

В.И. Хрипунов, в.н.с., к. техн. н., НИЦ «Курчатовский институт», Москва

В.М. Чернов, г.н.с., д.ф.-м.н., профессор, АО «ВНИИНМ» им. А.А. Бочвара, Москва

**Отв. секретарь:** Карпова Татьяна Юрьевна  
karpova.tat@fc.iterru.ru, тел.: 7-499-196-98-31

**Соучредители:** Автономная некоммерческая организация Координационный центр «Управляемый термоядерный синтез — международные проекты» (УТС-Центр), федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

Журнал (основан в 1978 г.) зарегистрирован в реестре Федеральной службы по надзору в сфере связи, информационных технологий и массовых коммуникаций ПИ № ФС77-73164 от 02 июля 2018 г.; электронное периодическое издание Эл. № ФС77-73162 от 22 июня 2018 г. Подписной индекс в Каталоге периодики агентства «Урал-Пресс» № 70541

Журнал включён в Перечень журналов ВАК, индексируется в базах данных Scopus, Ulrich's Periodicals Directory и РИНЦ на платформе Web of Science, имеет цифровой идентификатор статей (eLIBRARY Document Number — EDN), реферируется в РЖ ВИНТИ РАН, имеет в открытом доступе полнотекстовую электронную версию на сайте <http://vant.iterru.ru> и на платформе Российской научной электронной библиотеки <http://www.elibrary.ru>  
Двухлетний импакт-фактор журнала в РИНЦ: 0,644

© Редколлегия журнала «ВАНТ. Серия Термоядерный синтез», 2025 г.

© <http://vant.iterru.ru>

NATIONAL RESEARCH CENTRE «KURCHATOV INSTITUTE»

# PROBLEMS OF ATOMIC SCIENCE AND TECHNOLOGY

Collected scientific and technical papers

Series

**THERMONUCLEAR FUSION**

PUBLISHED since 1978

**Volume 48**

**Issue 2**

[Voprosy Atomnoi Nauki i Tekhniki. Seriya: Termoyadernyi Sintez]

MOSCOW — 2025

Editor-in-Chief

M.V. Kovalchuk, President of the NRC «Kurchatov Institute»

#### Editorial Board:

A.B. Kukushkin, Deputy Editor-in-Chief, Leading Research Scientist, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

A.B. Alexeev, Department Head in the ITER International Organization, Dr. of Science Degree in Engineering, Saint Paul-lèz Durance, France

A.V. Burdakov, Principal Research Scientist, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Professor, G.I. Budker Institute of Nuclear Physics, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk

V.A. Bykov, Group Leader, PhD in Engineering, Max Planck Institute for Plasma Physics, Greifswald, Germany

Yu.M. Gasparyan, Department Head, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Associate Professor, National Research Nuclear University «Moscow Engineering Physics Institute», Moscow

L.E. Zakharov, Leading Research Scientist, PhD in Physics and Mathematics, LiWFusion, NJ, Princeton, USA

N.A. Kirneva, Division Head, PhD in Physics and Mathematics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

A.E. Kiselev, Department Head, Dr. of Science Degree in Engineering, Nuclear Safety Institute of RAS, Moscow

D.V. Kovalenko, Chief Specialist of the R&D Management Division, Senior Research Scientist, State Corporation «Rosatom», Moscow

A.V. Kozlov, Advisor to the Director, Dr. of Science Degree in Engineering, Joint-stock company «Institute of Reactor Materials», Zarechnyj, Sverdlovsk region

E.R. Koresheva, Principal Research Scientist, Acting Laboratory Head, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, P.N. Lebedev Physical Institute of RAS, Moscow

S.I. Krashennnikov, Professor, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, University of California at San Diego, San Diego, CA, USA

A.Yu. Leshukov, Deputy Head of Department, N.A. Dollezhal Research and Development Institute of Power Engineering, Moscow

I.V. Mazul, Principal Research Scientist, Dr. of Science Degree in Engineering, «D.V. Efremov Institute of Electrophysical Apparatus», St. Petersburg

V.B. Minaev, Leading Research Scientist, PhD in Physics and Mathematics, A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology, St. Petersburg

A.B. Mineev, Leading Research Scientist, PhD in Physics and Mathematics, D.V. Efremov Scientific Research Institute of Electrophysical Apparatus, St. Petersburg

S.V. Mirnov, Scientific Head of Division, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Professor, Troitsk Institute for Innovation & Fusion Research (TRINITI), Troitsk, Moscow

A.N. Romannikov, Deputy Director for Nuclear Fusion and Plasma Technologies, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

P.V. Romanov, Advisor to the Department Head, PhD in Engineering, State Corporation «Rosatom», Moscow

V.Yu. Sergeev, Professor, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Peter the Great Saint-Petersburg Polytechnic University, St. Petersburg

A.V. Spitsyn, Head of Department, PhD in Physics and Mathematics, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

I.L. Tazhibaeva, Deputy Director, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Professor, Institute of Atomic Energy, National Nuclear Centre, Kurchatov City, Kazakhstan

P.P. Khvostenko, Scientific Director of the Complex, Dr. of Science Degree in Engineering, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

V.I. Khripunov, Leading Research Scientist, PhD in Engineering, NRC «Kurchatov Institute», Moscow

V.M. Chernov, Principal Research Scientist, Dr. of Science Degree in Physics and Mathematics, Professor, A.A. Bochvar High-Technology Research Institute for Inorganic Materials, Moscow

**Editorial Management:** Karpova Tatyana Yurievna

karpova.tat@fc.iterru.ru, tel.: 7-499-196-98-31

**Co-founders:** Autonomous non-profit organization Coordinating center «Controlled Thermonuclear Fusion — International Projects» (CTF-Center); Federal State Institution National Research Centre «Kurchatov Institute»

The journal (established in 1978) is filed in the registry of the Federal Service for Supervision of Communications, Information Technology and Mass Media PI № FS77-73164 of 02 June 2018; electronic periodical is filed in the registry El. № FS77-73162 of 22 June 2018

Subscription index in the catalogue of periodicals of the «Ural-Press» agency № 70541

The journal is included into the list of the Supreme Certification Commission key journals. Its indexes are available in the databases Scopus, the Ulrich's Periodicals Directory and the Russian Science Citation Index (RSCI) on the Web of Science platform. The papers published in it have digital Article Identifier (eLibrary Document Number — EDN). The abstracts of the papers published in it are available in the abstract journal of the VINITI RAS. All the free access full-text electronic versions of the papers are available on the site <http://iterru.ru> and on the platform of the Russian Scientific Electronic Library <http://www.elibrary.ru>

The two-year impact factor of the journal in RSCI: 0,644

© Editorial Board of the Journal Problems of Atomic Science and Technology. Ser. Thermonuclear Fusion, 2025

© <http://vant.iterru.ru>

УДК 004.896

## МАШИННОЕ ОБУЧЕНИЕ В ЗАДАЧАХ УПРАВЛЯЕМОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

*Е.И. Четкин, А.Г. Шишкин*

*МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

В настоящее время во многих странах проводятся широкомасштабные исследования в области управляемого термоядерного синтеза (УТС). Это связано с потенциальной возможностью получения практически неисчерпаемого источника энергии. При этом теоретическую основу исследований составляют математическое моделирование для описания состояния плазмы и численные методы решения полученных уравнений. Однако в последние годы в задачах УТС всё большую популярность приобретают алгоритмы машинного обучения. Данная статья посвящена обзору новых нейросетевых алгоритмов управления плазмой в токамаке и предсказательных нейросетевых алгоритмов в приложениях к задачам УТС.

**Ключевые слова:** машинное обучение, обучение с подкреплением, плазма, управляемый термоядерный синтез.

## MACHINE LEARNING APPLIED TO PROBLEMS OF NUCLEAR FUSION

*Chetkin E.I., Shishkin A.G.*

*Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia*

Currently, large-scale researches in the field of controlled thermonuclear fusion (CTF) are being conducted in many countries. This is due to the potential possibility of obtaining a virtually inexhaustible source of energy. At the same time, the theoretical basis of the research are mathematical modeling for describing the state of the plasma and numerical methods for solving the obtained equations. However, in recent years, machine learning algorithms have become increasingly popular in CTF problems. This paper is devoted to a review of new neural network algorithms for plasma control in a tokamak and predictive neural network algorithms in applications to CTF problems.

**Key words:** machine learning, reinforcement learning, plasma, controlled thermonuclear fusion.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В условиях истощения невозобновляемых природных ресурсов [1] все острее встаёт проблема альтернативных источников энергии. Одним из самых перспективных методов выработки энергии является управляемый термоядерный синтез (УТС) [2]. Наиболее часто для магнитного удержания плазмы с целью достижения условий УТС используются такие установки, как токамаки. Их отличительной особенностью является высокая температура топлива в активной зоне — порядка сотен миллионов градусов. При таких температурах дейтерий-тритиевое топливо переходит в состояние горячей плазмы, форму которой в реакторе можно контролировать с помощью внешних магнитных полей.

Задачи управления формой плазмы и предсказания её состояния являются одними из важнейших в области УТС. Традиционно данные задачи решались на основе построения сложных математических моделей и последующего применения численных методов. Однако с развитием вычислительной техники и появлением больших массивов данных возникло новое направление в теоретических исследованиях высокотемпературной плазмы, связанное с применением методов машинного обучения.

Машинное обучение — множество алгоритмов и методов, обучающихся решать поставленные задачи на основе имеющихся данных и делать прогнозы или принимать решения без явного формулирования математической модели. Методы машинного обучения нашли своё применение в самых разных областях науки и техники [3]. В области УТС они известны уже достаточно давно [4].

В настоящее время существует множество разных видов алгоритмов машинного обучения, одними из самых известных и широко применяемых на практике являются нейронные сети. Популярность большинству существующих типов нейронных сетей обеспечили относительная простота применяемого математического аппарата и высокая эффективность при решении широкого спектра задач.

Нейронная сеть — алгоритм, состоящий из различных слоёв, часто соединённых между собой различными нелинейными функциями, называемыми функциями активации, которые позволяют применять нейросети к более сложным задачам. Одним из самых простых слоёв является полносвязный:

$$y = f(W^T x + b), \quad (1)$$

где  $W$ ,  $b$  — весовые коэффициенты;  $x$  — входные данные;  $y$  — выходные данные;  $f$  — функция активации. Для обучения нейронной сети для некоторой задачи вводится функция потерь, которая отражает, насколько значение, спрогнозированное алгоритмом, отличается от реально полученного значения. Таким образом, для обучения нейронной сети необходимо найти такие  $W$  и  $b$ , при которых функция потерь на обучающем наборе данных будет минимальна. Нейросети, состоящие только из полносвязных слоёв, часто называют полносвязными нейросетями или многослойными перцептронами. Нейронные сети, имеющие более двух слоёв, обычно называют глубокими. Помимо многослойных перцептронов, существует множество других, более сложных нейросетевых архитектур.

Известно, что многослойный перцептрон при некоторых условиях (в том числе заранее заданной точности решения), наложенных на процедуру обучения, позволяет за конечное время найти оптимальные значения весовых коэффициентов [5], а полносвязная глубокая нейросеть достаточного размера при удачном подборе весов способна аппроксимировать любую непрерывную функцию многих переменных с любой заранее заданной точностью [6].

В данной статье выполнен обзор алгоритмов машинного обучения, применяемых для решения различных задач, возникающих при моделировании процессов, происходящих в токамаках. Примеры алгоритмов для устройств УТС других типов, например, стеллараторов, рассмотрены в работе [7].

В статье рассмотрены различные применения нейросетевых моделей для задач УТС, описаны методы машинного обучения для определения и прогнозирования эволюции равновесия плазмы, рассмотрены методы управления формой и границей плазмы, обсуждаются актуальные задачи УТС, для решения которых могут быть использованы методы машинного обучения.

## 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАВНОВЕСНЫХ СОСТОЯНИЙ ПЛАЗМЫ И ИХ ЭВОЛЮЦИИ

Проблема предсказания равновесных состояний плазмы является одной из самых сложных и важных в задачах УТС. Поскольку решение данной задачи традиционными методами включает в себя аппроксимацию решений начально-краевых задач для нелинейных уравнений в частных производных, она требует больших вычислительных затрат. Поэтому одним из решающих требований к таким алгоритмам является скорость их работы. Существуют два основных подхода к решению данной проблемы: снижение сложности алгоритма и увеличение вычислительных мощностей. В настоящее время в УТС широко используются следующие численные коды для получения приближённых решений задач в УТС: EFIT [8], CHEASE [9] для восстановления равновесия, RAPTOR [10] (моделирует эволюцию распределения магнитного потока и температуры электронов), TOPICS [11] (моделирует множество различных параметров, среди которых ток плазмы, коэффициент запаса устойчивости, нормализованная бета), транспортные коды и другие.

Алгоритмы машинного обучения позволяют использовать простые линейные модели, но они требуют большого объёма данных для получения качественных предсказаний. В последнее время пред-

ставители этого класса алгоритмов всё больше проникают в область УТС. Например, ещё в 2008 г. появились аппроксимации уравнения Грэда—Шафранова (ГШ) [2] с помощью методов машинного обучения. Одна из первых успешных попыток была выполнена в работе [12] с помощью полносвязной нейронной сети EFIT-NN. Предложенная нейронная сеть решает задачу восстановления магнитного равновесия. Полоидальный магнитный поток аппроксимируется на сетке  $22 \times 13$  с помощью имеющихся характеристик плазмы, таких как ток плазмы (измерен с помощью пояса Роговского), тангенциальная и нормальная компоненты магнитного поля (их значения были измерены с помощью магнитных зондов), магнитный поток через петли для измерения полоидального потока:

$$\psi^{NN} = s_0 + \sum_{l=1}^{60} s_l f \left( u_{l0} + \sum_{k=1}^{60} u_{lk} f \left( v_{k0} + \sum_{j=1}^{60} v_{kj} f \left( w_{j0} + \sum_{i=1}^{93} w_{ji} x_i \right) \right) \right). \quad (2)$$

В (2), где показан алгоритм обработки данных, входные переменные обозначены как  $x_i$  и под ними подразумеваются цилиндрические координаты, значения магнитного поля, тока плазмы и потока полоидального магнитного поля;  $s$ ,  $u$ ,  $v$ ,  $w$  — весовые коэффициенты нейронной сети;  $f$  — функции активации. Вектор входных данных состоит из 93 компонент. Поскольку создание нейронной сети предполагает некоторую свободу действий, авторы задавали размерности слоёв равными 60. Предложенная модель была обучена на данных из 1118 разрядов на токамаке KSTAR, проведённых в 2017 и 2018 гг. При обучении модели использовались хорошо зарекомендовавший себя оптимизатор ADAM [13] и сумма среднеквадратичных ошибок как функция потерь. В качестве целевых значений использовались результаты работы кода EFIT. В дополнение авторы предлагают метод, основанный на байесовом выводе, для заполнения пропущенных значений данных. Время предсказания обученной модели составляло 1 мс, что делало её перспективной для описания эволюции состояний плазмы в реальном времени, также её предсказания имели высокую корреляцию с результатами работы кода EFIT [8] (коэффициент детерминации  $R^2 > 0,996$ ). Коэффициент детерминации — доля дисперсии зависимой переменной, объясняемая предложенной моделью (3):

$$R^2 = 1 - \frac{\sigma^2}{\sigma_y^2}, \quad (3)$$

где  $\sigma^2$  — дисперсия ошибки модели;  $\sigma_y^2$  — дисперсия случайной величины  $y$ . Соответственно чем ближе значение данного коэффициента к единице, тем сильнее зависимость. Кроме того, коэффициент корреляции  $r$ , который тоже часто используется для оценки качества работы моделей машинного обучения, является квадратным корнем из коэффициента детерминации ( $r = \sqrt{R^2}$ ).

Дальнейшим развитием работы [12] является фреймворк GS-DeepNet [14], где аппроксимация решения уравнения ГШ проводилась с помощью двух полносвязных нейросетей (рис. 1).

Нейросеть NN<sub>1</sub> предсказывала значения полоидального потока  $\Psi$  на сетке  $41 \times 41$  и обучалась на измеренных значениях, полученных с помощью 42 магнитных зондов и 45 петель для измерения магнитного потока. Нейросеть NN<sub>2</sub> предсказывала значения правой части уравнения ГШ ( $p'$  и  $ff'$ ) на основании предсказаний NN<sub>1</sub>. Для её обучения также использовались данные об измеренных значениях магнитных полей, полоидальном потоке, а также о токе плазмы. Обе нейросети были обучены с помощью методов градиентного спуска. Также авторы разработали свой модуль для определения границы плазмы. Для оценки качества предсказаний результаты работы нейронной сети GS-DeepNet сравнивали с результатами работы кода EFIT. Кроме того, авторы модифицировали процедуру обучения, поскольку вне границы плазмы  $\Delta^* \Psi = 0$  (при условии, что из общего потока вычли магнитный поток от внешних полоидальных катушек), и задача становится некорректной. Также авторы применяли дропаут (обнуление фиксированного количества случайно выбранных весовых коэффициентов) не только при обучении, но и на тестовой выборке, чтобы учесть неопределённость предсказаний модели. Предложенная модель была обучена на данных 50 разрядов на токамаке KSTAR и показала хорошие ре-

зультаты в реконструкции равновесного состояния плазмы, а именно коэффициенты детерминации:  $R^2 > 98\%$  между предсказанными результатами для левой и правой частей уравнения ГШ,  $R^2 > 99\%$  между предсказанными нейронной сетью указанными значениями физических величин и значениями, полученными с помощью измерений во время разрядов токамака KSTAR.

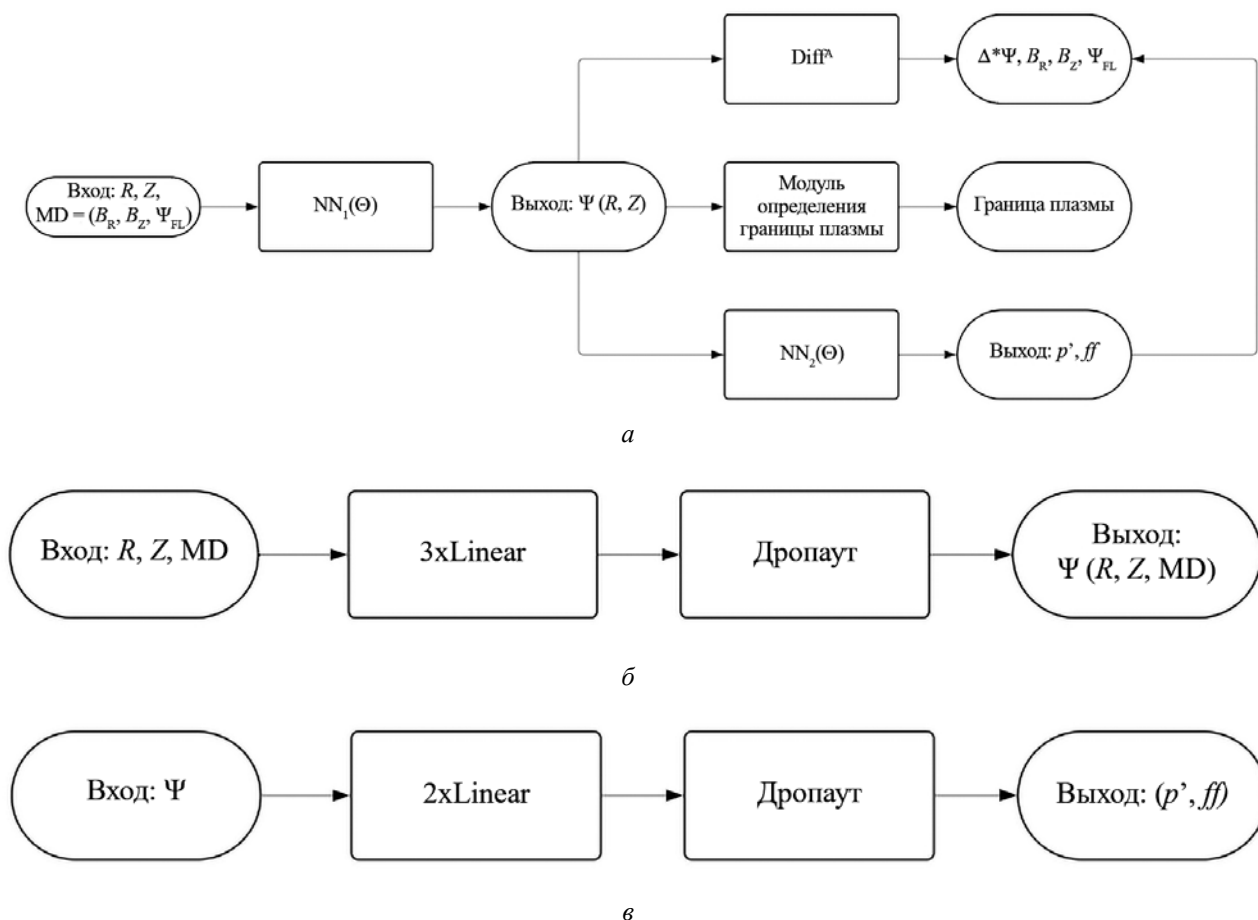


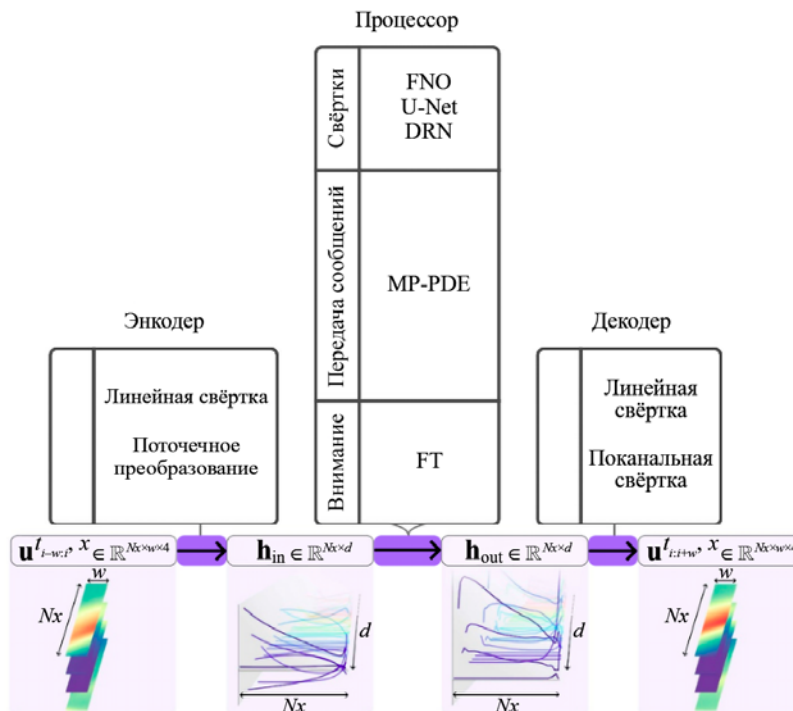
Рис. 1. Блок-схема алгоритма работы сети Gs-DeepNet: а — общая блок-схема (Diff<sup>A</sup> — оператор автоматического дифференцирования, MD — вектор измеренных значений потока и магнитного поля); б — блок-схема нейросети NN<sub>1</sub>, аппроксимирующей левую часть уравнения ГШ. (Linear — полносвязный линейный слой нейронной сети); в — блок-схема нейросети NN<sub>2</sub>, аппроксимирующей правую часть уравнения ГШ

Для восстановления равновесия плазмы, а также предсказания ряда других параметров плазмы (в частности, малого радиуса плазмы, вытянутости, треугольности, индуктивности, коэффициента запаса устойчивости, координат геометрического центра плазмы) в работе [15] был разработан программный комплекс EFITNN. Данные для его обучения (в частности, значения магнитного потока как интеграл напряжения петель, полоидального магнитного поля, тока плазмы, а также значения токов в катушках полоидального поля, тороидального поля и центральном соленоиде) были получены с 1159 разрядов токамака HL-3. В качестве архитектуры авторы выбрали свёрточные нейросети. В работе отмечается снижение времени вычисления параметров плазмы по сравнению с другими методами. Полученные с помощью нейронной сети предсказания параметров формы плазмы (малый радиус, вытянутость плазмы, индуктивность плазмы, координаты  $R$  и  $Z$  геометрического центра плазмы, верхняя и нижняя треугольности плазмы), а также распределений магнитного потока и плотности плазменного тока на сетке  $129 \times 129$  имели высокую степень корреляции с значениями параметров, полученных в ходе разрядов на токамаке HL-3 (коэффициент корреляции  $r > 0,97$ ).

Примером аппроксимации уравнений в частных производных может служить фреймворк DIVID-NN [16]. В данной статье авторы моделировали диверторную плазму в токамаке TCV. В качестве

входных данных использовались значения следующих физических величин: температура плазмы, параллельная магнитному полю скорость ионов, концентрация плазмы, а также концентрация нейтронов в заданные моменты времени, и предсказывались значения этих же величин на следующих за ними временных шагах. В настоящей статье авторы для предсказания эволюции состояния плазмы используют видоизменённую архитектуру автокодировщика (рис. 2) с различными модулями (процессорами) для обработки представлений данных (эмбеддингов). В качестве процессоров рассмотрены следующие нейросетевые архитектуры, основанные на свёртках: расширенная остаточная сеть (DRN), U-Net, нейронное преобразование Фурье (FNO), трансформер Фурье (FT) и некоторые другие. Полученные результаты свидетельствуют о том, что авторам [16] удалось сократить время предсказания более чем вдвое (с 2 до 0,63 мс) при сохранении качества предсказаний.

Рис. 2. Общая схема архитектуры автокодировщика. Кодировщик переводит прошлый поданный на вход временной отрезок параметров разряда с новыми краевыми условиями в скрытое (латентное) пространство, где они обрабатываются процессором и с помощью декодировщика рассчитываются параметры плазмы для следующего временного отрезка. Параметры плазмы на всём времени разряда рассчитываются итеративно:  $\mathbf{u}(t, x)$  — вектор параметров плазмы,  $\mathbf{h}_{in}$  — представление вектора  $\mathbf{u}$  в скрытом пространстве,  $\mathbf{h}_{out}$  — выходной вектор после процессинга [16]



Интересным примером аппроксимации уравнений в частных производных с помощью методов машинного обучения являются физико-информированные нейронные сети (physics-informed neural networks, PINN). В [17] показан пример их применения к задачам УТС. Авторы разработали несколько полносвязных нейронных сетей для решения следующих задач: реконструкции равновесия, восстановления профиля плотности из данных интерферометрии, болометрической томографии, однако они использовали «физические» функции потерь, т.е. функции потерь, основанные на физических уравнениях и граничных условиях задачи. Обученные таким образом сети имели хорошее сходство как с результатами расчётов EFIT, так и с аналитическими решениями уравнения ГШ, такими как решения Соловьёва [18]. В качестве обучающего набора данных выступили данные о величинах магнитного поля, полоидального потока, измеренных во время разрядов в токамаке JET. Для решения задач восстановления профиля плотности из данных интерферометрии и болометрической томографии нейронные сети были обучены на массивах величин профиля плотности электронов и излучения плазмы, измеренных во время разрядов в токамаке JET.

Помимо уравнения ГШ, методы машинного обучения применяются для решения других уравнений, среди которых, в первую очередь, следует выделить транспортные уравнения. В статье [19] нейросетевая модель тоже представляет собой многослойный перцептрон с нелинейными функциями активации. Данная модель, разработанная для установки MAST-U, принимает на вход длину контура плазмы, входную плотность ионов дейтерия, коэффициент расширения площади трубки магнитного

потока, коэффициент рециклинга ионов на мишени, долю примеси введённого неона и предсказывает температуру электронов и фронт излучения углеродных примесей для диверторной плазмы. Набор входных данных был сгенерирован с помощью симулятора Hermes-3 [20] и насчитывал более 3000 имитационных расчётов. Коэффициенты детерминации предсказанных величин составили 0,99.

В УТС нашли своё применение и другие, более сложные нейросетевые архитектуры. Например, в задачах расчёта эволюции равновесных состояний плазмы и моделировании горизонтального смещения плазмы в токамаке HL-2A хорошо показали себя рекуррентные нейронные сети, в частности, LSTM [21].

В последние годы стали активно использоваться трансформеры. Так, трансформер из [22] был разработан на основе модели GPT-2 [23] и обучен на данных разрядов с трёх разных токамаков для определения того, закончится ли тот или иной разряд срывом. Использование аугментации данных (увеличение обучающего набора данных за счёт искусственно созданных примеров для повышения качества предсказаний нейронной сети) при обучении позволило предложенной модели повысить эффективность предсказания срыва разряда.

В статьях [24, 25] авторы использовали трансформеры для восстановления крайней магнитной поверхности плазмы. В [24] трансформер был обучен на данных о токе плазмы, напряжениях в катушках полоидального поля, номинальном токе в полоидальных катушках. Данные были получены во время разрядов на токамаке EAST. На выходе предсказывались данные с магнитных зондов и петель для измерения полоидального потока. Далее граница плазмы восстанавливалась с помощью кода EFIT. В [25] нейронная сеть уже непосредственно сама восстанавливала дискретизованную границу плазмы из данных о состоянии плазмы (ток плазмы, концентрация электронов, запасённая энергия плазмы, напряжение в петлях, нормализованная бета, вытянутость границы плазмы, внутренняя индуктивность плазмы) и о напряжениях в управляющих катушках. Набор данных для обучения и тестирования трансформера представлял собой совокупность из более чем 10 тысяч разрядов на токамаке EAST. В результате авторам [24, 25] удалось предсказывать крайнюю магнитную поверхность плазмы с высокой схожестью с целевой дискретизованной крайней магнитной поверхностью, которая была восстановлена из данных, полученных с реальных разрядов, с помощью кода EFIT, — 95% (метрика схожести была введена авторами как норма матрицы относительных ошибок).

В статье [26] представлен целый программный комплекс, который с помощью мультимодальных архитектур, включающих в себя полносвязные нейронные сети, свёрточные кодировщики и декодировщики, позволяет достаточно точно реконструировать различные параметры плазмы, такие как распределение давления, профиль плотности тока в плазме, коэффициента запаса устойчивости, плотности и температуры электронов, температуры ионов и тороидальной скорости вращения плазмы в токамаке DIII-D. В качестве входных данных использовались измеренные значения тока плазмы, величины тороидального магнитного поля, профиль температуры электронов, профиль концентрации электронов, профиль температуры ионов, тороидальной частоты вращения плазмы, а также граница плазмы, распределения давления, профиль коэффициента запаса устойчивости (восстанавливались с помощью кода RT-EFIT). Модели обучались на примерах из базы данных OMFIT [27], а также на результатах работы кодов EFIT и CAKE [28] и показали высокую степень корреляции с тестовой выборкой ( $r > 0,935$ ) и низкий разброс относительной погрешности ( $\sigma < 0,11$ ).

В сфере УТС используются и байесовы методы. Поскольку в плазме возможны флуктуации, которые могут привести к срыву плазмы, одним из требований к управляющей системе токамака является её способность работать в условиях неопределённости. Одним из решений такой проблемы могут быть байесовы методы, где в моделях учитывается априорное знание о задаче. Однако в таких методах априорное распределение выбирается разработчиком, исходя из его представлений, в то время как реальное априорное распределение может быть очень сложно устроенным. Как итог, апостериорное распределение параметров модели может потребовать очень сложных аппроксимаций. Тем не менее существуют работы, посвящённые приложениям байесовых методов к задачам УТС в токамаках.

Например, в работе [29] представлен байесов метод для вычисления осесимметричного равновесия плазмы при поданных на вход распределениях токов и полоидального потока. Для обучения ис-

пользовались данные о магнитном поле и магнитном потоке, полученные с помощью магнитных зондов и петель для измерения полоидального потока. Также были использованы данные о концентрации электронов, полученные с помощью интерферометров, и данные о температуре электронов, полученные с помощью систем томсоновского рассеяния и спектроскопии. С помощью байесовских методов и гауссовых процессов авторы смогли реконструировать равновесное состояние плазмы, а также предсказывать значения полоидального потока и тока плазмы, профили концентрации и температуры электронов. В статье [29] авторы приводят результаты работы своего метода, имеющие высокую корреляцию с результатами работы кода EFIT, однако не приводят никаких численных значений.

В России нейросетевые методы были применены в экспериментах на сферическом токамаке Глобус-М2 [31, 32], где полносвязная нейронная сеть применялась для определения того, является ли плазма диверторной. В качестве входных данных были использованы измеренные значения магнитных потоков и значения токов в управляющих катушках. Также в [31] представлена нейросетевая архитектура для расчёта величин зазоров между крайней магнитной поверхностью плазмы и стенками камеры. Авторы отмечают перспективность использования нейросетей в силу их адаптивности к большому числу задач.

### 3. МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ ПЛАЗМОЙ

Важнейшей задачей УТС является управление формой и границей плазмы. Среди классических алгоритмов управления следует, в первую очередь, упомянуть такие, как LQR и  $H_\infty$ , а также FCDI [32]. Что касается применения методов машинного обучения для управления плазмой, то сначала появились модели, основанные на классических алгоритмах обучения и на использовании нейросетей. Так, в статье [33] представлена нейросетевая модель, управляющая токами в полоидальных катушках для подавления неустойчивостей в транспортном барьере, связанных с локализованными на границе плазмы модами, с помощью резонансных магнитных возмущений, при этом не снижая эффективности синтеза. Модель представляет собой полносвязную нейронную сеть. Данная модель была обучена и развёрнута на токамаках KSTAR и DIII-D, где успешно проявила себя. В качестве данных для обучения были использованы измеренные значения тока плазмы, коэффициента запаса устойчивости, индуктивности плазмы, координаты X-точки, вытянутости плазмы, полоидальной беты, полученные из около 8500 разрядов токамака KSTAR за последние несколько лет.

С недавнего времени начали появляться работы, показывающие возможности алгоритмов обучения с подкреплением в приложении к задаче управления плазмой в токамаке.

Обучение с подкреплением (Reinforcement Learning, RL) — метод машинного обучения, где модель (также называемая агентом) обучается взаимодействию с некоторой средой. Идея состоит в том, что агент выбирает способ взаимодействия со средой, исходя из текущего состояния среды. Среда, в свою очередь, возвращает своё изменённое состояние и награду (оценку выбранного агентом действия). Взвешенную сумму наград за некоторый временной эпизод взаимодействия со средой принято называть выгодой. Задача машинного обучения с подкреплением заключается в максимизации ожидаемой выгоды за временной эпизод. В машинном обучении с подкреплением математический аппарат обычно строится на марковском процессе принятия решений [34]. Одним из важных направлений обучения с подкреплением является подход «актёр—критик» [35], где актёр выбирает действия, а критик вычисляет приближённую ценность входного состояния (ожидаемую выгоду от состояния, поданного на вход, за оставшееся количество шагов). В таком подходе и актёр, и критик обычно представлены нейронными сетями. Общая блок-схема такого метода представлена на рис. 3.

Самый известный пример применения машинного обучения с подкреплением в УТС представлен в статье [36]. Блок-схема разработанной модели представлена на рис. 4. Авторы статьи разработали модель машинного обучения с подкреплением, основанную на методе «актёр—критик», где в роли актёра выступала полносвязная нейронная сеть, а в роли критика — рекуррентная нейронная сеть. Используя эту модель в качестве контроллера на токамаке TCV, авторам удалось получить и удерживать сложные конфигурации плазмы в токамаке, а именно плазмы отрицательной треугольности — «сне-

жинку» (авторам удалось контролировать расстояние между  $X$ -точками), два отдельных плазменных шнура в камере.



Рис. 3. Общая блок-схема метода «актёр—критик»: сеть политик — нейронная сеть, принимающая на вход текущее состояние среды и ценность полученного состояния; сеть ценности — нейронная сеть, аппроксимирующая функцию ценности, т.е. ожидаемую выгоду от состояния, поданного на вход, за оставшееся время. Иногда в качестве среды может использоваться другая нейронная сеть, часто называемая моделью динамики

ду. В реальных условиях на TCV была развёрнута только сеть политик (рис. 4, *з*), которая на основе реально измеренных значений поставляла новые значения для управляющих катушек в соответствии с целевыми значениями. Небольшой размер управляющего нейросетевого алгоритма обеспечивал быстрое действие, достаточное для контроля в реальном времени, хотя время обучения такой модели имело порядок дней.

Работа [36] продемонстрировала большие перспективы использования обучения с подкреплением для решения задач УТС. Впоследствии были опубликованы различные статьи, в которых был использован и получил дальнейшее развитие подход «актёр—критик» для управления различными параметрами в задачах УТС. Непосредственным развитием работы [36] стала статья [38], в которой авторы предложили некоторые важные улучшения к предшествующей модели RL. В частности, в [38] обсуждаются вопросы формирования функции награды для агента, формирования эпизодов и переноса обучения. Предложенные улучшения позволили снизить величину ошибки между полученными и целевыми значениями положения крайней магнитной поверхности плазмы на 65%, а также позволили уменьшить в 3 раза время обучения модели RL для работы с новыми задачами.

Метод «актёр—критик» использовался и на других экспериментальных установках. В [39] также решают задачу управления током и границей плазмы с помощью токов в управляющих катушках в токамаке WEST с помощью метода обучения с подкреплением «актёр—критик».

Методы машинного обучения с подкреплением использовались и для предотвращения неустойчивостей. Например, в [40] предложено использовать свёрточную нейросеть, определяющую вероятность развития тиринг-неустойчивости, в качестве модели динамики в алгоритме обучения с подкреплением и полносвязную нейросеть в качестве агента. Предложенная модель обучения с подкреплением была использо-

Используемая модель обучалась при помощи алгоритма максимальной апостериорной оптимизации [37], который принадлежит к семейству алгоритмов «актёр—критик»: сеть политик (актёр) представляет собой полносвязную сеть с двумя скрытыми слоями (рис. 4, *в*), принимающую на вход результаты измерений и целевые значения и возвращающую новые значения напряжения в управляющих катушках в качестве действия, критик же представлен сложной рекуррентной нейронной сетью. Обучение сети проводится с помощью искусственной среды (рис. 4, *б*), в которую включён алгоритм решения уравнения ГШ, результаты работы которого и являются изменёнными состояниями среды. Соответственно среда возвращает наблюдаемые величины и награду

вана для контроля устойчивости тиринг-моды 2/1 по величине нормализованного бета. Контроль осуществлялся с помощью изменения мощности NBI-нагрева (нагрева пучком нейтралов) и изменения треугольности плазмы. По словам авторов, в рамках разработанной модели вероятность срыва была ниже заданного ими уровня даже при низких граничных значениях коэффициента запаса устойчивости ( $q_{95} \sim 3$ ).

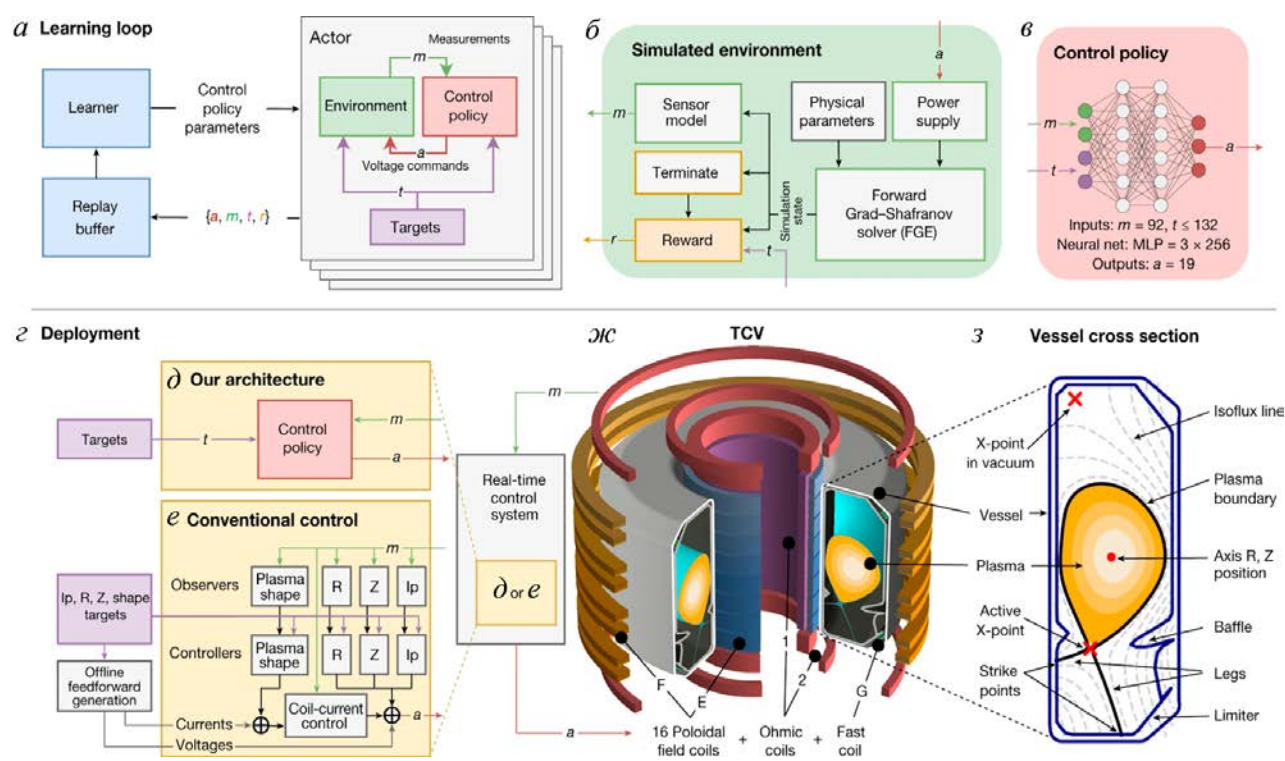


Рис. 4. Цикл обучения агента машинного обучения с подкреплением ( $a, m, t, r$ ) (действие, измеренные значения, целевые значения, награда) ( $a$ ); схема устройства среды для проведения вычислительных экспериментов ( $b$ ); схема нейронной сети по вычислению политики ( $b$ ); взаимодействие алгоритмов управления с аппаратной частью токамака в реальном времени ( $e$ ); схема работы алгоритма машинного обучения с подкреплением с аппаратной частью токамака ( $d$ ); схема работы алгоритма конвенционального управления с аппаратной частью токамака ( $e$ ); схема токамака TCV ( $ж$ ); сечение камеры токамака TCV ( $з$ ) [36]

Стоит отметить, что в машинном обучении с подкреплением, помимо онлайн обучения, когда новые состояния генерируются только согласно с действиями агента, существует и офлайн подход, когда обучение агента проводится с помощью набора данных, полученного заранее. Пример офлайн обучения с подкреплением в приложении к УТС представлен в [41], где в качестве данных для обучения были использованы данные разрядов с токамака DIII-D за последние 18 лет. Предложенная модель управляла мощностью и моментом NBI-нагрева с целью контроля  $\beta_N$  и дифференциального вращения (разницы между угловыми скоростями различных поверхностей плазменного шнура). Данная модель была обучена с помощью алгоритма оптимизации проксимальной политики (proximal policy optimization, PPO), который принадлежит к семейству алгоритмов «актёр—критик». Архитектуры моделей динамики, а также сетей ценности и политик представлены на рис. 5. Модель динамики была обучена на реальных данных, а сгенерированные ею данные разрядов были использованы для обучения управляющей модели. В рамках решения этой задачи данный подход показал свою эффективность в некоторых случаях для прямого управления, но для управления с обратной связью предложенная модель обучения с подкреплением показала более низкую эффективность.

Ещё одним примером применения машинного обучения с подкреплением в УТС является двухступенчатый нейросетевой метод, описанный в [42]. В данной статье авторы приводят описание вы-

числительных экспериментов для токамака JT-60SA по управлению коэффициентом запаса устойчивости  $q$  и нормализованной бета с помощью изменения мощностей NBI и высокочастотного нагрева. Первая ступень предложенной модели анализирует данные, полученные с помощью кодов RAPTOR и TOPICS, в частности, профиль коэффициента запаса устойчивости, профиль температуры электронов, мощности нагрева с помощью нейтралов и ВЧ-волн, нормализованную бета, и вычисляет параметр, связанный с величиной внутреннего транспортного барьера (к сожалению, в работе [42] не указано, что представляет собой данный параметр). В зависимости от значения вычисленного параметра на второй ступени выбирается одна из нейросетевых моделей, генерирующих новые значения мощностей для актуаторов. Выбор одной нейросетевой модели из набора снижает неопределённость в данных. Итогом исследования стала модель, одновременно контролирующая параметры  $q$  и  $\beta_N$  для плазмы с внутренним транспортным барьером.

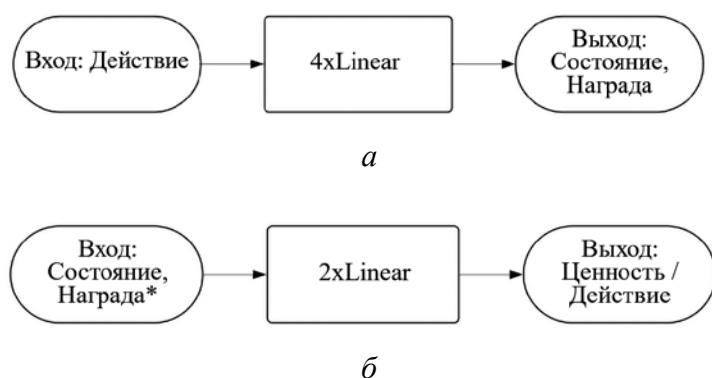


Рис. 5. Блок-схема модели офлайн-обучения с подкреплением, использованной в [41]: *а* — архитектура нейросети, аппроксимирующей изменение состояний (модель динамики); *б* — архитектура нейросети, вычисляющей политику. Такую же архитектуру имеет нейросеть, вычисляющая ценность той или иной политики: Linear — обозначение для полносвязного слоя нейронной сети; \* — награда используется как входной параметр только для сети ценности; / — возможный выходной параметр: ценность состояния для сети ценности или выбранное действие для сети действий

обучения с подкреплением было позволено варьировать мощность пучков нейтральных частиц, ток плазмы и её вытянутость. В результате предложенный в данной статье алгоритм способен снижать ток плазмы во время гашения разряда до значений в 2,5 раза меньше, чем ранее.

Растущая популярность алгоритмов машинного обучения с подкреплением для исследований в области УТС привела к появлению симулятора TORAX [46], написанного на языке python с открытым исходным кодом, что важно, поскольку множество программ, написанных для приложений в УТС, не имеют открытого исходного кода. TORAX моделирует процессы переноса тепла и частиц для ионов и электронов, диффузии тока в плазме в равновесном состоянии. Результаты симуляций с TORAX также хорошо согласуются с результатами вычислительных экспериментов, проведённых с помощью RAPTOR. Максимальное относительное среднеквадратичное отклонение между этими методами составило не более 5%.

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

Перед исследователями, применяющими методы машинного обучения в настоящее время, в том числе и в сфере УТС, встаёт множество проблем, связанных с ними. Наиболее известными и важными можно считать время расчёта эволюции, вычисление неопределённости для предсказаний нейросети, а также качество управления плазмой и интерпретируемость модели.

Статья [43] обсуждает проблему, схожую с приведённой в [44], однако под другим углом и с использованием методов обучения с подкреплением. Авторы статьи предложили избегать срывов плазмы на этапе уменьшения тока плазмы с помощью следующей модели машинного обучения с подкреплением: в качестве функции перехода использовался симулятор RAPTOR, в качестве агента были использованы так называемые нейронные дифференциальные уравнения [45], а также предложили метод ограничения политик для получения траекторий, соответствующих требованиям пользователя. Авторы [44] рассматривают подход с использованием вероятностного машинного обучения и расчёта неопределённости для обеспечения безопасного гашения разряда в токамаке DIII-D. Агенту машинного обучения

В областях, где предсказания моделей должны обновляться в реальном времени, одним из ключевых требований является способность модели проводить вычисления достаточно быстро. Для этого существуют два основных подхода: облегчение модели, т.е. необходимость сделать её меньше и проще, и увеличение вычислительных мощностей за счёт расширения вычислительной инфраструктуры.

Однако, если модель остаётся достаточно глубокой и сложной, неизбежно встанет вопрос её интерпретируемости, вследствие чего придётся довериться ей как «чёрному ящику» без понимания принципов её действия, а значит, и без возможности осознанно её модифицировать.

Кроме того, в исследованиях по УТС высока цена ошибки, поскольку ошибки в расчётах эволюции плазмы или управлении плазмой могут привести к срыву плазмы и повреждению реактора. Вследствие этого важной чертой модели может стать возможность рассчитывать неопределённость её предсказаний. Обзор работ о расчёте неопределённости представлен в [47].

Отсутствие сред для обучения агентов может быть одной из причин, снижающих темпы развития исследований в этой области, поскольку каждой группе исследователей приходится решать, в сущности, одинаковые проблемы, такие как конструкция функции награды, которая определяет, какой отклик от среды получит агент обучения с подкреплением. Обычно они задаются исследователями. Кроме того, имеет место и проблема отложенных последствий: агент может не знать, какое из прошлых действий привело к тому или иному исходу. Поскольку область УТС является относительно новой для приложения алгоритмов обучения с подкреплением, то подобные проблемы могут стать предметом дискуссии в будущих исследованиях.

Проблема управления в условиях неопределённости также является важной для алгоритмов управления в приложениях к УТС. Поскольку в плазменном шнуре могут происходить случайные возмущения, то используемая модель обязана их подавлять до того момента, пока изменения не стали необратимыми.

Методы машинного обучения неразрывно связаны с данными, и чем больше объём обучающей выборки, тем большей обобщающей способностью будет обладать модель и тем меньше будет неопределённость её предсказаний. В случае с обучением с подкреплением для эффективного обучения агента взаимодействию со средой тоже требуется немало данных. Однако получение данных иногда может быть чрезвычайно трудоёмким, например, в области УТС для обучения модели машинного обучения необходимо иметь результаты большого числа разрядов, что энергетически и финансово затратно. Поэтому имеет смысл задача об упрощении получения данных для обучения моделей в приложениях к УТС. Уже существуют самые разные симуляторы токамаков, однако с недавнего времени в литературе начали появляться сведения о нейросетевых подходах к данной проблеме. В частности, в статье [48] предложено искусственно создавать данные разрядов с помощью генеративно-состязательных нейросетей. Кроме того, существует множество статей, описывающих нейросетевые архитектуры для генерации временных рядов, обзор которых приведён в [49]. Использование генеративных методов искусственного интеллекта для аугментации наборов данных для алгоритмов машинного обучения является перспективным направлением исследований.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье был проведён обзор применения методов машинного обучения в задачах УТС по расчёту равновесия плазмы и его эволюции, а также в задачах управления плазмой.

Рассмотрены различные методы определения равновесных состояний плазмы и предсказания их эволюции, в которых используется широкий спектр архитектур — от достаточно простых полносвязных нейронных сетей до рекуррентных сетей, трансформеров, генеративных моделей.

Кроме того, представлены различные методы решения задачи управления плазмой с помощью методов обучения с подкреплением. В частности, множество методов опираются на алгоритм «актёр—критик», в том числе и ряд моделей с офлайн-обучением.

Таким образом, исследование возможностей применения алгоритмов машинного обучения в УТС имеет множество проблем и направлений, самыми важными из которых являются следующие:

— улучшение предсказаний состояний плазмы с помощью моделей машинного обучения;  
 — разработка новых и модификация существующих алгоритмов управления плазмой, в том числе и алгоритмов машинного обучения с подкреплением;  
 — синтез данных разрядов с помощью генеративных нейросетей для аугментации обучающих наборов.

Подводя итог, можно с уверенностью сказать, что исследования в области применения методов машинного обучения в УТС имеют большие перспективы.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Shafiee S., Topal E.** When will fossil fuel reserves be diminished? — *Energy Policy*, 2009, vol. 36, № 1, p. 181—189.
2. **Ariola M. et al.** *Magnetic control of tokamak plasmas.* — London: Springer, 2008. 187 p.
3. **Li Z. et al.** A survey of convolutional neural networks: analysis, applications, and prospects. — *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, 2021, vol. 33, № 12, p. 6999—7019.
4. **Wroblewski D., Jahns G.L., Leuer J.A.** Tokamak disruption alarm based on a neural network model of the high-beta limit. — *Nuclear Fusion*, 1997, vol. 37, № 6, p. 725—741.
5. **Rozenblatt F.** *Principles of neurodynamics: perceptrons and the theory of brain mechanisms.* — М.: Mir, 1965, p. 41—88.
6. **Cybenko G.** Approximation by superpositions of a sigmoidal function. — *Mathematics of Control, Signals and Systems*, 1989, vol. 2, № 4, p. 303—314.
7. **Seiwald B. et al.** Optimization of energy confinement in the  $1/v$  regime for stellarators. — *J. of Computational Physics*, 2008, vol. 227, № 12, p. 6165—6183.
8. **Lao L.L. et al.** Reconstruction of current profile parameters and plasma shapes in. — *Nuclear Fusion*, 1985, vol. 25, № 11, p. 1611—1622.
9. **Lütjens H., Bondeson A., Sauter O.** The CHEASE code for toroidal MHD equilibria. — *Computer Physics Communications*, 1996, vol. 97, № 3, p. 219—260.
10. **Felici F. PhD.** Real-time control of tokamak plasmas: from control of physics to physics-based control. — EPFL, 2011. 293 p.
11. **Honda M.** Simulation technique of free-boundary equilibrium evolution in plasma ramp-up phase. — *Computer Physics Communications*, 2010, vol. 181, № 9, p. 1490—1500.
12. **Joung S. et al.** Deep neural network Grad—Shafranov solver constrained with measured magnetic signals. — *Nuclear Fusion*, 2019, vol. 60, № 1, p. 016034.
13. **Loshchilov I., Hutter F.** Decoupled Weight Decay Regularization. arXiv Preprint arXiv:1711.05101, 2019. 19 p.
14. **Joung S. et al.** GS-DeepNet: mastering tokamak plasma equilibria with deep neural networks and the Grad—Shafranov equation. — *Scientific Reports*, 2023, vol. 13, № 1, p. 15799.
15. **Zheng G. et al.** Real-time Equilibrium Reconstruction by Neural Network Based on HL-3 Tokamak. arXiv Preprint arXiv:2405.11221, 2024. 13 p.
16. **Poels Y. et al.** Fast dynamic 1D simulation of divertor plasmas with neural PDE surrogates. — *Nuclear Fusion*, 2023, vol. 63, № 12, 126012 (29 p.).
17. **Rossi R. et al.** On the potential of physics-informed neural networks to solve inverse problems in tokamaks. — *Nuclear Fusion*, 2023, vol. 63, № 12, 126059 (29 p.).
18. **Solov'ev L.S.** The theory of hydromagnetic stability of toroidal plasma configurations. — *Soviet J. of Experimental and Theoretical Physics*, 1968, vol. 26, № 2, p. 400—407.
19. **Holt G.K. et al.** Tokamak divertor plasma emulation with machine learning. — *Nuclear Fusion*, 2024, vol. 4, № 2, 086009 (15 p.).
20. **Dudson B. et al.** Hermes-3: Multi-component plasma simulations with BOUT++. — *Computer Physics Communications*, 2024, vol. 296, 108991 (44 p.).
21. **Fu X., Yang B., Wang S.** Modeling and control of plasma horizontal displacement for HL-2A tokamak based on LSTM. — *Fusion Engineering and Design*, 2021, vol. 162, p. 112107.
22. **Spangher L. et al.** Autoregressive Transformers for Disruption Prediction in Nuclear Fusion Plasmas. arXiv Preprint arXiv:2401.00051. 2023. 7 p.

23. **Radford A. et al.** Language models are unsupervised multitask learners. — OpenAI blog, 2019, vol. 1, № 8, p. 9.
24. **Wan C. et al.** A machine-learning-based tool for last closed-flux surface reconstruction on tokamaks. — Nuclear Fusion, 2023, vol. 63, № 5, 056019 (14 p.).
25. **Wan C. et al.** Predict the last closed-flux surface evolution without physical simulation. — Nuclear Fusion, 2024, vol. 64, № 2, 026014 (9 p.).
26. **Shousha R. et al.** Machine learning-based real-time kinetic profile reconstruction in DIII-D. — Nuclear Fusion, 2023, vol. 64, № 2, 026006 (19 p.).
27. **Meneghini O. et al.** Integrated modeling applications for tokamak experiments with OMFIT. — Nuclear Fusion, 2015, vol. 55, № 8, 083008 (25 p.).
28. **Xing Z.A. et al.** CAKE: consistent automatic kinetic equilibrium reconstruction. — Fusion Engineering and Design, 2021, vol. 163, 112163 (40 p.).
29. **Kwak S. et al.** Bayesian inference of axisymmetric plasma equilibrium. — Nuclear Fusion, 2022, vol. 62, № 12, 126069 (21 p.).
30. **Prokhorov A.A. et al.** The plasma shape control system in the tokamak with the artificial neural network as a plasma equilibrium reconstruction algorithm. — IFAC-PapersOnLine, 2020, vol. 53, № 2, p. 857—862.
31. **Mitriushkin Y.V. et al.** New identification approach and methods for plasma equilibrium reconstruction in D-shaped tokamaks. — Mathematics, 2021, vol. 10, № 1, 40 (23 p.).
32. **Кореньев П.С. и др.** Усовершенствованный алгоритм FCDI для восстановления равновесия плазмы в токамаке. — Письма в журнал технической физики, 2023, т. 49, № 7, с. 36—39.
33. **Kim S.K. et al.** Highest fusion performance without harmful edge energy bursts in tokamak. — Nature Communications, 2024, vol. 15, № 1, 3990 (11 p.).
34. **Sutton R.S., Barto A.G.** Reinforcement Learning: an Introduction. — Cambridge, Massachusetts, MIT Press, 2005. 398 p.
35. **Grondman I. et al.** A survey of actor-critic reinforcement learning: Standard and natural policy gradients. — IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, part C (applications and reviews), 2012, vol. 42, № 6, p. 1291—1307.
36. **Degrave J. et al.** Magnetic control of tokamak plasmas through deep reinforcement learning. — Nature, 2022, vol. 602, № 7897, p. 414—419.
37. **Abdolmaleki A. et al.** Maximum a posteriori policy optimisation. arXiv Preprint arXiv:1806.06920, 2018. 23 p.
38. **Tracey B.D. et al.** Towards Practical Reinforcement Learning for Tokamak Magnetic Control. arXiv Preprint arXiv:2307.11546, 2023. 27 p.
39. **Kerboua-Benlarbi S. et al.** Magnetic control of WEST plasmas through deep reinforcement learning. — IEEE Transactions on Plasma Science, 2024, vol. 52, № 9, p. 3698—3703.
40. **Seo J. et al.** Avoiding fusion plasma tearing instability with deep reinforcement learning. — Nature, 2024, vol. 626, № 8000, p. 746—751.
41. **Char I. et al.** Offline model-based reinforcement learning for tokamak control. — Learning for Dynamics and Control Conference, PMLR, 2023, vol. 211, p. 1—16.
42. **Wakatsuki T. et al.** Simultaneous control of safety factor profile and normalized beta for JT-60SA using reinforcement learning. — Nuclear Fusion, 2023, vol. 63, № 7, 076017 (14 p.).
43. **Wang A.M. et al.** Active Disruption Avoidance and Trajectory Design for Tokamak Ramp-downs with Neural Differential Equations and Reinforcement Learning. arXiv Preprint arXiv:2402.09387, 2024. 17 p.
44. **Mehta V. et al.** Automated experimental design of safe rampdowns via probabilistic machine learning. — Nuclear Fusion, 2024, vol. 64, № 4, 046014 (13 p.).
45. **Kidger P. PhD.** On Neural Differential Equations. — University of Oxford, 2021. 231 p.
46. **Citrin J. et al.** TORAX: A Fast and Differentiable Tokamak Transport Simulator in JAX. arXiv Preprint arXiv:2406.06718, 2024. 16 p.
47. **Abdar M. et al.** A review of uncertainty quantification in deep learning: techniques, applications and challenges. — Information Fusion, 2021, vol. 76, p. 243—297.
48. **Dave B. et al.** Synthetic data generation using generative adversarial network for tokamak plasma current quench experiments. — Contributions to Plasma Physics, 2023, vol. 63, № 5—6, e202200051.
49. **Lin L. et al.** Diffusion models for time-series applications: a survey. — Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering, 2024, vol. 25, № 1, p. 19—41.

**МГУ имени М.В. Ломоносова,  
119991, ГСП-1 Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 52, 2-й учебный корпус, факультет ВМК, Россия**



Егор Иванович Четкин, аспирант третьего года кафедры автоматизации научных исследований  
yegor-100@mail.ru



Алексей Геннадиевич Шишкин, профессор кафедры автоматизации научных исследований, д.ф.-м.н.  
shishkin@cs.msu.ru

Статья поступила в редакцию 21 января 2025 г.

После доработки 17 апреля 2025 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 5—18.



ИТЭР



УДК 621.039.634

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРЕДЕЛЬНО ДОПУСТИМЫХ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПАЙКЕ ВОЛЬФРАМ-МЕДНЫХ ОБЛИЦОВОЧНЫХ ПЛИТОК ОБРАЩЁННЫХ К ПЛАЗМЕ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕНТРАЛЬНОЙ СБОРКИ ДИВЕРТОРА ТОКАМАКА ИТЭР

*А.А. Рыбиков<sup>1</sup>, Н.А. Кузнецов<sup>1</sup>, Н.В. Литуновский<sup>1</sup>, А.Н. Маханьков<sup>1</sup>, П.Ю. Пискарев<sup>1</sup>, А.В. Еремкин<sup>1</sup>,  
И.П. Богданов<sup>1</sup>, В.Е. Кузнецов<sup>1</sup>, А.В. Володин<sup>1</sup>, Н.И. Архипов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

<sup>2</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

Дивертор является самым энергонапряжённым компонентом термоядерного реактора. Его обращённые к плазме элементы (ОПЭ) подвергаются экстремальным тепловым, ионным и нейтронным нагрузкам. Эти элементы являются технически сложными и весьма дорогостоящими в изготовлении конструкциями. Поэтому, когда в процессе их массового производства возникают определённые дефекты, важно определить, подлежит ли такой элемент отбраковке, или же выявленный дефект не является критичным и не повлияет на его работоспособность при специфицированных условиях их эксплуатации в реакторе. В данной статье представлено экспериментальное исследование влияния дефектов пайки вольфрамовых облицовочных плиток к водоохлаждаемым теплоотводам ОПЭ центральной сборки дивертора (ЦСД) Международного экспериментального термоядерного реактора ИТЭР на работоспособность данных элементов. Рассмотрены варианты дефектов зоны соединения вольфрамовой облицовки с бронзовой подложкой ОПЭ различной формы, размера и локализации. Определены допустимые размеры таких дефектов, при которых ОПЭ успешно проходит приёмочные испытания и может быть использован в реакторе.

**Ключевые слова:** центральная сборка дивертора, обращённый к плазме элемент, вольфрам, дефект пайки, термодинамические испытания, горячее пятно, картирование.

## DETERMINATION OF MAXIMUM PERMISSIBLE DEFECT DURING BRAZING OF TUNGSTEN-COPPER ARMOUR TILES FOR ITER DIVERTOR DOME PLASMA-FACING UNITS

*A.A. Rybikov<sup>1</sup>, N.A. Kuznetsov<sup>1</sup>, N.V. Litunovsky<sup>1</sup>, A.N. Makhankov<sup>1</sup>, P.Yu. Piskarev<sup>1</sup>, A.V. Eremkin<sup>1</sup>,  
I.P. Bogdanov<sup>1</sup>, V.E. Kuznetsov<sup>1</sup>, A.V. Volodin<sup>1</sup>, N.I. Arkhipov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>JSC «NIEFA» (Efremov Institute), St. Petersburg, Russia

<sup>2</sup>Institution "Project Center ITER", Moscow, Russia

The Divertor is the most heat-loaded component of a fusion reactor. Its Plasma Facing Units (PFU) are subjected to extreme thermal, ion and neutron loads. These elements are technically complex and very expensive to manufacture. Therefore, when certain defects occur during series production of the PFUs, it is important to determine whether such unit is to be rejected or whether the detected defect is not critical and will not affect the PFU performance under the specified conditions of its operation in the reactor. This paper presents an experimental study of the influence of the brazing defects of tungsten armour tiles to the water-cooled heat sinks of the Divertor Dome (DD) PFUs for the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER) on the performance of these units. The defects of different shape, size and localization are considered in the interface between the tungsten armour and bronze substrate of the PFU. The permissible sizes of such defects are specified at which the PFU successfully passes acceptance tests and can be used in the reactor.

**Key words:** divertor dome, plasma facing unit, tungsten, brazing defect, thermal cycling test, hot spot, mapping.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в качестве материала защитной облицовки обращённых к плазме элементов (ОПЭ) центральной сборки дивертора (ЦСД) термоядерного реактора ИТЭР используется вольфрам [1, 2]. Выбор данного материала обоснован его жаропрочностью и низким уровнем ионной

эрозии в условиях взаимодействия с плазмой. В частности, облицовка ОПЭ ЦСД ИТЭР выполняется прямоугольными вольфрамовыми плитками толщиной 8 мм и размером в плане 23,9×(20,9—25,2) мм.

Однако непосредственное присоединение вольфрамовых плиток к водоохлаждаемой подложке, изготавливаемой из хромциркониевой бронзы (CuCrZr), невозможно в силу трёхкратного различия коэффициентов теплового расширения этих материалов. Такое непосредственное соединение неминуемо привело бы к возникновению в зоне соединения огромных термомеханических напряжений, которые в силу циклического характера работы термоядерного реактора также будут циклическими, приводя к малоцикловой усталости конструкции. Эти напряжения, помимо разрушительного влияния на бронзовую подложку, достаточно быстро привели бы к отслоению защищающих её вольфрамовых плиток.

Поэтому для уменьшения термомеханических напряжений и повышения надёжности соединения на вольфрамовые облицовочные плитки предварительно наносится слой мягкой бескислородной меди толщиной 2 мм [3]. Слой меди позволяет эффективно снизить напряжения, возникающие в зоне присоединения облицовочных плиток к подложке, многократно увеличить срок службы ОПЭ в условиях высоких термомеханических нагрузок.

Присоединение подслоя меди к вольфрамовым плиткам осуществляется способом вакуумной наплавки. Такое соединение обладает высокой прочностью и надёжностью при воздействии на него высоких термомеханических нагрузок. Дефекты сплошности этого соединения встречаются крайне редко, и выявление дефектов в этом соединении приводит лишь к отбраковке отдельных плиток. Кроме этого, отбракованные плитки могут быть отремонтированы повторной наплавкой медного подслоя.

В свою очередь, присоединение вольфрам-медных (W/Cu) плиток к бронзовой подложке ОПЭ ЦСД осуществляется высокотемпературной вакуумной пайкой твёрдым припоем [7] на медной основе марки СТЕМЕТ®-1108 [4]. В данной статье рассматривается влияние дефектов, возникающих именно при пайке этого соединения.

Необходимость выполнения исследований с целью определения реального допустимого размера дефектов паяного соединения облицовки ОПЭ ЦСД была обусловлена тем, что:

— пайка облицовки является последним этапом изготовления ОПЭ. Как было сказано ранее, ОПЭ ЦСД ИТЭР — высокотехнологичное и дорогостоящее изделие, и его отбраковка на конечном этапе производства приводит к чувствительным потерям времени и средств. Разработанная технология ремонта дефектов пайки облицовки [5] оказалась достаточно трудоёмкой и не всегда обеспечивала положительные результаты;

— максимальный размер дефекта пайки облицовки, допускаемый по результатам ультразвукового контроля соединения, был изначально установлен на необоснованно низком уровне: не допускалось наличие дефектов с наибольшим линейным размером более 4 мм либо двух и более дефектов любого размера, расположенных на расстоянии 4 мм и менее друг от друга, если общий размер данной группы дефектов превышал 4 мм. Общая площадь дефектов присоединения одной облицовочной плитки ограничивалась 10% от её площади. Поэтому выполненная работа также преследовала цель выработки разумных критериев отбраковки ОПЭ при проведении УЗК паяного соединения.

В результате проведённых исследований был определён размер дефекта пайки облицовочных плиток, при котором поведение таких плиток при ресурсных тепловых циклических испытаниях ОПЭ полностью удовлетворяет параметрам термоциклического поведения облицовки в процессе эксплуатации. Выполнение данной работы позволило скорректировать требования ИТЭР по допустимым размерам дефектов паяного соединения облицовки ОПЭ ЦСД ИТЭР.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ПАЙКИ ОБЛИЦОВКИ И ЕЁ РЕСУРСНЫЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Каждый ОПЭ ЦСД ИТЭР представляет собой многослойную конструкцию, состоящую из различных металлов, соединённых между собой различными металлургическими способами, и включающую в себя канал водяного охлаждения [8]. На рис. 1 схематически представлены поперечное сечение

(а) и участок продольного сечения ОПЭ ЦСД (б). На рисунке показаны вольфрамовые облицовочные плитки 1 толщиной 8 мм с нанесённым на них снизу слоем бескислородной меди 2, бронзовая подложка 3 с присоединённым к ней сваркой взрывом слоем аустенитной нержавеющей стали 316L(N), из которой в процессе механической обработки формируются боковые и торцевые стенки канала охлаждения 4, силовая опорная конструкция 5, также выполненная из стали 316L(N). Канал охлаждения 4 с целью повышения интенсивности теплообмена выполнен по схеме «гипервапотрон».

Облицовка каждого ОПЭ ЦСД в зависимости от его типа содержит от 26 до 58 W/Cu-плиток, которые припаиваются к поверхности тепловода одновременно, т.е. в одном тепловом процессе. Пайка облицовочных плиток выполняется в вакуумных печах сопротивления при температуре 970 °С совместно с термообработкой бронзового тепловода ОПЭ. После выдержки при 970 °С проводится форсированное охлаждение ОПЭ газообразным азотом для закалки бронзы и затем её состаривание при температуре 480 °С. Затвердевание припоя происходит во время форсированного охлаждения ОПЭ, а при состаривании бронзы он остаётся в твёрдом состоянии [6].

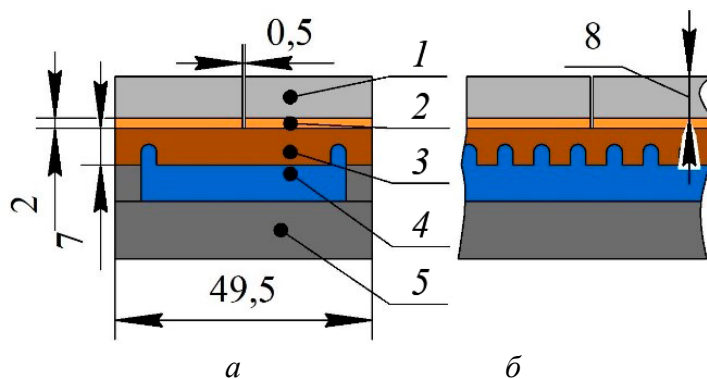


Рис. 1. Поперечное сечение (а) и участок продольного сечения ОПЭ ЦСД ИТЭР (б)

Выбор метода присоединения облицовки высокотемпературной пайкой твёрдым припоем обоснован требованием сохранения механической стабильности паяного соединения вплоть до температуры 800 °С, что обусловлено возможностью возникновения при работе реактора различных аварийных режимов, а также смещений и срывов тока плазмы.

После выполнения пайки облицовки ОПЭ ЦСД ИТЭР проходят различные виды неразрушающего контроля, а затем подвергаются термоциклическим испытаниям сканирующим лучом на электронно-лучевой установке. Эти испытания, помимо ультразвукового контроля, призваны подтвердить надёжность и качество присоединения облицовки.

Термоциклические испытания делятся на ресурсные и проверочные. Наиболее длительными и строгими являются ресурсные термоциклические испытания. Они проводятся только на квалификационных ОПЭ с целью натурной проверки применимости выбранной технологии присоединения облицовки, её общей надёжности, а также ресурса работы облицовки при требуемых тепловых нагрузках. В свою очередь, проверочные термоциклические испытания гораздо менее длительны, и они предназначены только для вскрытия возможных проблем соединения облицовки с подложкой, по каким-то причинам не выявленных при помощи предшествующего ультразвукового контроля.

С целью сокращения времени проведения термоциклических испытаний перед ними несколько готовых ОПЭ объединяются в испытательную сборку из трёх—шести штук.

Ресурсные термоциклические испытания проводятся в следующей последовательности:

- 1) При помощи тепловизора снимается карта степени черноты поверхности облицовки испытуемых ОПЭ. Для этого поверхность ОПЭ без водяного охлаждения равномерно разогревается сканирующим электронным лучом небольшой мощности. Полученная карта черноты поверхности впоследствии используется при термоциклических испытаниях для корректировки получаемых также с помощью тепловизора полей температуры облицовки под тепловой нагрузкой;

- 2) Перед началом термоциклических испытаний проводится первое температурное картирование поверхности облицовки. Включается водяное охлаждение сборки ОПЭ, и поглощённая облицовкой удельная тепловая нагрузка доводится до 5 МВт/м<sup>2</sup>. Затем тепловизором снимается карта распределения температуры по поверхности облицовки. Дополнительно температура поверхности всех плиток последовательно измеряется двухцветным пирометром, показания которого, как известно, не зависят от черноты поверхности объекта;

3) Проводится ресурсное термоциклирование облицовки сборки ОПЭ при поглощённой ею удельной тепловой нагрузке  $5 \text{ МВт/м}^2$ , состоящее из 5000 тепловых циклов длительностью 10 с и с паузой 10 с между ними. При помощи тепловизора осуществляется непрерывный мониторинг распределения температуры поверхности облицовки;

4) После завершения термоциклирования с целью выявления изменений в состоянии облицовки проводится второе картирование температуры её поверхности при поглощённой облицовкой тепловой нагрузке  $5 \text{ МВт/м}^2$ ;

5) Сила тока в электронном пучке увеличивается в 2 раза, и проводится ресурсное термоциклирование облицовки сборки ОПЭ при поглощённой ею удельной тепловой нагрузке  $10 \text{ МВт/м}^2$ , состоящее из 300 тепловых циклов длительностью 2 с и с паузой 8 с между ними. Данные испытания имитируют переходные режимы при формировании плазмы в реакторе;

6) После завершения термоциклирования облицовки при  $10 \text{ МВт/м}^2$  также с целью выявления изменений в её состоянии проводится третье, финальное картирование температуры её поверхности при поглощённой облицовкой удельной тепловой нагрузке  $5 \text{ МВт/м}^2$ .

Прохождение ОПЭ ресурсных термоциклических испытаний признаётся успешным при выполнении следующих критериев:

- не произошло отделение от подложки ни одной плитки облицовки;
- ни в одном температурном картировании поверхности облицовки не было выявлено «горячего пятна», где температура на 30% (в °С) превышает температуру поверхности других плиток;
- максимальная температура поверхности облицовки между первым, вторым и третьим температурным картированием при поглощённой удельной тепловой мощности  $5 \text{ МВт/м}^2$  не возросла более чем на 20% (в °С).

Успешное прохождение ресурсных тепловых испытаний является определяющим для подтверждения выбранной технологии облицовки.

### 3. ЧИСЛЕННАЯ ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ ДЕФЕКТОВ ПАЙКИ ОБЛИЦОВКИ НА ТЕМПЕРАТУРУ ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМОВОЙ ОБЛИЦОВКИ

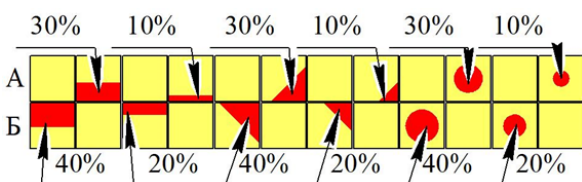


Рис. 2. Схема расположения дефектов пайки под облицовкой ОПЭ ЦСД

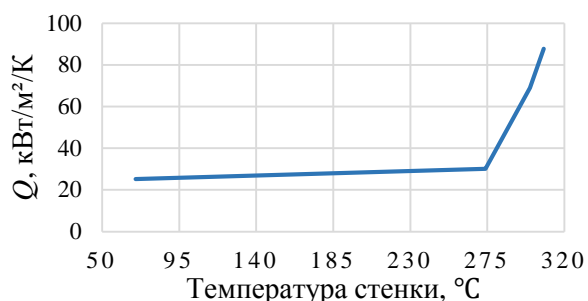


Рис. 3. Зависимость коэффициента теплоотдачи от локальной температуры стенки

Численная оценка влияния дефектов пайки облицовки на температуру её поверхности была выполнена при условиях, соответствующих параметрам температурного картирования поверхности ОПЭ ЦСД при ресурсных термоциклических испытаниях: поглощённая ОПЭ удельная тепловая нагрузка составляет  $5 \text{ МВт/м}^2$ , температура охлаждающей воды на входе в ОПЭ составляет  $70 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление  $3,9 \text{ МПа}$ , скорость потока воды через канал охлаждения  $5 \text{ м/с}$ .

В расчётную модель ОПЭ ЦСД, в зону пайки обоих рядов облицовочных плиток А и Б были внесены дефекты различных форм и положений (рис. 2). Размеры дефектов (цвет красный) варьируются от 10 до 40% площади присоединения W/Cu-плитки к бронзовой подложке. В зоне дефектов была программно исключена контактная теплопроводность и оставлена только возможность лучистого теплообмена.

Расчёт был выполнен методом конечных элементов с учётом зависимости теплофизических свойств материалов ОПЭ от температуры. Условия теплообмена между теплоотводом и охлаждающей его водой определялись зависимостью, представленной на рис. 3.

В результате расчёта было получено поле распределения температуры внутри ОПЭ ЦСД и на поверхности вольфрамовой облицовки при установившемся стационарном режиме охлаждения, когда достигнуто тепловое равновесие между притоком тепла на поверхность облицовки и его отводом охлаждающей ОПЭ водой (рис. 4).

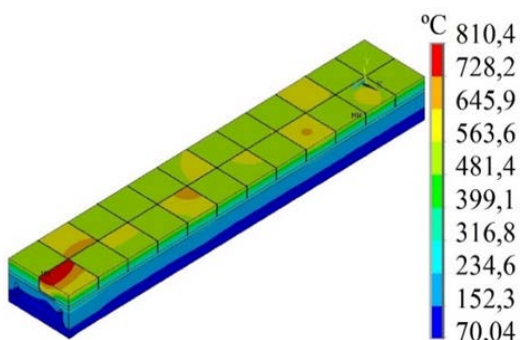


Рис. 4. Распределение температуры в ОПЭ ЦСД под тепловой нагрузкой

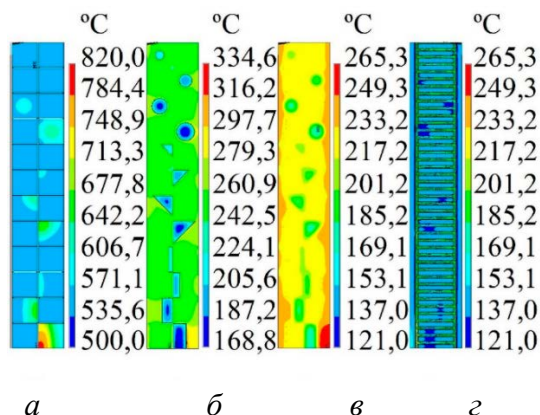


Рис. 5. Распределение температуры по поверхности вольфрамовой облицовки (а), по границе вольфрам—медь (б), по поверхности бронзовой подложки (в), в бронзовой подложке со стороны охлаждающей воды (г)

Распределения температуры по поверхности вольфрамовой облицовки ОПЭ, а также по различным слоям его внутренней структуры представлены на рис. 5.

В табл. 1 приведены максимальные расчётные температуры поверхности плиток вольфрамовой облицовки ОПЭ как при отсутствии под ними каких-либо дефектов паяного соединения ( $T_0 = 546\text{ °C}$ ), так и при наличии дефектов пайки. Перегрев облицовочных плиток в зоне дефектов пайки, согласно приведённым ранее критериям приёмки ОПЭ по результатам ресурсных термоциклических испытаний, определялся по формуле  $\Pi_i = (T_i - T_0)/T_0$ , где  $\Pi_i$  — значение перегрева плитки в процентах,  $T_i$  — максимальная температура поверхности плитки, имеющей дефект пайки,  $T_0$  — усреднённая температура плиток, не имеющих дефектов присоединения к подложке.

Таблица 1. Максимальная температура и значения перегрева поверхности облицовочных плиток

Размер дефекта, %	Круговой дефект		Треугольный дефект		Прямоугольный дефект	
	Температура, °C	Перегрев, %	Температура, °C	Перегрев, %	Температура, °C	Перегрев, %
0	546	0	546	0	546	0
10	557	2,0	565	3,5	550	0,7
20	582	6,6	602	10,3	600	9,9
30	615	12,6	640	17,2	671	22,9
40	655	20,0	677	24,0	787	44,1

В результате проведённого численного анализа единственным дефектом пайки, приводящим к нагреву поверхности облицовочной плитки до температуры на 30% выше, чем температура  $T_0$  бездефектных плиток, является прямоугольный, краевой дефект, составляющий 40% от площади паяного соединения. Такой дефект приводит к перегреву плитки на 44,1% относительно температуры  $T_0$ . Все остальные рассмотренные дефекты паяного соединения приводят к перегреву поверхности плиток не более чем на 24%, и следовательно, ОПЭ с такими дефектами пайки облицовки формально удовлетворяют критериям приёмки ОПЭ по результатам тепловых испытаний.

При этом, безусловно, проведённая расчётная оценка не может служить доказательством фактической допустимости крупных дефектов пайки, потому что в ней не учитывается возможность развития этих дефектов под воздействием циклической тепловой нагрузки при работе ОПЭ в реакторе.

#### 4. СОЗДАНИЕ ИСКУССТВЕННЫХ ДЕФЕКТОВ ПАЙКИ ОБЛИЦОВКИ И УЛЬТРАЗВУКОВОЙ КОНТРОЛЬ ИХ ФОРМЫ И РАЗМЕРОВ

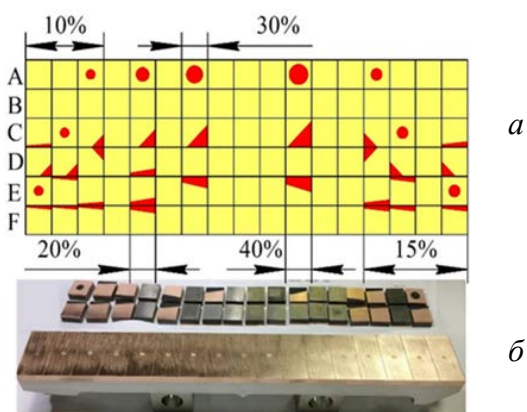


Рис. 6. Карта искусственных дефектов пайки, запланированных для создания в облицовке ОПЭ ЦСД (а), и фотография процесса их внесения (б)

Для создания искусственных дефектов паяного соединения необходимым условием является локальное нарушение адгезии припоя к бронзовой подложке или же медному подслою облицовочных плиток. С этой целью перед пайкой облицовочных плиток на их медный подслоу в определённых местах был нанесён мелкодисперсный графитовый аэрозоль Graphite 33. Так же, как и при численной оценке, в зону соединения облицовки вносились три вида дефектов: круговой, треугольный, трапециевидный (рис. 6). Изменение формы прямоугольных боковых дефектов, используемых в расчётном исследовании, на трапециевидные обуславливается тем, что на практике наблюдается образование именно подобных геометрически неидеальных краевых дефектов. Незапланированный дефект пайки в левом верхнем углу плитки С1 имеет форму, близкую к трапециевидной. Также в данном экспериментальном исследовании дефекты пайки облицовки вносились не в один ОПЭ ЦСД, а сразу в три, что позво-

лило разнообразить варианты их размеров и локализаций этих дефектов. В общей сложности было внесено 37 искусственных дефектов пайки, занимающих от 10 до 40% площади присоединения W/Cu-плитки к бронзовой подложке.

Так как перед проведением ресурсных тепловых испытаний все три ОПЭ ЦСД с искусственными дефектами пайки должны были быть объединены в едином экспериментальном макете, для удобства описания поведения плиток облицовки под тепловой нагрузкой для каждого из шести рядов его облицовки было определено буквенное обозначение А, В, С, D, Е и F.

Как видно из рис. 6, в ряд облицовки В дефекты не вносились, чтобы использовать его в качестве референсного, чтобы от температуры поверхности облицовки в этом ряду отсчитывать уровень перегрева плиток с дефектами. Также дефекты не вносились в три средних колонки ОПЭ, так как впоследствии при термоциклических испытаниях макета эта зона будет перекрываться разделительной водоохлаждаемой диафрагмой для её разделения на две равные зоны облучения.

После нанесения деадгезатора на облицовочные плитки в местах внесения дефектов была выполнена пайка облицовки всех трёх ОПЭ. Пайка выполнялась в вакуумной электропечи сопротивления с использованием жаропрочной оснастки [9], стандартно используемой для пайки облицовки ОПЭ ЦСД. Для контроля температуры ОПЭ во время пайки в каждый из них устанавливались по две термопары. Тепловой процесс пайки облицовки, совмещённый с термообработкой бронзы, из-за своей достаточно большой общей длительности был разбит на два этапа (рис. 7) — собственно пайка и старение.

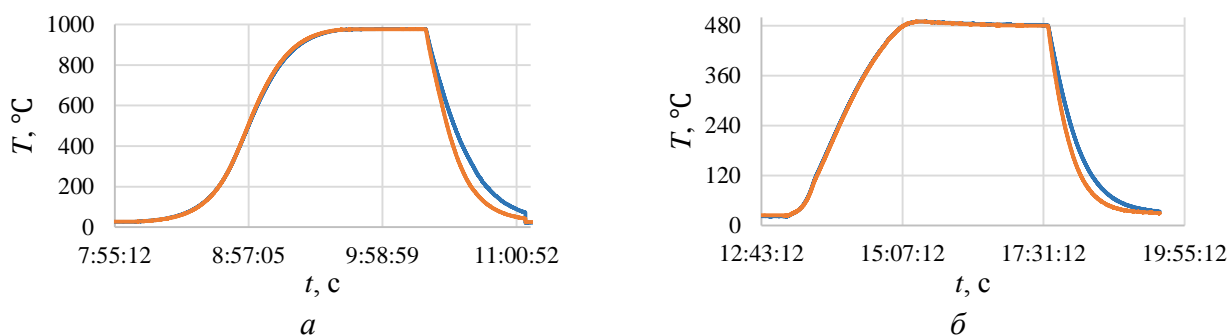


Рис. 7. Этапы пайки облицовки совместно с термообработкой бронзы ОПЭ: а — тепловой цикл пайки облицовки и закалки бронзы; б — тепловой цикл старения бронзы с целью восстановления его механических свойств

После выполнения пайки облицовки был проведён ультразвуковой контроль сплошности паяного соединения с целью выявления фактической формы и размеров внесённых искусственных дефектов.

Анализ УЗК-дефектограмм выявил, что фактический размер большинства внесённых дефектов получился несколько больше, чем было запланировано. Кроме этого, было выявлено несколько незапланированных дефектов (см. рис. 8, синий цвет), занимающих от менее 0,1 до 7,6% площади пайки соответствующих облицовочных плиток. УЗК-дефектограмма паяного соединения облицовки всех трёх ОПЭ ЦСД с размерами всех обнаруженных дефектов (в % от площади пайки конкретной плитки) приведена на рис. 8.

Затем перед проведением ресурсных термоциклических испытаний ОПЭ ЦСД были смонтированы на общем водяном коллекторе (рис. 9)

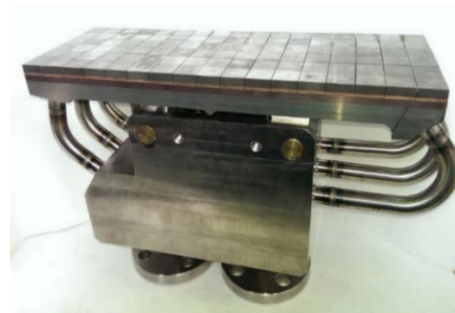
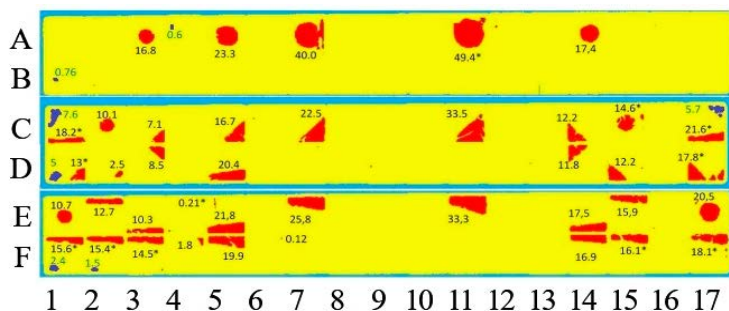


Рис. 8 Комбинированная УЗ-дефектограмма зоны пайки облицовки трёх ОПЭ ЦСД

Рис. 9. ОПЭ ЦСД, смонтированные на общем водяном коллекторе

## 5. РЕСУРСНЫЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИЕ ИСПЫТАНИЯ

Ресурсные термоциклические испытания ОПЭ были проведены на стенде IDTF (ITER Divertor Test Facility) [10], расположенном в АО «НИИЭФА». Этот стенд является электронно-лучевым комплексом, созданным для проведения термоциклических испытаний компонентов дивертора ИТЭР, поставляемых не только Россией, но и другими участниками проекта. Стенд IDTF (рис. 10, а) состоит из испытательной вакуумной камеры с системой откачки, электронно-лучевой системы с максимальной мощностью 800 кВт, контуров охлаждения мишени и других вспомогательных систем, оборудования для сбора экспериментальных данных. Тепловая, в том числе циклическая, нагрузка на испытуемые объекты осуществляется наложением на их поверхность раstra сканируемого электронного луча с удельной мощностью до 2 ГВт/м<sup>2</sup>.

Макет с тремя ОПЭ ЦСД с искусственными дефектами пайки был установлен на мишенном устройстве IDTF и подключён к контуру водяного охлаждения мишени. После этого при помощи тепловизора была снята карта черноты поверхности облицовки макета. Для снятия карты макет был равномерно подогрет охлаждающей водой до 70 °С без приложения поверхностной тепловой нагрузки. Как было сказано, снятие карты черноты поверхности облицовочных плиток позволяет корректировать показания тепловизора в течение термоциклических испытаний. После этого поверхность облицовки макета была окружена четырьмя медными водоохлаждаемыми масками (диафрагмами), защищающими мишенное устройство от попадания боковых частей раstra электронного пучка. Пятая водоохлаждаемая маска шириной 38 мм была установлена поперечно над серединой поверхности макета для её разделения на две равные зоны облучения А и Б (рис. 10, б).

Ресурсные термоциклические испытания из 5000 циклов при поглощённой облицовкой удельной тепловой нагрузке ( $q_{abs}$ ), равной 5 МВт/м<sup>2</sup>, проводились в режиме перемещения раstra электронного пучка между зонами облицовки макета А и Б. На каждой из зон растр пучка находился по 10 с, и таким образом режим циклического теплового нагружения каждой из зон включал в себя 10 с нагрузки и 10 с паузы между тепловыми циклами. Последующее термоциклирование в составе 300

тепловых циклов при  $q_{abs.} = 10 \text{ МВт/м}^2$  с длительностью цикла нагружения поверхности макета 2 с и паузой между циклами 8 с проводилось последовательным нагружением зон А и Б с выключением электронного пучка между циклами.

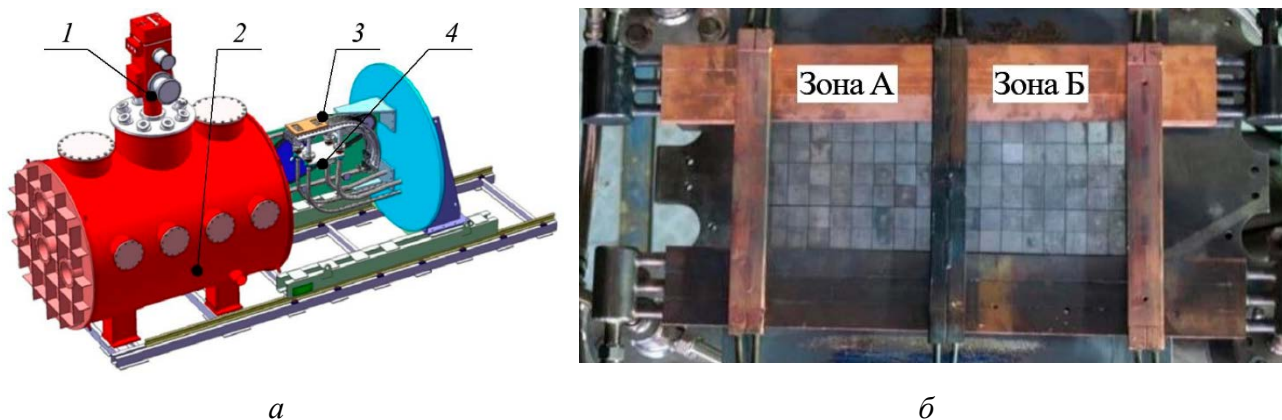


Рис. 10. Установка IDTF: *а* — модель IDTF: 1 — электронно-лучевая пушка, 2 — вакуумная камера, 3 — тестируемый компонент, 4 — мишенное устройство; *б* — макет на мишенном устройстве установки IDTF

Тепловая мощность, создаваемая сканирующим электронным пучком, настраивалась предварительно перед каждым этапом термоциклических испытаний. Поглощённая зоной теплового нагружения удельная тепловая мощность  $q_{abs}$  измерялась способом водной калориметрии и рассчитывалась по формуле  $q_{abs} = P_{abs}/S = Qc\Delta T/S \text{ [Вт/м}^2]$ , где  $Q$  — массовый расход охлаждающей воды,  $c$  — удельная теплоёмкость воды,  $\Delta T = T_2 - T_1 \text{ [}^\circ\text{C]}$ , где  $T_2$  — температура охлаждающей воды на выходе из макета,  $T_1$  — её температура на входе в макет,  $S$  — площадь зоны теплового нагружения. Параметры охлаждающей воды и вычисление удельной поглощённой мощности регистрировались непрерывно в течение всех испытаний.

Параметры охлаждающей макет воды в течение ресурсных термоциклических испытаний поддерживались следующими: расход воды через макет 4,35 кг/с, температура на входе в макет  $70 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , давление  $40 \pm 0,5 \text{ бар}$ .

Перед началом термоциклических испытаний было выполнено начальное картирование температуры облицовки. Для выполнения этой операции зоны облицовки А и Б были последовательно нагружены тепловым потоком с  $q_{abs} = 5 \text{ МВт/м}^2$  в течение нескольких десятков секунд, и при стабилизации температуры облицовки было выполнено тепловизионное фотографирование поверхности этих зон с последующим вычислением средней температуры поверхности каждой облицовочной плитки. Распределение средней температуры поверхности плиток при начальном картировании представлено на рис. 11. Для удобства зрительного восприятия значения температуры вдоль каждого ряда плиток объединены в отдельные кривые.

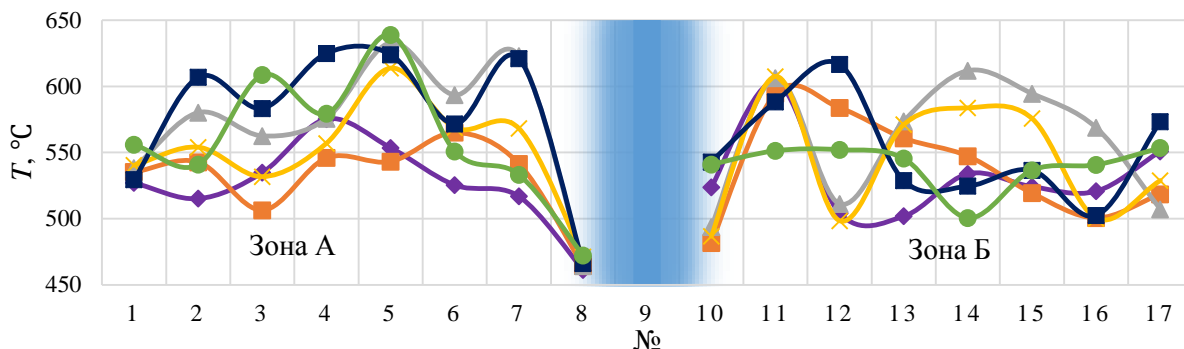


Рис. 11. Средняя температура поверхности плиток ОПЭ вдоль рядов при начальном картировании,  $q_{abs} = 5 \text{ МВт/м}^2$ : — маска, А (◆), В (■), С (▲), D (×), E (■), F (●)

Затем после выполнения термоциклирования поверхности облицовки макета 5000 импульсов с поглощённой его облицовкой удельной тепловой мощностью  $q_{abs} = 5 \text{ МВт/м}^2$  было выполнено промежуточное температурное (рис. 12) картирование поверхности испытательного макета. Картирование проводилось также при  $q_{abs} = 5 \text{ МВт/м}^2$ .

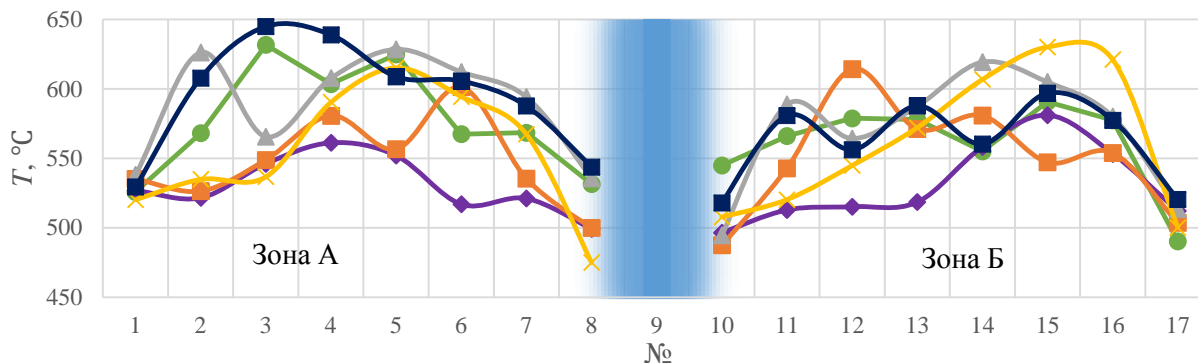


Рис. 12. Средняя температура поверхности плиток ОПЭ вдоль рядов при промежуточном картировании,  $q_{abs} = 5 \text{ МВт/м}^2$ : — маска, А (◆), В (■), С (▲), D (×), E (■), F (●)

После завершения термоциклирования макета при  $q_{abs} = 5 \text{ МВт/м}^2$  и промежуточного картирования температуры поверхности его облицовки было выполнено термоциклирование при  $q_{abs} = 10 \text{ МВт/м}^2$  и проведено финальное температурное картирование поверхности облицовки при  $q_{abs} = 5 \text{ МВт/м}^2$ . Результаты финального картирования приведены на рис. 13.

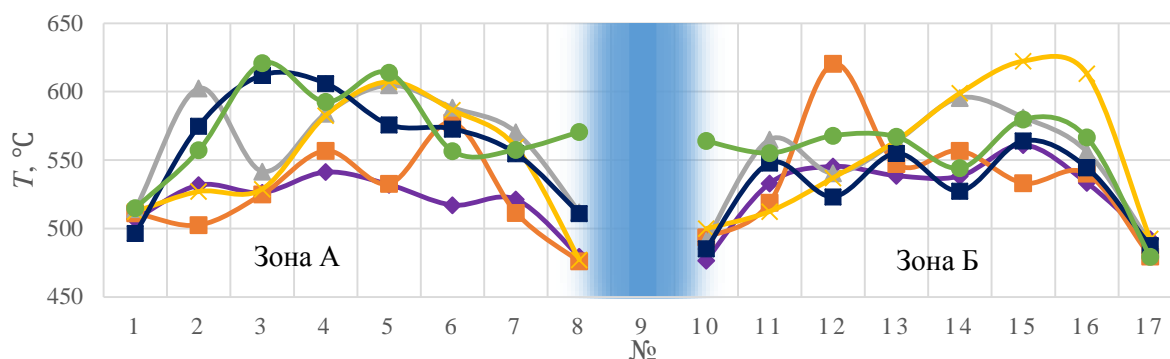


Рис. 13. Средняя температура поверхности плиток ОПЭ вдоль рядов при финальном картировании,  $q_{abs} = 5 \text{ МВт/м}^2$ : — маска, А (◆), В (■), С (▲), D (×), E (■), F (●)

## 6. ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ПАЯНОГО СОЕДИНЕНИЯ ПОСЛЕ ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

После завершения ресурсных термоциклических испытаний с целью выявления изменений размеров и формы внесённых искусственных дефектов был повторно проведён ультразвуковой контроль паяного соединения облицовки макета. УЗ-дефектограмма зоны пайки показана на рис. 14. Как оказалось, термоциклические испытания не привели к сколько-нибудь заметному росту размеров внесённых дефектов. Более того, ультразвуковые отображения некоторых дефектов пайки даже уменьшились, что объясняет снижение температуры поверхности некоторых плиток в процессе испытаний (см., например, ряд с 1-го по 5-й на рис. 11 и 12). Так, самые большие искусственные круговые, треугольные и трапециевидные дефекты уменьшились на 4,41, 25,21 и 44,36% соответственно (см. рис. 14).

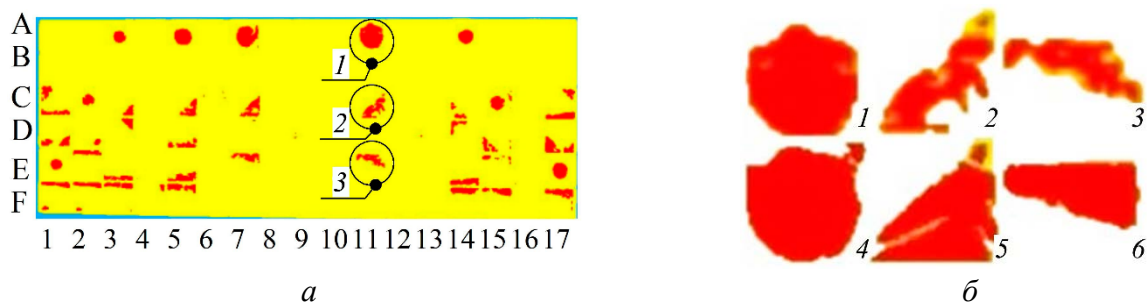


Рис. 14. УЗ-дефектограммы зоны пайки облицовки трёх ОПЭ ЦСД после ресурсных термоциклических испытаний (а) и самые большие искусственные дефекты после испытаний (б): круглый (1), треугольный (2), трапециевидный (3) и они же до испытаний (4, 5, 6)

Затем был проведён разрушающий контроль (РК) наиболее крупных дефектов, находящихся в 11-м поперечном ряду облицовки. Этот ряд облицовочных плиток вместе с бронзовой подложкой был вырезан при помощи электроэрозии, в результате чего было получено три образца, по одному из каждого ОПЭ.

Прежде всего перед детальным исследованием состояния дефектов разрушающим методом на одном из полученных образцов была измерена твёрдость бронзы, которая, согласно техническим требованиям, при 20 °С должна быть не менее 85 НВ, что соответствует предельной прочности материала  $\sigma_b$  примерно 280 МПа. Измеренная твёрдость составила 101 НВ ( $\sigma_b \approx 340$  МПа), что значительно превышает требуемый минимум.

После этого для оценки фактических размеров трёх наибольших дефектов пайки зоны их расположения были рассечены перпендикулярно плоскости пайки на пластины толщиной 2,5 мм (рис. 15).

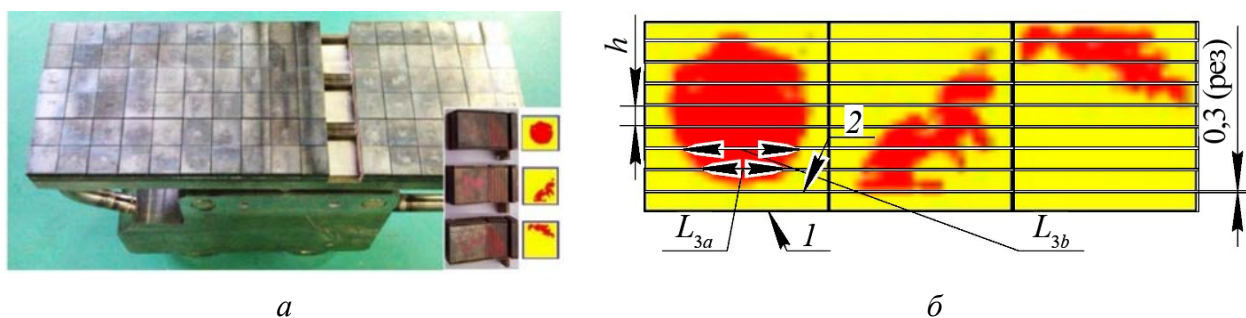


Рис. 15. Вырезание части облицовки с наибольшими дефектами пайки (а) и схема оценки размеров наибольших дефектов: 1 — первое направление, 2 — второе направление (б)

После измерения фактической длины дефекта (видимого раскрытия соединения) в каждом из полученных участков фактические размеры трёх наибольших дефектов были оценены по формуле

$$S_{\text{деф}} = \sum_1^n \left[ \frac{(L_{ia} + L_{ib})h}{2} + \frac{(L_{(i+1)a} + L_{ib})0,3}{2} \right], \quad (1)$$

где  $S_{\text{деф}}$  — площадь дефекта пайки, определяемая методом РК;  $L_{ia}$ ,  $L_{ib}$  — длины разрывов паяного соединения на сторонах  $a$  и  $b$   $i$ -й вырезанной пластины;  $n$  — количество вырезанных пластин, на которых обнаружены раскрытия паяного соединения (хотя бы на одной из сторон);  $h$  — толщина вырезанного участка; 0,3 — ширина реза.

Первым исследовался круглый центральный дефект пайки. Длины и местоположения разрывов соединения Cu и CuCrZr, выявленные в сечениях кругового дефекта под облицовкой, имели отчётливые границы во всех случаях, кроме двух, где наличие разрывов соединения было дополнительно уточнено металлографическими исследованиями (рис. 16). Аналогичным образом исследовались сечения остальных двух наиболее крупных дефектов пайки.

Площади наибольших дефектов пайки, выявленные УЗК до и после ресурсных термоциклических испытаний, а также полученные при РК, представлены в табл. 2.

Также в ходе проведения РК зон расположения наибольших искусственных дефектов была отмечена деформация медного подслоя облицовочных плиток. Причиной этой деформации, очевидно, являются термомеханические напряжения, возникающие при термоциклических испытаниях ОПЭ вследствие перераспределения теплового потока внутри облицовочной плитки из неохлаждаемой зоны (зоны дефекта) в зону с хорошим тепловым контактом меди бронзовой подложкой. Эта деформация была особенно выражена для треугольного и трапециевидного дефектов. Вследствие деформации медного подслоя плиток в зоне дефектов его нижняя поверхность в некоторых местах пайки вплотную примыкала к поверхности бронзового теплоотвода, возможно, даже прижималась к ней, что могло обеспечивать определённый тепловой контакт между ними. Кроме этого, такие сомкнутые участки дефектных зон могли быть преодолимыми для ультразвука в такой степени, что при УЗК-контроле зоны пайки после термоциклических испытаний эти зоны определялись как бездефектные. Именно этим можно объяснить существенную разницу в размерах углового и бокового (частично и центрального) дефектов, измеренных методами УЗК и РК.

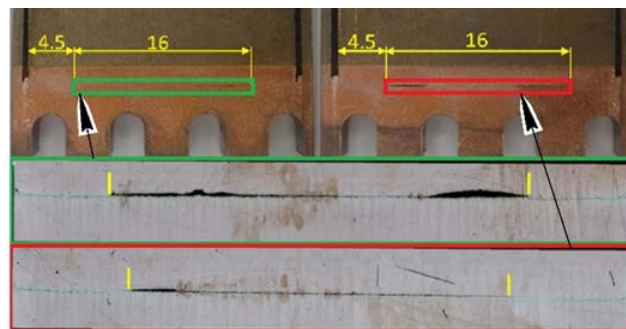


Рис. 16. Разрывы шва между медью и бронзой и металлографическое исследование с круглым дефектом

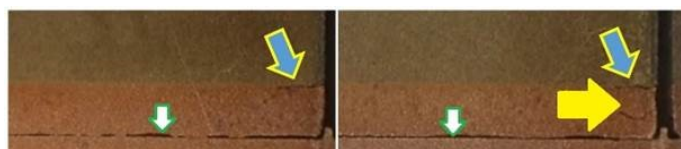
Таблица 2. Площади дефектов по РК и УЗК до и после испытаний

Форма и местоположение дефекта	Планируемая площадь дефекта, мм <sup>2</sup>	Площадь дефекта по УЗК после пайки, мм <sup>2</sup>	Площадь дефекта по УЗК после тепловых испытаний, мм <sup>2</sup>	Площадь дефекта по РК, мм <sup>2</sup>
Круглый центральный	236,13	289,25	276,5	275,8
Треугольный угловой	236,13	178,5	133,5	249,06
Трапециевидный боковой	236,13	195,5	108,75	233,1

Кроме этого, при проведении РК также были обнаружены разрывы как в соединении W—Cu, так и непосредственно в медном подслое облицовочных плиток (рис. 17). Такие разрывы были выявлены над всеми тремя наибольшими дефектами паяного соединения. Наибольшие разрывы, достигавшие максимальной длины 4 мм, были найдены над угловым треугольным дефектом паяного соединения. Наличие разрывов в соединении W—Cu и в самом медном подслое также является следствием значительного возрастания термомеханических напряжений над крупными дефектами пайки во время термоциклических испытаний. Кроме этого, так как УЗК паяного соединения всегда выполняется со стороны поверхности вольфрама, наличие разрывов в соединении W—Cu и в самом медном подслое повлияло на результаты УЗК после испытаний. Так как ультразвук не может преодолеть эти разрывы, то отсутствует и его отражённая волна от расположенного ниже соединения пайки, несущая информацию об имеющихся в нём дефектах. Соответственно при УЗК после испытаний эти области паяного соединения принимались как бездефектные.

Также стоит учесть тот факт, что вследствие краевых эффектов распространения ультразвука при УЗК невозможно обнаружить области дефектов соединений W—Cu и Cu—CuCrZr, расположенные на расстоянии менее 1 мм от краёв облицовочной плитки. Этот эффект ведёт к занижению размеров краевых дефектов при их измерении методом УЗК.

Рис. 17. Разрывы шва между медью и бронзой (зелёно-белые стрелки), локальные разрушения шва W—Cu на участках 8, 9 (жёлто-синие стрелки) и трещина внутри медного слоя 9 образца с трапециевидным дефектом (жёлтая стрелка)



## 7. АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ

Численная температурная оценка, выполненная методом конечных элементов, в целом верно предсказала уровень перегрева поверхности облицовочных плиток с дефектами пайки в зависимости от размеров, формы и расположения таких дефектов. Было выявлено, что из набора рассмотренных дефектов пайки только прямоугольный боковой дефект, занимающий 40% от площади паяного соединения плитки, приводит к перегреву её поверхности более чем на 30%, а именно на 44,1% превышающему расчётную температуру поверхности бездефектной плитки.

Проведённое затем экспериментальное исследование, помимо определения фактических значений перегрева облицовочных плиток ОПЭ ЦСД ИТЭР, в зависимости от размера, формы и локализации искусственных дефектов, внесённых в зону их пайки, позволило сделать заключение о развитии этих дефектов под воздействием циклической тепловой нагрузки, а также выявить влияние наличия крупных дефектов пайки на работоспособность самих облицовочных плиток.

На этапе ультразвукового контроля паяного соединения после изготовления макета было выявлено, что площадь внесённых искусственных дефектов пайки отличается от запланированной не более чем на 30%. Кроме того, были выявлены около 18 случайных дефектов пайки, занимающих от 0,12 до 7,6% площади присоединения плитки. Таким образом, составленный из трёх ОПЭ ЦСЭ экспериментальный макет перед началом ресурсных термоциклических испытаний имел 55 искусственно внесённых и случайно возникших дефектов паяного соединения облицовки, занимающих от 0,12 до 49,4% площади присоединения облицовочной плитки. Никаких дефектов в выполненном наплавкой соединении W—Cu обнаружено не было.

В течение выполненных ресурсных термоциклических испытаний макета не произошло отделения ни одной облицовочной плитки. Кроме этого, при температурных картированиях поверхности макета не было выявлено «горячего пятна», где перегрев поверхности облицовочной плитки с дефектом пайки на 30% (в °С) превышает температуру референсных бездефектных плиток. Также не было выявлено каких-либо плиток или зон облицовки, температура поверхности которых в течение испытаний выросла бы на 20% (в °С) или более.

Внешний вид поверхности облицовки макета также не претерпел видимых изменений: ни трещины, ни вздутия, ни следы плавления поверхности вольфрама не были обнаружены.

Перед началом термоциклирования при первом температурном картировании поверхности облицовки при помощи тепловизора максимальная температура поверхности среди плиток с дефектами пайки превышала среднюю температуру бездефектных плиток не более чем на 17,65% и была лишь на 2,23% выше температуры самой горячей бездефектной плитки. Во время промежуточного и финального картирования плитки с дефектами пайки продемонстрировали ещё меньшее перегревание. При этом самые горячие плитки с дефектом облицовки в каждом картировании были различными (табл. 3).

Т а б л и ц а 3. **Перегрев плиток, имеющих дефекты пайки, в начальном, промежуточном и финальном температурном картировании**

Картирование	Температура поверхности плиток без запланированного дефекта, °С/ряд и номер			Максимальная температура дефектных плиток, °С /ряд и номер	Перегрев, %	
	мин.	макс.	средн.		по средн.	по макс.
Начальное	461,22/A8	625,01/E4	543,11	638,96/F5	17,65	2,23
Промежуточное	475,12/D8	638,99/E4	557,05	644,99/E3	15,79	0,94
Финальное	476,01/B8	620,33/F3	548,17	620,82/F3	13,25	0,08

Результаты температурного сканирования поверхности облицовки пирометром, выполненного в ходе термоциклирования после 1000 и 5000 циклов при 5 МВт/м<sup>2</sup>, представлены в табл. 4. Максимальная температура поверхности среди плиток с дефектами пайки превышала среднюю температуру бездефектных плиток не более чем на 10,87% (после 1000 циклов) и была лишь на 3,08 % выше температуры самой

горячей бездефектной плитки. После 5000 циклов плитки с дефектами пайки продемонстрировали увеличение перегрева до 15,38 и 3,92% выше температуры самой горячей бездефектной плитки. При этом самые горячие плитки с дефектом облицовки в обоих случаях имели одно положение.

Таблица 4. Перегрев плиток, имеющих дефекты пайки, при термоциклировании после 1000 и 5000 циклов при 5 МВт/м<sup>2</sup> (пирометрия)

Количество циклов	Температура поверхности плиток без дефектов, °С/ряд и номер			Максимальная температура дефектных плиток, °С/ряд и номер	Перегрев, %	
	мин.	макс.	средн.		по средн.	по макс.
1000	530,93/E10	617,75/D16	574,33	636,8/A11	10,87	3,08
5000	500,92/D10	625,03/B4	562,56	649,56/A11	15,38	3,92

Перегрев облицовки, полученный на всех этапах картирования, имел низкую и нестабильную динамику. Таким образом, все дефектные плитки макета соответствовали критериям приёмки и прошли ресурсные тепловые испытания.

## 8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведённые ресурсные термоциклические испытания экспериментального макета, включающего три ОПЭ ЦСД ИТЭР с искусственно созданными, а также случайными технологическими дефектами пайки вольфрам-медной облицовки, показали, что дефекты пайки, занимающие до 40% площади паяного присоединения плиток (Cu—CuCrZr), не являются критическими для корректной работы ОПЭ при специфицированной для испытаний ОПЭ циклической тепловой нагрузке. По результатам данной работы Международная организация ИТЭР смягчила критерии приёмки ОПЭ по результатам УЗК, установив допустимый размер дефектов паяного соединения облицовочных плиток на уровне «не более 10% от площади соединения плитки», что вполне достаточно для снижения коэффициента отбраковки ОПЭ ЦСД по результатам УЗК качества пайки облицовки практически до нуля.

Работа выполнена в рамках договора на выполнение НИОКР «Разработка технологии изготовления центральных сборок дивертора и панелей первой стенки реактора ИТЭР, проведение тепловых испытаний элементов дивертора для реактора ИТЭР» № 94-Синтез/17 от 17.03.2017 г.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пискарев П.Ю., Маханьков А.Н., Лигуновский Н.В., Мазуль И.В., Кутеев Б.В., Колесник М.С., Рыбиков А.А., Кузнецов Н.А., Рулев Р.В., Лянзберг Д.В. Тепловые испытания макета обращенного к плазме элемента дивертора токамака реакторного класса. — В сб.: Материалы XXVI конференции «Взаимодействие плазмы с поверхностью». Москва, 26—27 января 2023 г. — М.: Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», 2023, с. 14—17.
2. Pitts R.A., Carpentier S., Escourbiac F., Hirai T., Komarov V., Lisgo S., Kukushkin A.S., Loarte A., Merola M., Naik A.S., Mitteau R., Sugihara M., Bazylev V., Stangeby P.C. A full tungsten divertor for ITER: Physics issues and design status. — J. of Nuclear Materials, 2013, vol. 438, p. S48—S56.
3. Рыбиков А.А., Кузнецов Н.А., Лигуновский Н.В., Маханьков А.Н. Разработка и апробация технологии облицовки обращенных к плазме элементов центральной сборки дивертора ИТЭР. — В сб.: Материалы III Международной конференции «Проблемы термоядерной энергетики и плазменные технологии». Таруса, 16—21 октября 2023 г. — Таруса: Издательский дом МЭИ, 2023, с. 93—94.
4. Fedotov V.T., Suchkov A., Kalin B., Sevryukov O., Ivannikov A. Stemet solders for brazing of modern technology materials. — Tsvetnye Metally, 2014, vol. 1, p. 32—37.
5. Litunovsky N., Alekseenko E., Kuznetsov V., Lyanzberg D., Makhankov A., Rulev R. Repair of manufacturing defects in the armor of plasma facing units of the ITER Divertor Dome. — Fusion Engineering and Design, 2013, vol. 88, № 9—10, p. 1739—1743.

6. Litunovsky N., Alekseenko E., Makhankov A., Mazul I. Development of the armoring technique for ITER Divertor Dome. — Fusion Engineering and Design, 2011, vol. 86, № 9—11, p. 1749—1752.
7. Пискарев П.Ю., Рулев Р.В., Мазуль И.В., Красильников А.В., Писарев А.А., Кутеев Б.В., Колесник М.С., Душик В.В., Бобров С.В., Монтак Н.В., Рыбиков А.А., Букатин Т.Н. Покрытия на обращённой к плазме поверхности первой стенки: анализ и термоциклические испытания электронным пучком на стенде «Цефей-М». — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 1, с. 111—121.
8. Wei R., Li Q., Wang W.J., Wang J.C., Wang X.L., Xie C.Y., Luo G.-N. Microstructure and properties of W—Cu/CuCrZr/316L joint bonded by one-step HIP technique. — Fusion Engineering and Design, 2018, vol. 128, p. 47—52.
9. Литуновский Н.В., Маханьков А.Н. Устройство для фиксации и прижима деталей в процессе высокотемпературной вакуумной пайки в печах сопротивления. Патент на полезную модель № 202604 U1. Российская Федерация, МПК В23К 37/04, В23К 1/012. № 2020115205, заявл. 17.04.2020, опубл. 26.02.2021.
10. Еремкин А.В., Володин А.В., Кокоулин А.И., Комаров А.О., Кузнецов В.Е., Малышев А.С., Степанов Н.Б. Испытательная установка для экспериментального исследования поведения компонентов дивертора ИТЭР при интенсивных тепловых потоках. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 4, с. 5—14.

АО «НИИЭФА им. Д.В. Ефремова», 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой,  
дорога на Металлострой, д. 3, Россия



Андрей Александрович Рыбиков, инженер-исследователь 1 категории  
rybikov@sintez.niiefa.spb.su



Никита Александрович Кузнецов, инженер-исследователь 1 категории  
n.kuznetsov@sintez.niiefa.spb.su



Николай Владимирович Литуновский, главный специалист  
nlitunovskiy@sintez.niiefa.spb.su



Алексей Николаевич Маханьков, начальник отдела, к. техн. н.  
makh@sintez.niiefa.spb.su



Павел Юрьевич Пискарев, начальник отдела  
piskarev@sintez.niiefa.spb.su



Андрей Викторович Еремкин, ведущий инженер  
eremkin@sintez.niiefa.spb.su



Илья Павлович Богданов, инженер-исследователь 2 категории  
ilia.bogdanov@sintez.niiefa.spb.su



Владимир Евгеньевич Кузнецов, начальник отдела  
kuznetc@sintez.niiefa.spb.su



Андрей Владимирович Володин, ведущий инженер  
volodin@sintez.niiefa.spb.su



Николай Иванович Архипов, руководитель проекта — ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2, Россия  
N.Arkhipov@iterrf.ru

Статья поступила в редакцию 16 декабря 2024 г.

После доработки 15 января 2025 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 19—32.

УДК 621.387.422

## ИСПЫТАНИЯ ИОНИЗАЦИОННЫХ КАМЕР ДЕЛЕНИЯ, МОДЕРНИЗИРОВАННЫХ ДЛЯ РЕГИСТРАЦИИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ

*Д.С. Фридрихсен<sup>1,2</sup>, Г.Е. Немцев<sup>1,2</sup>, Т.М. Кормилицын<sup>1,2</sup>, С.Ю. Обудовский<sup>1,2</sup>,  
А.В. Панкратенко<sup>1,2</sup>, М.С. Самойленко<sup>1,2</sup>, С.Б. Степанов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

Вертикальная нейтронная камера (ВНК) ИТЭР — многоканальный нейтронный коллиматор, предназначенный для измерения профиля источника нейтронов в полоидальном сечении плазмы токамака. Для увеличения сигнала прямых нейтронов ранее было предложено использовать коллиматоры прямоугольной формы, апертура которых расширяется в тороидальном направлении. Данная оптимизация позволила в несколько раз улучшить отношение сигнал/фон без ухудшения пространственного разрешения системы. Это повлекло за собой изменение конструкции детекторных узлов ВНК, в частности, системы электродов ионизационной камеры деления. Были разработаны и изготовлены ионизационные камеры деления (ИКД) с прямоугольными пластинами электродов, повторяющими форму коллиматорных каналов ВНК. В статье приводятся результаты испытаний трёх модулей ИКД в полях излучения Д—Д- и Д—Т-нейтронных генераторов (НГ-14 и НГ-24М соответственно). Были измерены чувствительности, а также исследованы изменения в скорости счёта ИКД при вращении детекторного узла вокруг его осей. Контроль флюенса нейтронов в месте размещения ИКД обеспечивался образцами-свидетелями <sup>115</sup>In и <sup>27</sup>Al. По результатам работы сделан вывод, что использование электродов новой прямоугольной формы для ВНК ИТЭР полностью оправдано.

**Ключевые слова:** детектирование термоядерных нейтронов, ионизационные камеры деления, вертикальная нейтронная камера ИТЭР.

## TESTS OF FISSION IONIZATION CHAMBERS UPGRADED TO REGISTER THERMONUCLEAR NEUTRONS

*D.S. Fridrikhsen<sup>1,2</sup>, G.E. Nemtsev<sup>1,2</sup>, T.M. Kormilitsyn<sup>1,2</sup>, S.Yu. Obudovsky<sup>1,2</sup>, A.V. Pankratenko<sup>1,2</sup>,  
M.S. Samoilenko<sup>1,2</sup>, S.B. Stepanov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>JSC «SRC RF TRINITY», Moscow, Troitsk, Russia

<sup>2</sup>Project Center ITER, Moscow, Russia

ITER Vertical Neutron Camera (VNC) is a multichannel neutron collimator designed to measure the neutron source profile in the poloidal cross-section of the tokamak plasma. It was previously proposed to use rectangular collimators with an aperture prolonged in the toroidal direction to increase the direct neutron signal. This optimization allowed to improve the signal-to-background ratio several times without deteriorating the spatial resolution of the system. This entailed a change in the design of the VNC detector units (DU), in particular, of the electrode system of the ionization chambers (IC). ICs with rectangular electrode plates matching the shape of the collimators were developed and manufactured. The paper presents the results of tests of three ICs under irradiation by D—D and D—T neutron generators (NG-14 and NG-24M, respectively). The sensitivities were measured as well as changes in the IC count rate when the DU was rotated around its axes. Neutron fluence control at the IC placement location was provided by <sup>115</sup>In and <sup>27</sup>Al activation samples. The results demonstrate that the change to new rectangular electrodes for the ITER VNC is fully justified.

**Key words:** fusion neutron detection, fission ionization chambers, ITER vertical neutron camera.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Вертикальная нейтронная камера (ВНК) — диагностика ИТЭР, предназначенная для измерения пространственного распределения интенсивности источника термоядерных нейтронов. Основными измеряемыми параметрами системы являются профиль источника нейтронов и плотность термоядер-

ной мощности с пространственным разрешением  $a/10$  (здесь  $a$  — малый радиус вакуумной камеры ИТЭР) или 20 см и временным разрешением 1 мс [1] в сценариях как с D—D-, так и с D—Т-плазмой. Блоки детектирования быстрых нейтронов ВНК представляют собой комбинацию двухсекционной ИКД с радиаторами из урана-238 и спектрометра на основе синтетического кристалла алмаза [2]. Для охвата плазмы линиями наблюдения детекторы нейтронов и каналы коллиматоров ВНК были интегрированы внутрь верхнего патрубка токамака, почти достигая первой стенки. В данных условиях практически невозможно разместить достаточное количество нейтронной защиты [3] и, как следствие, обеспечить высокое отношение сигнал/фон на детекторах (соотношение между нейтронами, которые попали на детектор напрямую от источника через канал коллиматора и были зарегистрированы, и всеми остальными зарегистрированными нейтронами). Для увеличения отношения сигнал/фон была выполнена оптимизация линий наблюдения и каналов коллиматоров. Это было достигнуто с помощью перехода на коллиматоры прямоугольной формой с расширяющейся в тороидальном направлении апертурой. Таким образом, в чувствительную часть детектора попадает больше прямых нейтронов, что приводит к увеличению числа полезных сигналов без ухудшения пространственного разрешения в полоидальном сечении [4]. На рис. 1 показан общий вид коллиматоров и линий наблюдения верхней ВНК.

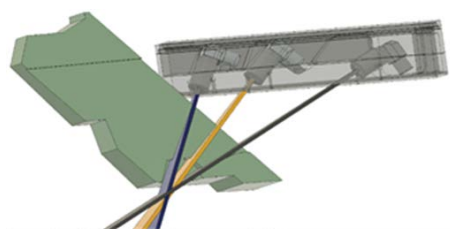


Рис. 1. Линии наблюдения ВНК с коллиматорами, расходящимися в тороидальном направлении [2]

Чтобы уменьшить сигнал от фоновых нейтронов, было предложено использовать ионизационные камеры деления с прямоугольными электродными пластинами, форма которых повторяет форму коллиматорных каналов. В результате данных оптимизаций получилось поднять отношение сигнал/фон для разных каналов в 3—5 раз [4]. Такие ИКД с прямоугольными пластинами были разработаны и изготовлены в АО «НИИТФА». Для корректного измерения плотности потока нейтронов в коллиматорном пучке перед установкой в блоки детектирования ВНК необходимо проведение серии испытаний по определению чувствительности нейтронных детекторов в полях D—D- и D—Т-нейтронов, а также её анизотропии. Испытания были выполнены на стенде нейтронной диагностики плазмы АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» с использованием генераторов быстрых нейтронов НГ-14 и НГ-24М, произведённых в ФГУП «ВНИИА» [5, 6].

В рамках испытаний был проверен комплект из трёх двухсекционных ИКД КНТ-34-2 (№ 1—3), каждая из которых имеет по две системы электродов (ЭС) прямоугольной формы с радиаторами из 99,998%  $^{238}\text{U}$ . Уран нанесён тонким слоем на электроды ИКД, общая масса составляет  $70 \pm 7$  мг в ЭС1 и  $700 \pm 70$  мг в ЭС2. Форма электродов, схема и общий вид ИКД представлены на рис. 2. Пластины электродов внутри камеры ориентированы перпендикулярно оси цилиндрического корпуса и расположены вдоль неё.

В ходе испытаний ИКД были подключены к зарядочувствительному предусилителю CREMAT CR-Z-100 с помощью высокочастотного кабеля BELDEN-9222 длиной 3 м. Сигнал с предусилителя подавался на усилитель-формирователь Ortec 575A, для регистрации сигнала использовалось АЦП Аспект РС1-8k.

Перемещение и вращение ИКД в поле излучения нейтронных генераторов выполнялись с помощью штатной системы позиционирования стенда нейтронной диагностики.

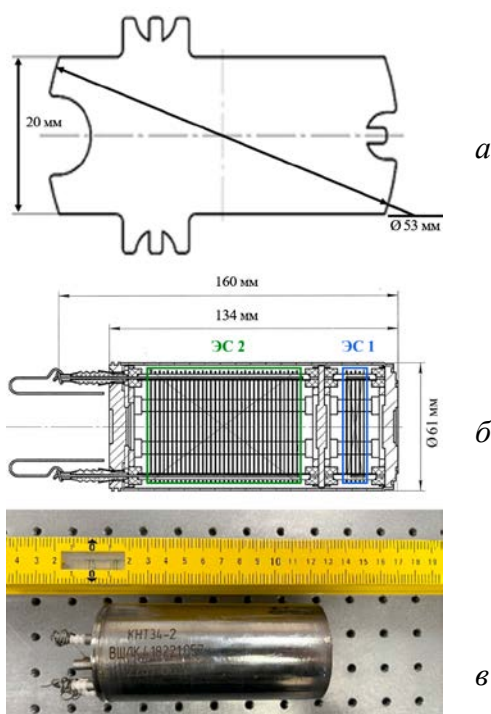


Рис. 2. Чертёж формы отдельного электрода (а), схема продольного сечения (б) и внешний вид блока ИКД ВНК (в)

## 2. СКОРОСТЬ СЧЁТА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ УГЛА ОБЛУЧЕНИЯ

Первый этап испытаний ИКД состоял из определения скоростей счёта в зависимости от угла поворота к источнику нейтронов. Измерения проводились при вращении вокруг центральной оси ИКД, а также вокруг предварительно определённых центров ЭС. ИКД размещалась в поле излучения источника нейтронов — D—T-нейтронного генератора НГ-24М, установленное ускоряющее напряжение — 220 кВ, ток трубки — 1 мА. При таких параметрах работы генератора характерная энергия нейтронов вдоль главной оси НГ составляет  $\sim 14,7$  МэВ, полный выход —  $10^{11}$  н/с. Для контроля полного выхода генератор оснащён монитором нейтронного потока на основе ИКД, закреплённым на переднем фланце корпуса. Во время проведения измерений выход генератора может незначительно меняться, для нивелирования влияния этих изменений на скорости счёта исследуемых ИКД они нормировались на показания монитора генератора.

В силу одинаковой геометрии ИКД № 1—3 ВНК анизотропия скорости счёта от угла ориентации к источнику нейтронов будет идентична для всех камер из исследуемого комплекта. Далее в качестве примера представлены результаты измерения анизотропии при вращении блока ИКД № 2 вокруг трёх осей: главной оси и осей, проходящих через центры ЭС:

— ИКД с прямоугольными электродами размещалась в поле точечного источника быстрых нейтронов на расстоянии 20 см (от оси ИКД до поверхности источника). Запись скоростей счёта велась одновременно с вращением камеры вокруг главной оси. Измерения проводились для ЭС2 (большой). Результат измерений — график зависимости скорости счёта ИКД (нормированы на показания монитора НГ) от угла поворота вокруг главной оси показан на рис. 3. Показано, что скорость счёта ИКД ВНК не зависит с точностью 2,8% от угла поворота ИКД относительно своей главной оси (оси симметрии);

— также были проведены измерения скорости счёта при вращении камер вокруг центров двух ЭС в вертикальной плоскости. Центры предварительно были определены путём вертикального и горизонтального перемещения ЭС в поле нейтронного генератора для определения точки, где скорость счёта достигает максимального значения. Пример изменения скоростей счёта монитора НГ-24М и ЭС2 ИКД № 2 во времени представлен на рис. 4. Найденные таким образом центры ЭС соответствуют отмеченным на чертежах. Расстояние от мишени генератора НГ-24М до центра ЭС составляло 20 см. Параметры работы генератора аналогичны указанным ранее. На рис. 5 показана схема, соответствующая вращению ИКД относительно центра ЭС2.

В силу конструктивных особенностей системы позиционирования и схемы подключения ИКД к измерительному тракту вращение возможно осуществить только в диапазоне углов от  $-90^\circ$  до  $90^\circ$  относительно главной оси НГ в горизонтальной плоскости, которая содержит эту ось. За нулевой угол принято направление ИКД, при котором её ось совпадает с осью генератора. Скорости счёта нормировались на показания монитора генератора. Результаты для двух ЭС приведены на рис. 6.

Для ЭС1 скорости счёта совпадают в пределах 6% для различных углов поворота. Спад скорости счёта наблюдается в области  $50-70^\circ$ . Это связано с точностью определения центра электродной системы, а также с небольшими изменениями в эффективной толщине материала стенки при вращении ИКД.

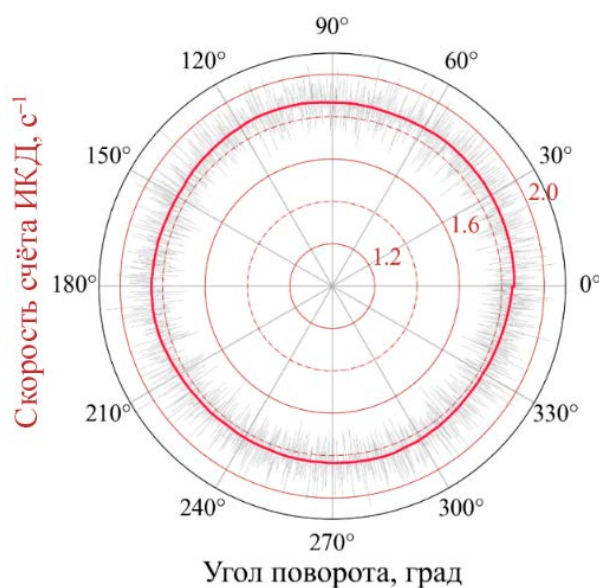


Рис. 3. Скорость счёта электродной системы № 2 одной из ИКД ВНК в зависимости от угла поворота вокруг главной оси

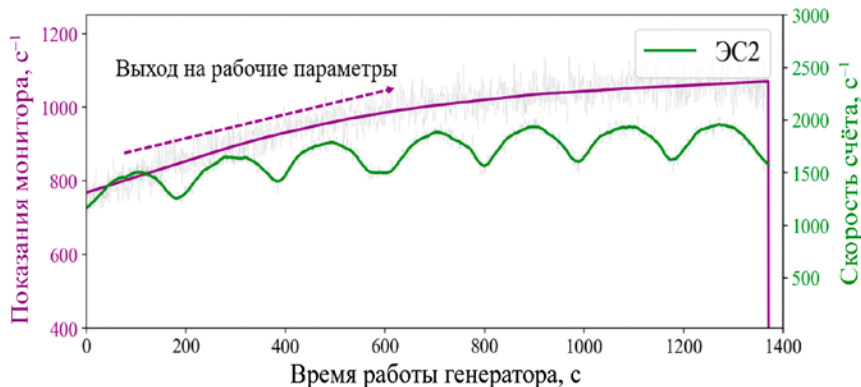


Рис. 4. Показания скорости счёта монитора НГ-24М и ЭС2 ИКД № 2 при проведении эксперимента для определения центра ЭС2: — ЭС2; — НГ-24М; - - - выход на рабочие параметры

Для ЭС2 отличия достигают 19%. Такое отличие вызвано тем, что при облучении ИКД вдоль оси (угол  $0^\circ$ ) перед электродной системой находится много конструктивных материалов камеры, в том числе ЭС1. Максимум скорости счёта наблюдается в диапазоне углов  $70\text{—}80^\circ$ . Это необходимо учитывать при восстановлении профиля источника быстрых нейтронов в условиях токамака-реактора ИТЭР.

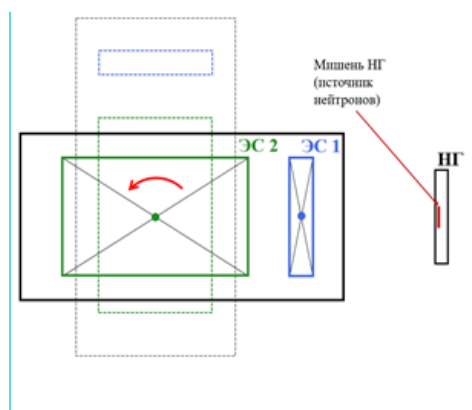


Рис. 5. Схема размещения ИКД ВНК в поле излучения НГ-24 М при измерении скорости счёта ЭС2. Вращение проиллюстрировано красной стрелкой (против часовой), центры ЭС показаны точками

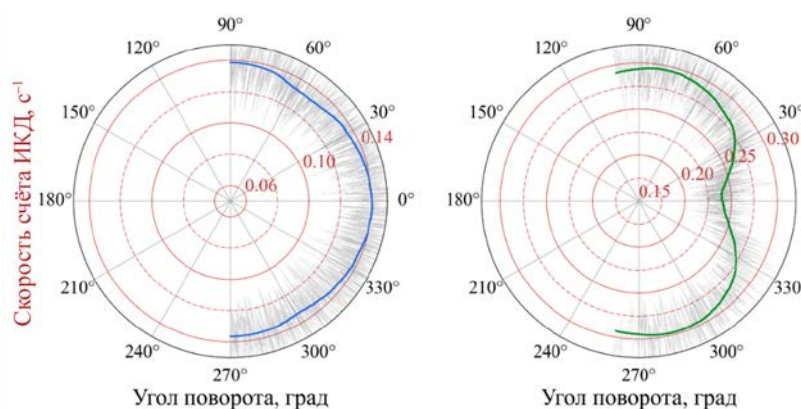


Рис. 6. Результаты измерений скорости счёта, нормированной на показания монитора НГ, ЭС1 (а) и ЭС2 (б) ИКД № 2 ВНК

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ИКД

Второй этап испытаний ИКД ВНК заключался в определении чувствительности ЭС к D—D- и D—T-нейтронам. Для достижения этой цели были проведены две серии экспериментов: в поле генераторов НГ-24М (D—T) и НГ-14 (D—D). Вдоль главных осей генераторов выбраны контрольные точки на расстоянии 50 и 10 см от поверхности мишенного узла НГ-24М и НГ-14 соответственно. В выбранных точках предварительно методом нейтронно-активационного анализа определены плотности потока нейтронов. В качестве образцов-свидетелей использовались диски из  $^{27}\text{Al}$  (реакция  $(n, \alpha)$ ) и  $^{115}\text{In}$  (реакция  $(n, n')$ ) для D—D- и D—T-нейтронов соответственно. Плотности потока в контрольных точках, а также некоторые параметры работы генераторов приведены в табл. 1.

ИКД № 1—3 размещались на оси генератора таким образом, чтобы центры ЭС находились в аттестованных точках. Определение чувствительностей проводилось для двух ориентаций ЭС: вдоль ( $0^\circ$ ) и перпендикулярно ( $90^\circ$ ) оси генератора (расположение аналогично показанному на рис. 5). Чувствительность ИКД в нейтронном поле определяется как отношение скорости счёта к плотности потока в точке пространства, где она расположена. Скорость счёта зависит от установленного порога дискриминации сигнала. Таким образом, чувствительность ИКД будет зависеть от выбранного порога. Пример такой зависимости для ИКД КНТ 34-2 № 3 представлен на рис. 7.

Таблица 1. Параметры работы НГ при определении чувствительностей ИКД

Характеристика	НГ-24М	НГ-14
Ускоряющее напряжение	220 кВ	130 кВ
Ток трубки	1 мА	1 мА
Характеристика нейтронного излучения	~14,7 МэВ, выход — $10^{10}$ н/с	~2,9 МэВ, выход — $2 \times 10^8$ н/с
Расстояние от поверхности мишенного узла до контрольной точки	50 см	10 см
Плотность потока в контрольной точке	$\sim 1,80 \times 10^5$ н/см <sup>2</sup> /с	$\sim 5,52 \times 10^4$ н/см <sup>2</sup> /с
Время экспозиции	1000 с	1000 с

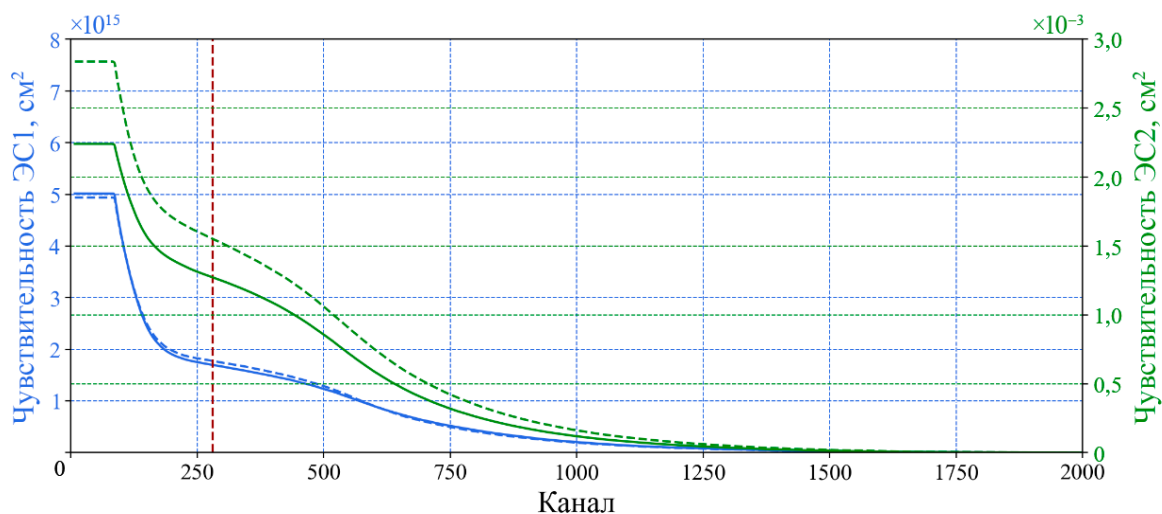


Рис. 7. Дискриминационная характеристика ИКД КНТ 34-2 № 3 из состава блоков детектирования ВНК ИТЭР для случаев размещения ИКД главной осью под 0° (сплошной) и 90° (пунктиром) к оси нейтронного генератора. Вертикальная пунктирная линия — оптимальное значение порога

Оптимальное положение порога измерений определяется, исходя из дискриминационной характеристики ИКД КНТ 34-2 с учётом средней амплитуды шумов системы сбора данных, и находится в точке, где вторая производная характеристики приближается к нулю. В нашем случае значение порога соответствует 280-му каналу и показано на рис. 7 вертикальной пунктирной линией. Рассчитанные значения чувствительностей в D—D- и D—Т-нейтронных полях для трёх исследуемых ИКД представлены в табл. 2.

Таблица 2. Чувствительность ИКД КНТ34-2 из состава ВНК

Тип нейтронного поля	Чувствительность ИКД из состава ВНК, см <sup>2</sup>					
	ЭС1 (малая)			ЭС2 (большая)		
	№ 1	№ 2	№ 3	№ 1	№ 2	№ 3
Положение ИКД — на оси генератора; вдоль (0°)						
D—D	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$1,06 \cdot 10^{-4}$	$1,07 \cdot 10^{-4}$	$1,42 \cdot 10^{-3}$	$1,36 \cdot 10^{-3}$	$1,37 \cdot 10^{-3}$
D—Т	$1,66 \cdot 10^{-4}$	$1,63 \cdot 10^{-4}$	$1,70 \cdot 10^{-4}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$	$1,10 \cdot 10^{-3}$	$1,27 \cdot 10^{-3}$
Положение ИКД — центр ЭС на оси генератора; перпендикулярно (90°)						
D—D	$1,13 \cdot 10^{-4}$	$1,08 \cdot 10^{-4}$	$1,17 \cdot 10^{-4}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$	$1,47 \cdot 10^{-3}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$
D—Т	$1,78 \cdot 10^{-4}$	$1,71 \cdot 10^{-4}$	$1,77 \cdot 10^{-4}$	$1,53 \cdot 10^{-3}$	$1,26 \cdot 10^{-3}$	$1,55 \cdot 10^{-3}$

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках испытаний ионизационной камеры деления с формой электродов, оптимизированной для диагностики «Вертикальная нейтронная камера ИТЭР», проведены измерения чувствительности электродных систем ЭС1 (масса урана-238 — 700 мг) и ЭС2 (масса урана-238 — 700 мг) из состава трёх ИКД, предназначенных к поставке в качестве вклада РФ в натуральной форме. Характерные значения чувствительности для ЭС представлены в табл. 2.

В процессе испытаний не обнаружено статистически значимых изменений в скорости счёта ИКД при использовании электродных систем с прямоугольными электродами при вращении ИКД вокруг центральной оси, что полностью подтверждает необходимость использования таких ИКД в составе диагностики с целью увеличения отношения сигнал/шум. Вращение ИКД вокруг центров электродных систем приводит к ожидаемому изменению скорости счёта в силу сдвоенной конструкции ИКД, в которой секция ЭС2 находится в тени ЭС1 при облучении вдоль центральной оси. Величина изменения скорости счёта достигает в таком случае 19% от исходной для электродной системы с большим содержанием урана (ЭС2), что необходимо учитывать при анализе показаний детекторных узлов диагностики «Вертикальная нейтронная камера ИТЭР».

Работа выполнена в рамках договора между Частным учреждением Государственной корпорации по атомной энергии «Росатом» «Проектный центр ИТЭР» и АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» на выполнение НИОКР от 21.04.2023 № 17706413348230000070/20-23/01 с дополнительным соглашением от 27.04.2024 № 1 «Испытания компонентов нейтронных диагностик ИТЭР (этапы 2023—2024 годов)».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Vayakis G., Hodgson E.R., Voitsenya V., Walker C.I.** Chapter 12: Generic Diagnostic Issues for a Burning Plasma Experiment. — Fusion Science and Technology, 2008, vol. 53(2), p. 699—750.
2. **Немцев Г.Е. и др.** Статус разработки диагностики Вертикальная нейтронная камера в 2021 году. — В сб.: Тезисы докладов XIX Всероссийской конференции «Диагностика высокотемпературной плазмы», 2021.
3. **Pak S., Bertalot L. et al.** Engineering issues on the diagnostic port integration in ITER upper port 18. — Fusion Engineering and Design, 2016, vol. 109—111, part A, p. 824—829.
4. **Rodionov R.N., Nemtsev G.E. et al.** Optimization of the ITER vertical neutron camera detectors and collimators. — Fusion Engineering and Design, 2021, vol. 166, p. 112341.
5. **Сыромуков С.В., Добров Р.В., Мельник А.В., Степнов В.В., Сысоев В.И.** Мощный генератор нейтронов НГ-14 с запаянной трубкой для ядерных технологий. — Атомная энергия, 2014, т. 117, вып. 6, с. 350—352.
6. **Сыромуков С.В. и др.** Генератор нейтронов НГ-24 для ядерной медицины и термоядерных исследований. — Атомная энергия, 2015, т. 119, вып. 1, с. 58—60.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиных, вл. 12, Россия  
Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2, Россия



Дмитрий Сергеевич Фридрихсен, инженер 2 категории; младший научный сотрудник  
Fridrihsen.DS@triniti.ru



Григорий Евгеньевич Немцев, ведущий инженер, к.ф.-м.н.; начальник сектора  
Nemtsev@triniti.ru



Тимофей Михайлович Кормилицын, ведущий инженер; начальник сектора  
Kormilitsin@triniti.ru



Сергей Юрьевич Обудовский, научный сотрудник; ведущий специалист  
Obud@triniti.ru



Алексей Владимирович Панкратенко,  
инженер; младший научный сотрудник  
Pankratenko@triniti.ru



Мария Сергеевна Самойленко, главный  
специалист; специалист  
MSamoilenko@triniti.ru



Сергей Борисович Степанов, руководи-  
тель проекта — старший научный со-  
трудник  
S.Stepanov@iterrf.ru

Статья поступила в редакцию 5 ноября 2024 г.

После доработки 25 марта 2025 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 33—39.



УДК 533.9.07, 533.9.08

## ВОЗМОЖНОСТИ КОРПУСКУЛЯРНОЙ ДИАГНОСТИКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ДЕЙТЕРИЕВО-ВОДОРОДНОЙ ПЛАЗМЫ НА УСТАНОВКЕ ТРТ

*М.И. Миронов<sup>1,2</sup>, В.И. Афанасьев<sup>1,2</sup>, П.Р. Гончаров<sup>3</sup>, А.Д. Мельник<sup>1,2</sup>, А.С. Наволоцкий<sup>2</sup>,  
В.Г. Несеневич<sup>2</sup>, М.П. Петров<sup>2</sup>, С.Я. Петров<sup>2</sup>, Ф.В. Чернышев<sup>1,2</sup>, Р.Ю. Шмитов<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

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

В статье рассмотрены возможности применения корпускулярной диагностики для измерения ионной температуры и изотопного состава дейтериево-водородной плазмы на токамаке с реакторными технологиями. Для наиболее оптимального взаимного расположения диагностического оборудования выполнено компьютерное моделирование потоков атомов дейтерия и водорода для «активного» варианта диагностики (с инжекцией в плазму диагностического пучка атомов) и «пассивного» варианта (без инжекции пучка). В качестве примера рассмотрен базовый режим работы установки с отношением плотностей дейтерия и водорода в плазме 90% (D)/10% (H). Показано, что в «активном» варианте диагностика позволяет проводить локальные измерения ионной температуры и изотопного отношения плазмы с пространственным разрешением ~13 см. В «пассивном» варианте эта величина составляет ~30 см. При этом обеспечивается временное разрешение не хуже 10 мс для «пассивного» варианта и 1 мс — для «активного» варианта.

**Ключевые слова:** корпускулярная диагностика плазмы, анализатор атомов перезарядки, инжекция нейтральных пучков, токамак с реакторными технологиями.

## USE OF NEUTRAL PARTICLE DIAGNOSTICS FOR DEUTERIUM-HYDROGEN PLASMA RESEARCH IN TRT FACILITY

*M.I. Mironov<sup>1,2</sup>, V.I. Afanasyev<sup>1,2</sup>, P.R. Goncharov<sup>3</sup>, A.D. Melnik<sup>1,2</sup>, A.S. Navolotsky<sup>2</sup>, V.G. Nesenevich<sup>2</sup>,  
M.P. Petrov<sup>2</sup>, S.Ya. Petrov<sup>2</sup>, F.V. Chernyshev<sup>1,2</sup>, R.Yu. Shmitov<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

<sup>2</sup>A.F. Ioffe Institute of Physics and Technology, St. Petersburg, Russia

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

The possibility to measure ion temperature and fuel ratio of deuterium-hydrogen plasma in the TRT facility is considered. Computer modeling of «active» and «passive» (with and without diagnostic beam) atomic fluxes of deuterium and hydrogen was carried out for the most optimal layout of the diagnostic equipment. The basic operation scenario with 90% (D)/10% (H) plasma was taken as an example. It was demonstrated that in «active» mode neutral particle diagnostics can provide local measurement of ion temperature and fuel ratio with ~13 cm space resolution. In «passive» mode the resolution drops to ~30 cm. The time resolution is less than 10 ms for «passive» mode and less than 1 ms — for «active» mode.

**Key words:** neutral particle diagnostics of plasma, neutral particle analyzer, neutral beam injection, tokamak with reactor technologies.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проектирование компактного российского токамака с реакторными технологиями (ТРТ) [1] включает в себя разработку целого набора диагностических систем, которые должны обеспечить проведение измерений необходимых физических параметров плазмы. В качестве одной из ключевых различных диагностических систем рассматривается корпускулярная диагностика, позволяющая получать энергетические распределения ионов по потокам соответствующих атомов из плазмы. Необходимо отметить, что

данная система включена в перечень приоритетных диагностик для международного термоядерного реактора ИТЭР, обеспечивающих контроль изотопного состава плазмы и оптимизацию режима термоядерного горения [2, 3]. Концептуальный проект корпускулярной диагностики для токамака ТРТ был ранее рассмотрен в работах [4, 5]. Были исследованы возможности применения системы при работе токамака ТРТ в полномасштабных дейтериево-третиевых режимах и показано, что диагностика позволяет с необходимой точностью определять температуру ионного компонента плазмы и её изотопный состав. Важно отметить, что вводу в эксплуатацию любой новой плазменной установки предшествует предварительный этап. В частности, на токамаке ТРТ планируется довольно длительная работа с водородной, дейтериевой и гелиевой плазмой. Такой подход позволяет в разрядах без напуска в токамак трития, т.е. в разрядах с небольшой радиационной нагрузкой, проверить основные технологические решения и отработать режимы работы, которые будут использованы при работе установки с полномасштабной дейтериево-третиевой плазмой. Не меньший интерес предварительный этап работы установки представляет и для диагностических систем, которые на этом этапе могут протестировать оборудование и проверить надёжность выбранных диагностических методик. С этой точки зрения для корпускулярной диагностики наиболее интересным представляется сценарий работы установки с дейтериево-водородной плазмой, поскольку позволяет проверить методику, связанную с определением изотопного состава плазмы. В данной статье представлен анализ возможностей применения корпускулярной диагностики именно для такого сценария работы токамака ТРТ. В качестве примера был выбран базовый режим работы установки с отношением плотностей дейтерия и водорода в плазме 90% (D)/10% (H). Для этого режима был сделан анализ процессов нейтрализации ионов плазмы, получены оценки потоков атомов дейтерия и водорода и соответствующих скоростей счёта в детекторных каналах анализатора атомов для «активного» варианта диагностики (с инжекцией в плазму диагностического пучка атомов) и «пассивного» варианта (без инжекции пучка). Для обоих вариантов получена также оценка пространственного и временного разрешения измерений.

## 2. СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ ДИАГНОСТИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

Схема размещения оборудования корпускулярной диагностики на установке ТРТ представлена на рис. 1, где показаны направления линий инжекции диагностического пучка и нагревных пучков атомов и линия наблюдения атомного анализатора. Выбор данной схемы обусловлен следующими факторами.

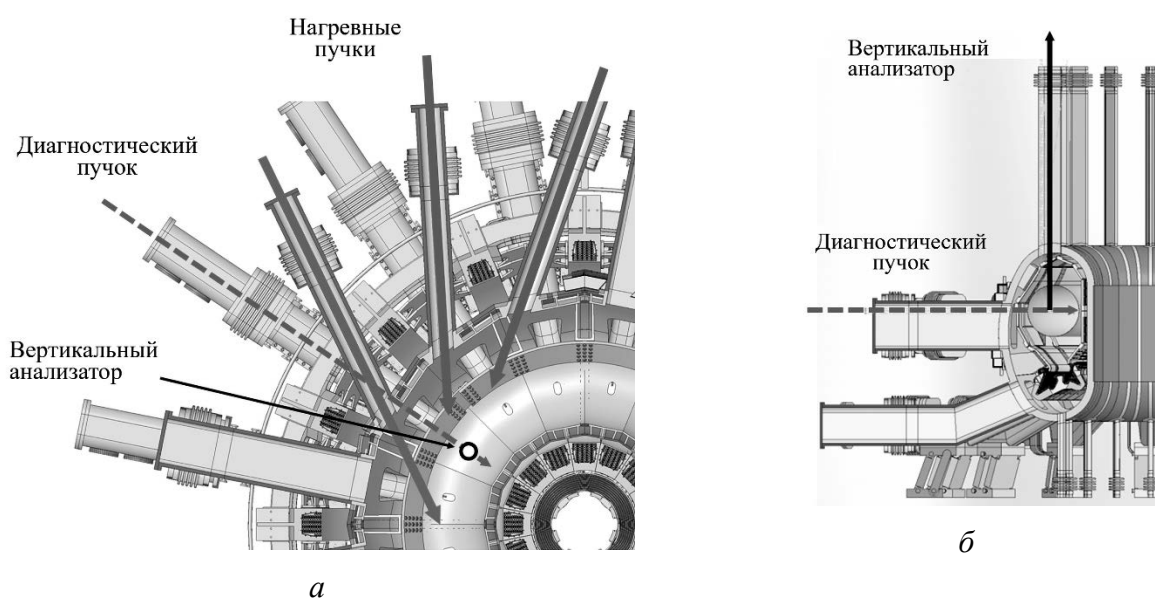


Рис. 1. Схема взаимного расположения линий наблюдения анализатора атомов и инжекции диагностического пучка на установке ТРТ: а — вид сверху; б — вид сбоку

Во-первых, конструктивные особенности пространства ТРТ делают размещение диагностического инжектора атомов на вертикальных патрубках токамака практически нереализуемым. Поэтому в концептуальном проекте диагностики было принято, что диагностический инжектор будет расположен на экваториальном патрубке установки и пучок атомов будет инжектироваться в плазму в экваториальном направлении. Во-вторых, для такого расположения инжектора реализация наиболее оптимального варианта диагностики — с тангенциальным направлением линии наблюдения атомного анализатора, рассмотренного в предыдущей работе [5], тоже вызывает целый ряд конструктивных сложностей, связанных с необходимостью встраивания в конструкцию камеры токамака специального косоугольного (как для нагревных пучков) диагностического патрубка, и в «замороженном» в настоящее время проекте ТРТ такие патрубки отсутствуют. Поэтому в данной статье мы рассматриваем в качестве наиболее вероятной схемы размещение анализатора на вертикальном патрубке токамака. Для возможности реализации как «пассивного», так и «активного» вариантов диагностики, очевидно, должен быть выбран вертикальный патрубок, находящийся в том же сечении, где расположен экваториальный патрубок для диагностического инжектора.

### 3. ПАРАМЕТРЫ ПЛАЗМЫ И ПУЧКОВ НЕЙТРАЛЬНЫХ АТОМОВ

Моделирование потоков атомов изотопов водорода было проведено для плазмы с отношением плотностей ионов дейтерия и водорода 90% (D)/10% (H) и следующими параметрами базового сценария [6]: тороидальное магнитное поле в центре  $B_0 = 8$  Тл; ток плазмы  $I_p = 5$  МА; средняя плотность плазмы  $\langle n_e \rangle = 1,3 \cdot 10^{14}$  см<sup>-3</sup>; температура электронов и ионов в центре плазмы соответственно  $T_e(0) = 18,4$  кэВ и  $T_i(0) = 20,5$  кэВ; большой радиус плазмы  $R = 2,15$  м; малый радиус  $a = 0,57$  м; вытянутость плазмы  $k = 1,8$ . Пространственные профили плотности и температуры для этого режима представлены соответственно на рис. 2, 3.

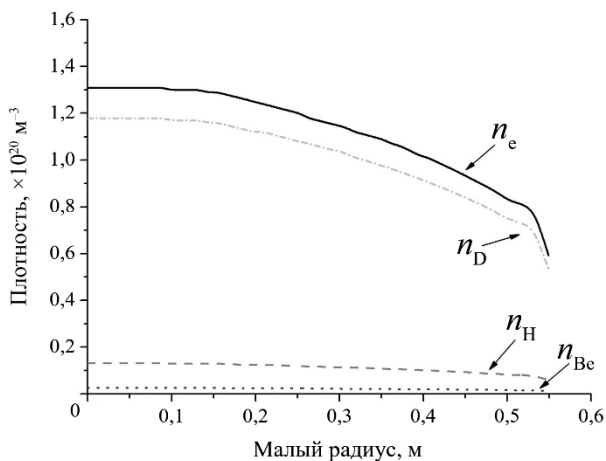


Рис. 2. Пространственные профили плотности электронов ( $n_e$ ), ионов дейтерия ( $n_D$ ), трития ( $n_T$ ) и бериллия ( $n_{Be}$ )

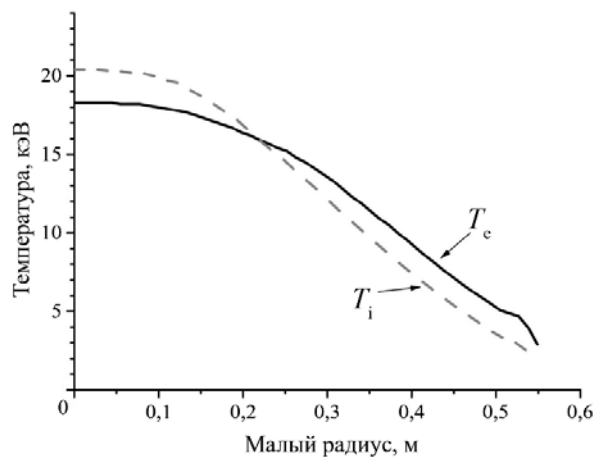


Рис. 3. Пространственные профили температуры электронов ( $T_e$ ) и ионов плазмы ( $T_i$ )

Для инжекционного нагрева применяются три дейтериевых пучка с энергией 500 кэВ и полной мощностью 25 МВт. Расчёты функции распределения ионов нагревных пучков были выполнены по методике, описанной в работе [4]. Результаты расчётов для  $\rho = 0,7$ , где  $\rho$  — приведённый малый радиус, представлены на рис. 4 в виде двумерной зависимости функции распределения от энергии и питч-угла. Отметим несколько особенностей полученного распределения. Во-первых, по мере замедления ионов их угловое распределение уширяется, а для термализованных частиц становится полностью изотропным. Во-вторых, энергетическое распределение замедляющихся ионов при питч-углах, близких к углу

инжекции ( $30^\circ$ ), занимает весь диапазон энергий вплоть до энергии инжекции (500 кэВ). В-третьих, наблюдается наличие малой доли ионов с энергиями выше, чем энергия атомов пучка, что обусловлено передачей импульса от частиц фоновой плазмы.

Параметры диагностического пучка, использованные в расчётах, также соответствовали проектным [7]: тип частиц — атомы водорода, энергия инжекции — 60 кэВ, эквивалентный ток пучка — 4,5 А, токовое соотношение энергетических ( $E_0:E_0/2:E_0/3$ ) фракций пучка — 0,85:0,1:0,05, диаметр пучка в центре плазмы — 13 см.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОТОКОВ АТОМОВ И СКОРОСТЕЙ СЧЁТА В АТОМНОМ АНАЛИЗАТОРЕ

Основные процессы, которые участвуют в нейтрализации ионов плазмы, представлены на рис. 5 в виде пространственного распределения скоростей нейтрализации вдоль вертикальной линии наблюдения анализатора. Расчёты были выполнены с помощью плазмозфизического кода DOUBLE-MC [8]. В качестве примера на рисунке показаны результаты расчётов для ионов дейтерия с энергией 50 кэВ.

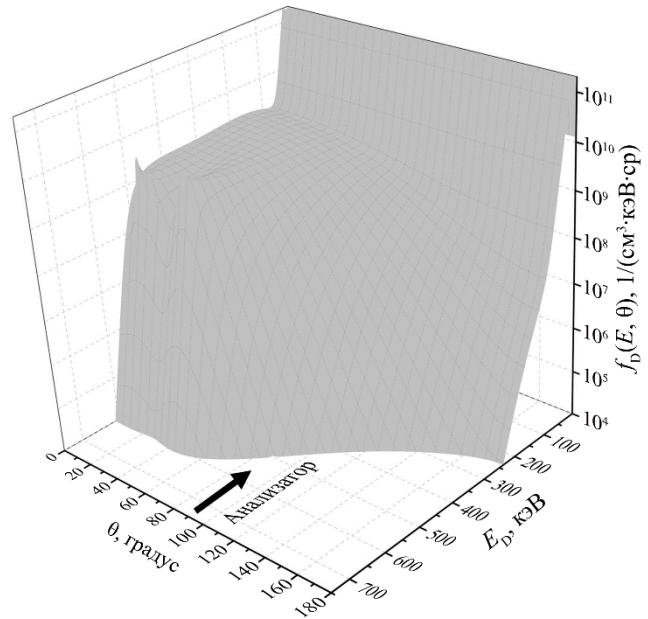


Рис. 4. Функция распределения энергии и питч-угла ионов нагревных пучков на выбранной магнитной поверхности ( $\rho = 0,7$ ):  $\rightarrow$  — направление, соответствующее на данном распределении питч-углу атомов, регистрируемых анализатором

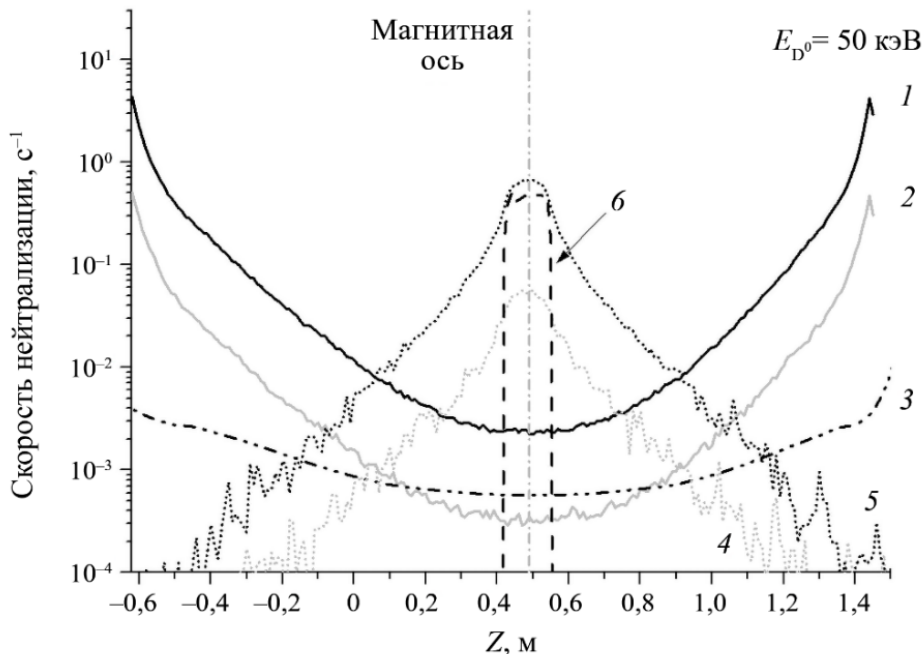


Рис. 5. Скорость нейтрализации ионов с энергией 50 кэВ для различных процессов в зависимости от малого радиуса токамака: 1 — перезарядка на атомах дейтерия, поступающих в плазму со стенки токамака; 2 — перезарядка на атомах водорода, поступающих в плазму со стенки токамака; 3 — радиационная рекомбинация; 4 — перезарядка на гало атомов дейтерия; 5 — перезарядка на гало атомов водорода; 6 — перезарядка на атомах диагностического пучка

Видно, что в нейтрализации участвует множество процессов, причём их роль меняется в зависимости от области плазмы. В области, близкой к центру плазмы (соответствует вертикальной координате 0,49 м), при инъекции диагностического пучка доминируют процессы перезарядки ионов на атомах пучка и его гало. Дейтериевые и водородные атомы гало пучка — это вторичные атомы, которые образуются в результате перезарядки соответствующих ионов плазмы на атомах пучка. На краю плазмы нейтрализация ионов происходит в основном за счёт перезарядки на атомах, проникающих в плазму со стенок токамака. В промежуточной области основную роль играют процессы перезарядки ионов на атомах гало пучка и атомах, проникающих в плазму со стенок токамака.

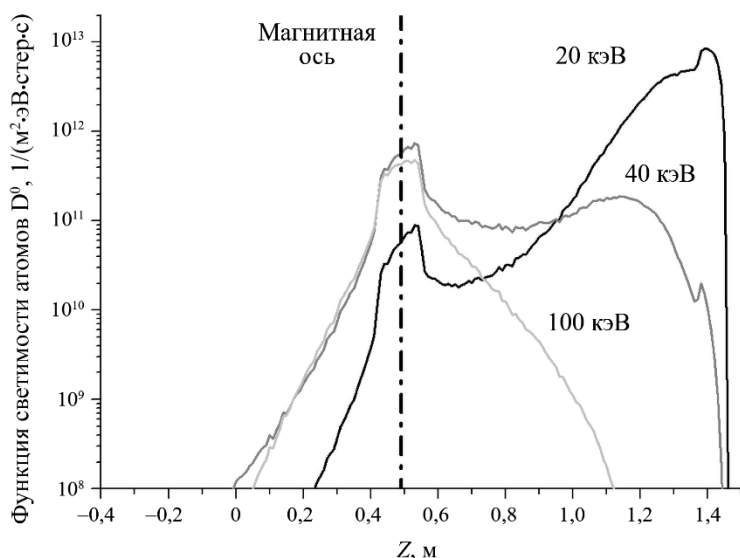


Рис. 6. Пространственные профили функций светимости вылетающих из плазмы атомов дейтерия с энергиями 20, 40 и 100 кэВ вдоль линии наблюдения анализатора для «активного» варианта корпускулярной диагностики (с инъекцией в плазму диагностического пучка)

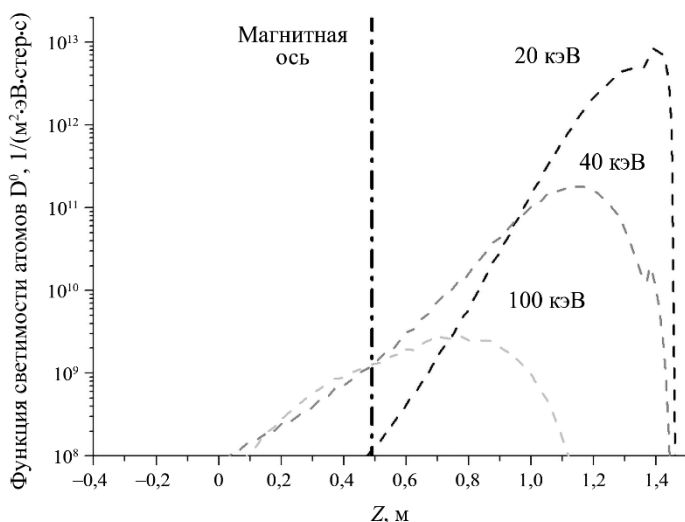


Рис. 7. Пространственные профили функций светимости вылетающих из плазмы атомов дейтерия с энергиями 20, 40 и 100 кэВ вдоль линии наблюдения анализатора для «пассивного» варианта корпускулярной диагностики (без инъекции в плазму диагностического пучка)

Для оценки пространственного разрешения, которое могут обеспечить измерения с помощью корпускулярной диагностики, были рассчитаны функции светимости вылетающих из плазмы атомов дейтерия и водорода. Функция светимости определяет вероятность вылета атомов вдоль линии наблюдения анализатора в зависимости от радиуса плазмы. Для атомов определённой энергии она является произведением локальных значений плотности исходных ионов, скорости их нейтрализации и коэффициента ослабления атомов при вылете из плазмы. Результаты расчётов функций светимости атомов различных энергий для случаев использования «активного» и «пассивного» вариантов диагностики представлены соответственно на рис. 6, 7. Важно отметить, что приведённые на рис. 6 данные являются суммой «активного» и «пассивного» сигналов.

На основании сравнения результатов, представленных на этих рисунках, можно сделать несколько выводов.

Во-первых, использование диагностического пучка атомов с выбранными параметрами позволяет получить достаточно хороший контраст «активных» измерений, т.е. превышение «активного» сигнала над «пассивным».

Во-вторых, для атомов с энергией выше 40 кэВ наличие гало пучка не приводит к существенному пространственному размытию нейтрализационной мишени. Источник нейтрализованных ионов достаточно хорошо локализован, и его размеры определяются размерами диагностического пучка. В данном случае это соответствует области, ограниченной ~13 см.

В-третьих, использование диагностики в «пассивном» варианте существенно снижает её возможности. Пространственное разрешение ухудшается до значения  $\sim 30$  см. При этом локализация источника нейтрализованных ионов становится зависимой от их энергии, т.е. атомы разных энергий вылетают из разных областей плазмы. В этом случае, очевидно, интерпретация экспериментальных данных диагностики будет также существенно зависеть от пространственных распределений параметров плазмы и точности их измерений, которые обеспечиваются другими диагностическими системами.

Для оценки временного разрешения, которое может обеспечить корпускулярная диагностика, были проведены расчёты ожидаемых скоростей счёта атомов дейтерия и водорода в каналах анализатора атомов, имеющего следующие стандартные характеристики: эффективность регистрации — 30%, энергетическая ширина детекторного канала — 5%, телесный угол сбора —  $3 \cdot 10^{-10}$  см<sup>2</sup>·стер. Результаты расчётов представлены на рис. 8 (дейтерий) и рис. 9 (водород) в виде зависимости скоростей счёта от энергии регистрируемых атомов для «теплого» энергетического диапазона, который обычно используется при измерении ионной температуры и изотопного состава плазмы (до  $\sim 10T_i^{\max}$ ). Полученные результаты позволяют сделать вывод о том, что измерения ионной температуры и изотопного отношения плазмы будут ограничены более узким энергетическим диапазоном. Видно, что для «активного» варианта диагностики энергетическая зависимость скорости счёта атомов дейтерия выше энергии  $\sim 160$  кэВ искажена присутствием частиц нагревных пучков. Для «пассивного» варианта диагностики эта область ограничена энергией  $\sim 60$  кэВ.

Учитывая ограничения по энергии, связанные с присутствием частиц нагревных пучков и частиц гало диагностического пучка, можно сделать вывод о том, что наиболее оптимальными с точки зрения измерения изотопного соотношения и ионной температуры будут следующие диапазоны энергии: от 40 до 120 кэВ — для «активного» варианта, от 10 до 60 кэВ — для «пассивного» варианта. При этом временное разрешение составит величину  $\sim 10$  мс и  $\sim 1$  мс соответственно.

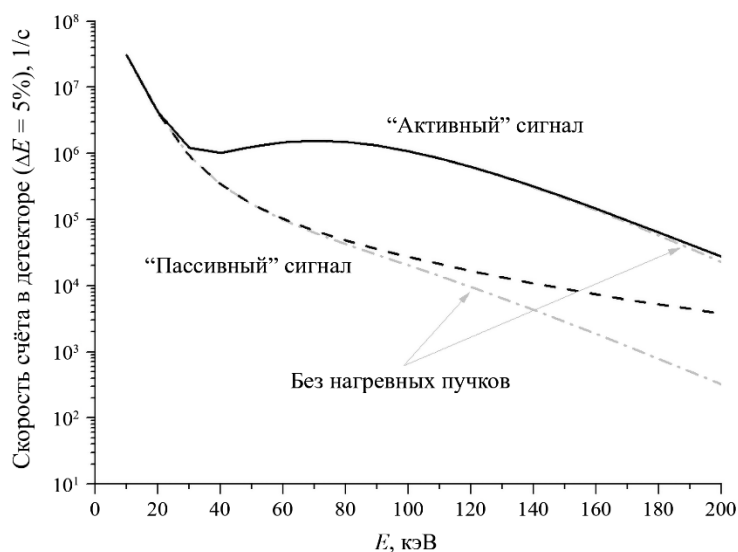


Рис. 8. Пространственные профили функций светимости вылетающих из плазмы атомов дейтерия с энергиями 20, 40 и 100 кэВ вдоль линии наблюдения анализатора для «пассивного» варианта корпускулярной диагностики (без инжекции в плазму диагностического пучка)

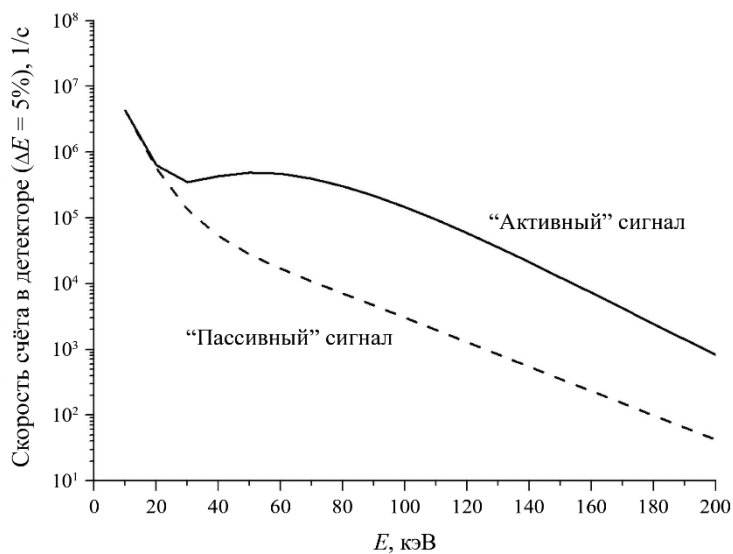


Рис. 9. Скорость счёта атомов водорода в детекторных каналах атомного анализатора в зависимости от энергии для «активного» (при инжекции пучка) и «пассивного» (при отсутствии пучка) варианта корпускулярной диагностики

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Рассмотрены возможности использования «активного» (с инжекцией в плазму диагностического пучка атомов) и «пассивного» (без инжекции) вариантов корпускулярной диагностики на установке ТРТ для предварительного этапа работы установки с дейтериево-водородной плазмой.

Показано, что для того, чтобы исключить искажение энергетических спектров атомов дейтерия частицами нагретых пучков, необходимо ограничить энергетический диапазон измерения от 40 до 120 кэВ — для «активного» варианта и от 10 до 60 кэВ — для «пассивного» варианта. В этом случае диагностика обеспечит измерение ионной температуры и изотопного состава плазмы с временным разрешением не хуже 1 мс для «активного» варианта и 10 мс — для «пассивного» варианта. В «активном» варианте диагностики локальность измерений будет определяться только размерами пучка и для рассматриваемой схемы расположения оборудования составит ~13 см. В «пассивном» варианте пространственное разрешение ухудшается до ~30 см. При этом локализация источника нейтрализованных ионов становится зависимой от энергии, а интерпретация экспериментальных данных в этом случае потребует привлечения информации о пространственных распределениях параметров плазмы, измерение которых обеспечивается другими диагностическими системами.

Работа выполнена при финансовой поддержке за счёт средств государственного контракта от 17.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1060 «НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023—2024 годов».

## 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. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепция, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. — *Физика плазмы*, 2021, т. 47, с. 970—985; doi: 10.31857/S0367292121110196.
2. Afanasyev V.I., Chernyshev F.V., Kislyakov A.I., Kozlovski S.S., Lyublin V.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. — *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. A*, 2010, vol. 621, p. 456—467; doi: 10.1016/j.nima.2010.06.201.
3. Петров С.Я., Афанасьев В.И., Мельник А.Д., Миронов М.И., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г., Петров М.П., Чернышев Ф.В., Кедров И.В., Кузьмин Е.Г., Люблин Б.В., Козловский С.С., Мокеев А.Н. Особенности конструкции системы диагностики по потокам атомов изотопов водорода для международного термоядерного реактора ИТЭР. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2016, т. 39, вып. 1, с. 68—80; doi: 10.21517/0202-3822-2016-1-67-80.
4. Афанасьев В.И., Гончаров П.Р., Мельник А.Д., Миронов М.И., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В. Перспективы применения диагностики по потокам атомов токамака с реакторными технологиями. — *Физика плазмы*, 2022, т. 48, с. 675—684; doi: 10.31857/S0367292122100031.
5. Afanasyev V.I., Melnik A.D., Mironov M.I., Navolotsky A.S., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya., Chernyshev F.V., Shmitov R.Yu. Possibilities of Using Active Neutral Particle Diagnostics at the TRT Facility. — *Plasma Phys. Rep.*, 2024, vol. 50, p. 524—529; doi: 10.1134/S1063780X24600142.
6. Леонов В.М., Коновалов С.В., Жоголев В.Е., Кавин А.А., Красильников А.В., Куянов А.Ю., Лукаш В.Э., Минеев А.Б., Хайрутдинов Р.Р. Сценарии разряда токамака с реакторными технологиями. — *Физика плазмы*, 2021, т. 47, с. 986—997; doi: 10.31857/S0367292121120040.
7. Давыденко В.И., Иванов А.А., Ступишин Н.В. Концептуальный проект диагностического инжектора пучка атомов водорода для токамака TRT. — *Физика плазмы*, 2022, т. 48, с. 694—699; doi: 10.31857/S0367292122100080.
8. Миронов М.И., Чернышев Ф.В., Афанасьев В.И., Мельник А.Д., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я. Плазмозфический код DOUBLE-МС: моделирование потоков атомов, выходящих из плазмы. — *Физика плазмы*, 2021, т. 47, с. 29—39; doi: 10.31857/S0367292121010108.



Максим Игоревич Миронов, старший научный сотрудник; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2; старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
maxim@npd.ioffe.ru



Валерий Иванович Афанасьев, главный научный сотрудник; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2; заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
val@npd.ioffe.ru



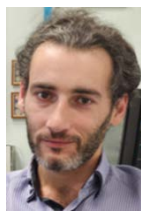
Павел Романович Гончаров, заведующий лабораторией, к.ф.-м.н.; Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 195251, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 29, Россия  
p.goncharov@spbstu.ru



Андрей Дмитриевич Мельник, научный сотрудник; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2; научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
amelnik@npd.ioffe.ru



Андрей Сергеевич Наволоцкий, младший научный сотрудник; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
anavolotsky@mail.ioffe.ru



Владислав Георгиевич Несеневич, научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
nesenevich@npd.ioffe.ru



Михаил Петрович Петров, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
mpetrov@npd.ioffe.ru



Сергей Яковлевич Петров, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
spetrov@npd.ioffe.ru



Федор Всеволодович Чернышев, ведущий научный сотрудник; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2; ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
fvc@npd.ioffe.ru



Роман Юрьевич Шмитов, старший инженер, ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, Политехническая ул., д. 26, Россия  
r.shmitov@mail.ioffe.ru

Статья поступила в редакцию 18 октября 2024 г.

После доработки 26 декабря 2024 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 40—47

УДК 533.9.082

## КОНЦЕПЦИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ «АКТИВНАЯ СПЕКТРОСКОПИЯ» НА УСТАНОВКЕ TRT

*Г.С. Павлова, С.Н. Тугаринов, Н.В. Кузьмин, В.В. Серов*

*Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия*

TRT (токамак с реакторными технологиями) должен стать важным шагом в реализации российской национальной программы управляемого термоядерного синтеза. Главная задача установки TRT — получение длительного плазменного импульса, что возможно только при использовании сверхпроводящих катушек. Для контроля параметров термоядерной плазмы требуются разработка и создание целого комплекса диагностических систем. Одной из проектируемых диагностических систем для TRT является диагностика активная спектроскопия (АС), обозначаемая в англоязычной литературе аббревиатурой CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy). В более ранней публикации [1] была рассмотрена возможность создания данной диагностики как на нагревном, так и на диагностическом пучке атомов и было показано, что диагностика будет работать только с использованием диагностического пучка атомов. При этом рассматривалась только реализация системы наблюдения в горизонтальной плоскости из экваториального патрубка установки TRT.

В данной статье представлена концепция вертикальной системы наблюдения для АС на установке TRT. Вертикальная система наблюдения необходима для измерения полоидальной скорости вращения на краю плазменного шнура. В статье представлены результаты моделирования спектральных профилей излучения из плазмы, приведены оценки уровней активного и фонового сигнала, а также соотношения сигнал—шум. Предложена схема проведения измерений для одновременной регистрации излучения по малому радиусу от  $r = 0,8a$  до  $r = a$ . Приведено описание оптической системы сбора излучения из плазмы, а также описание предполагаемой измерительной аппаратуры. Сделана оценка точности измерения отдельных параметров плазмы и достижимого пространственного разрешения.

**Ключевые слова:** TRT, токамак, диагностика плазмы, диагностический пучок атомов (DNB), активная спектроскопия (АС, CXRS).

## THE CONCEPT OF A VERTICAL OBSERVATION SYSTEM FOR CXRS DIAGNOSTICS AT THE TRT TOKAMAK

*G.S. Pavlova, S.N. Tugarinov, N.V. Kuzmin, V.V. Serov*

*Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia*

TRT (Tokamak with Reactor Technologies) should be an important step in the implementation of the Russian national program of controlled thermonuclear fusion. The main task of the TRT facility is to obtain a long-term plasma pulse, which is possible only if superconducting coils are used. To control the parameters of thermonuclear plasma it is necessary to develop and create a whole complex of diagnostic systems. One of the designed diagnostic systems for TRT is the diagnostics of «Active spectroscopy» (AS), referred to in the English literature by the abbreviation CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy). In an earlier publication [1] the possibility of creating this diagnostics was considered both on a heating and on a diagnostic beam of atoms, and it was shown that the diagnostics would work only using a diagnostic beam of atoms. At the same time, only the implementation of the observation system in the horizontal plane from the equatorial port of the TRT facility was considered.

This paper presents the concept of a vertical monitoring system for the diagnostics of AS on a TRT facility. A vertical observation system is necessary to measure the poloidal rotational velocity at the edge of the plasma cord. The paper presents the results of modeling of light spectral profiles emitted by plasma, estimates of the levels of active and background signals as well as the signal-to-noise ratio. The measurement scheme is proposed for simultaneous registration of emission over a small radius from  $r = 0,8a$  to  $r = a$ . The optical system for collecting light from plasma is described, as well as a description of the proposed measuring equipment plasma parameters and the achievable spatial resolution is estimated.

**Key words:** TRT, tokamak, plasma diagnostics, diagnostic neutral beam (DNB), Active spectroscopy (AS, CXRS).

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Для управления работой установки ТРТ и контроля параметров термоядерной плазмы необходимо создание целого ряда диагностических систем. Одной из важнейших составляющих в этом ряду диагностик является активная спектроскопия (АС). В англоязычной литературе эта диагностика обозначается аббревиатурой CXRS (Charge eXchange Recombination Spectroscopy). Диагностика АС, которая создаётся на базе нагревного или диагностического пучка атомов, широко используется на всех современных токамаках, поскольку с её помощью измеряются такие важные параметры плазмы, как профиль ионной температуры, распределение концентрации лёгких примесей в плазме, а также скорости тороидального и полоидального вращения плазмы [2, 3]. Кроме того, зная эти параметры, можно определить радиальное электрическое поле плазмы, которое важно при исследовании причин уменьшения переноса тепла и частиц с аномальных значений до неоклассических в области наружного транспортного барьера [4].

Основной задачей данной работы являлась разработка концепции вертикальной системы наблюдения для диагностики АС на установке ТРТ, которая необходима для измерения полоидальной скорости вращения плазмы. Для этого было проведено моделирование работы диагностики АС при использовании разработанной системы сбора света для различных плазменных сценариев на установке. Рассматривалась возможность реализации АС с использованием разрабатываемого в настоящее время диагностического пучка атомов водорода (Diagnostic Neutral Beam, DNB).

По результатам моделирования были предложены возможные схемы интеграции элементов диагностики АС в вертикальном патрубке ТРТ. Проработана система сбора излучения из плазмы, позволяющая получить необходимое пространственное разрешение для получения радиальных профилей измеряемых параметров плазмы.

## 2. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДИАГНОСТИКИ АС ДЛЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ НА ТОКАМАКЕ ТРТ

На рис. 1 показана схема измерений при наблюдении из верхнего патрубка ТРТ и 3D-модель многохордовой системы наблюдения диагностического пучка атомов. Областью наблюдения является периферийная плазма в области значений малого радиуса от  $r = 0,8a$  до  $r = a$ .

Для регистрации спектров предполагается использование светосильного спектрометра-полихроматора высокого разрешения на основе прозрачных голографических дифракционных решёток, разработанного для ИТЭР [5]. Он позволяет регистрировать спектральные профили излучения плазмы в трёх спектральных диапазонах одновременно: «синем» ( $4680 \pm 50 \text{ \AA}$ ), «зелёном» ( $5270 \pm 50 \text{ \AA}$ ) и «красном» ( $6560 \pm 60 \text{ \AA}$ ). Использование оптики  $F/3$  обеспечивает высокую светосилу спектрометра. Кроме того, прибор обладает высоким спектральным разрешением на уровне  $0,2 \text{ \AA}$  и высокой обрат-

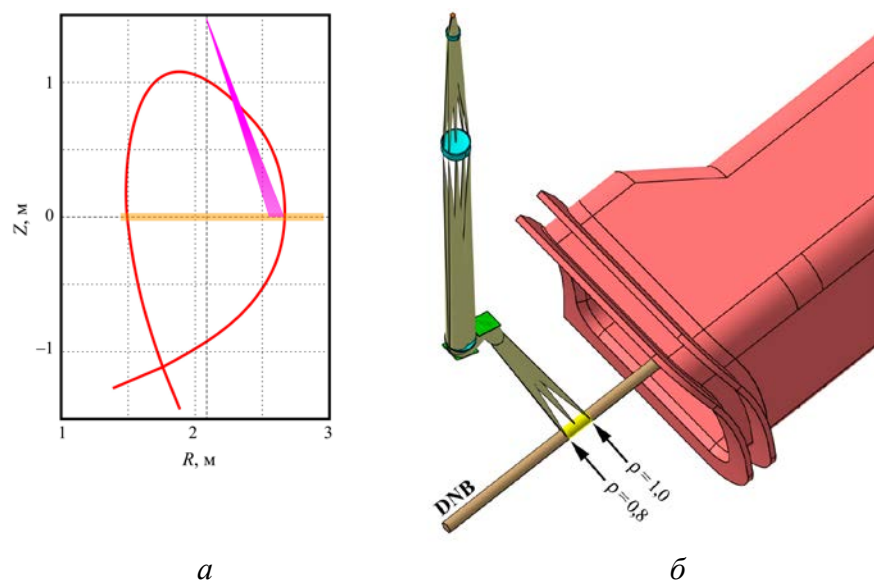


Рис. 1. Схема измерений при наблюдении из верхнего патрубка ТРТ (а) и 3D-модель многохордовой системы наблюдения (б): — линии наблюдения; — сепаратриса; — диагностический пучок

ной линейной дисперсией: 3,4 Å/мм для «синего» канала, 3,6 Å/мм для «зелёного» канала и 5,0 Å/мм для «красного» канала.

Применение этого спектрометра позволяет проводить одновременные измерения спектров следующих линий: He II (4—3) 4685 Å в «синем» канале, Ne X (11—10) 5249 Å и C VI (8—7) 5291 Å в «зелёном» канале, а также H-альфа (3—2) 6563 Å в «красном» канале.

Для оценки того, с какой точностью предложенная конфигурация системы наблюдения позволит проводить измерения параметров плазмы, проведено моделирование в коде Simulation of Spectra (SOS) [6]. Этот код широко применяется для моделирования АС и был верифицирован на токамаках JET [7], TEXTOR [8] и EAST [9].

**Входные данные.** Моделирование проводилось для двух точек наблюдения из экваториального патрубка TRT с радиусами  $r = 0,8a$  и  $r = 0,95a$ . В работе [1] показано, что построение диагностики АС на TRT невозможно на нагревных пучках из-за слишком низкого сечения реакции перезарядки при высоких энергиях столкновения атомов пучка и ионов плазмы, и наилучший вариант для проведения измерений — это разрабатываемый для TRT диагностический пучок. Поэтому вертикальная система АС, как и система наблюдения в горизонтальной плоскости из экваториального патрубка, строится на диагностическом пучке. Это водородный пучок с дуговым генератором плазмы, имеющим наилучший компонентный состав пучка, с соотношением энергетических компонент  $E_0:E_0/2:E_0/3$  по мощности 0,78:0,13:0,09, расходимостью 7 мрад, эквивалентным током в основной энергетической компоненте 4,5 А и полушириной 100 мм на границе плазмы [10]. Для моделирования АС в верхнем патрубке была выбрана энергия пучка 80 кэВ — одна из оптимальных энергий пучка, предложенных в работе [1].

Были рассмотрены два сценария работы установки TRT с существенно отличающимися плотностями плазмы: D—D-сценарий со средней плотностью  $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , полем 8 Тл и током 5 МА и D—Т-сценарий со средней плотностью  $\langle n_e \rangle = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , полем 8 Тл и током 3 МА. Параметры плазмы в этих сценариях показаны на рис. 2. Ионная и электронная температуры, а также электронная плотность плазмы взяты из работы [11].

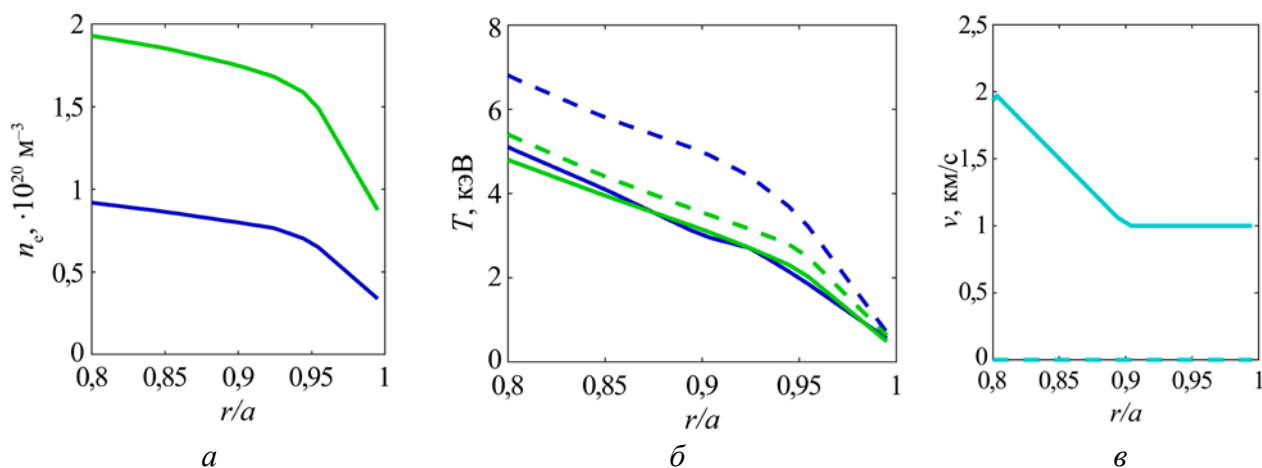


Рис. 2. Профили параметров плазмы для внешней части плазменного шнура в сценариях со средней концентрацией электронов  $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и  $\langle n_e \rangle = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , которые использовались в моделировании: а — концентрация электронов (— — разряд с  $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , — — разряд с  $\langle n_e \rangle = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ ); б — ионная температура (—, — —  $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и  $\langle n_e \rangle = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  соответственно) и электронная температура (— — —, — — — —  $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  и  $\langle n_e \rangle = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  соответственно); в — тороидальная (— — —) и полоидальная (—) скорости вращения плазмы

Так как расчётов тороидальной и полоидальной скоростей вращения для этих сценариев ещё не проводилось, а ключевой задачей вертикальной системы наблюдения диагностики будет измерение полоидальной скорости вращения плазмы, то для моделирования был задан профиль полоидальной скорости во внешней части плазменного шнура (от  $r = 0,8a$  до  $r = a$ ) такой, что для точки наблюдения  $r = 0,8a$  скорость полоидального вращения была равна 2 км/с, а для точки наблюдения  $r = 0,95a$  она

была равна 1 км/с. Эти значения были выбраны исходя из оценок полоидальных скоростей вращения плазмы для токамака ИТЭР, которые используются для моделирования в коде SOS [6]. Вектор скорости вращения направлен вниз, что приводит к красному смещению спектральных линий, наблюдаемых из верхнего патрубка TRT.

В области транспортных барьеров перенос тепла и частиц снижается от аномального до, практически, неоклассического уровня, и профили концентрации ядер примеси приобретают существенно большие градиенты в сравнении с профилем плотности изотопов водорода и электронов. Но для оценки работы диагностики достаточно приблизительных значений концентрации примесей, поэтому для упрощения профили плотности ионов рабочего газа и ядер примесей считались подобными электронным, и для моделирования были выбраны следующие значения их концентраций:  $n_{D+T} = 0,83n_e$ ,  $n_{He} = 0,04n_e$ ,  $n_C = 0,01n_e$ ,  $n_{Ne} = 0,003n_e$ . Данный компонентный состав соответствует эффективному заряду плазмы  $Z_{эф} = 1,65$ .

При моделировании использовались параметры светосильного спектрометра-полихроматора, с помощью которого будут проводиться измерения на TRT. Было выбрано значение ширины щели спектрометра  $S_w = 0,4$  мм, что соответствует ширине одного ряда оптических волокон. Для каждой точки наблюдения высота щели спектрометра  $S_H$  была задана равной 10 мм. При такой конфигурации на реальную щель спектрометра высотой 20 мм можно будет передать сигнал сразу с двух пространственных каналов, поместив перед её нижней половиной ряд волокон, передающих свет из одной точки наблюдения, а перед верхней — из другой. При проведении моделирования время экспозиции было задано равным 10 мс. Эта величина будет являться временным разрешением для диагностической системы АС.

**Результаты моделирования.** В коде SOS используются заданные входные данные и атомные данные из базы данных ADAS (Atomic Data and Analysis Structure) [12], с помощью которых он рассчитывает ослабление пучка при его прохождении через плазму и компоненты спектра: спектральную линию активной перезарядки (ACX — Active Charge eXchange), возникающую при перезарядке ионов плазмы на атомах пучка; спектральную линию пассивной перезарядки (PCX — Passive Charge eXchange), возникающую при перезарядке на атомах водорода, поступающих со стенки вакуумной камеры; спектральные линии атомов и не полностью ионизованных примесей с границ, которые возбуждаются электронным ударом, а также фоновое тормозное излучение.

Для оценки соотношения сигнал—шум (SNR) и погрешностей определения параметров плазмы к модельным спектрам с помощью генератора случайных чисел с гауссовой функцией распределения вероятностей добавляется статистический шум, среднеквадратичное отклонение которого для каждого пикселя соответствует квадратному корню из числа отсчётов. SNR для спектральной линии активной перезарядки вычисляется как отношение числа отсчётов активного сигнала к уровню шумов, а для оценки погрешностей измерения параметров плазмы проводится аппроксимация спектра набором гауссиан с помощью метода наименьших квадратов, и статистическая погрешность определяется как доверительный интервал 95%.

На рис. 3 представлены спектры He в «синем» канале спектрометра, полученные в точке наблюдения  $\rho = r/a = 0,8$  для D—D-сценария TRT со средней концентрацией электронов  $\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (см. рис. 3, а) и для D—Т-сценария с  $\langle n_e \rangle = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  (см. рис. 3, б). Показаны линии активной (красный цвет) и пассивной (синий цвет) перезарядки He II с длиной волны перехода 4686 Å, а также линии He II с длиной волны 4686 Å и C III с длинами волн 4650 и 4651 Å с границ (чёрный цвет). Пунктирной линией показан уровень фонового тормозного излучения плазмы, а зелёной линией — суммарный спектр с добавленными шумами. Из-за того, что в начале своего пути через плазму диагностический пучок не сильно ослаблен, уровень активного сигнала для этой точки наблюдения высокий (SNR ~ 116) в обоих сценариях, и это позволяет определить параметры плазмы с низкими статистическими погрешностями: в сценарии с низкой плотностью погрешность определения ионной температуры составляет 0,13%, амплитуды линии — 0,07% и проекции скорости на линию наблюдения — 0,23 км/с, что соответствует относительной погрешности 11% для полоидальной скорости 2 км/с. Для сценария с высокой плотностью плазмы погрешности почти такие же, как для сценария с низкой плотностью.

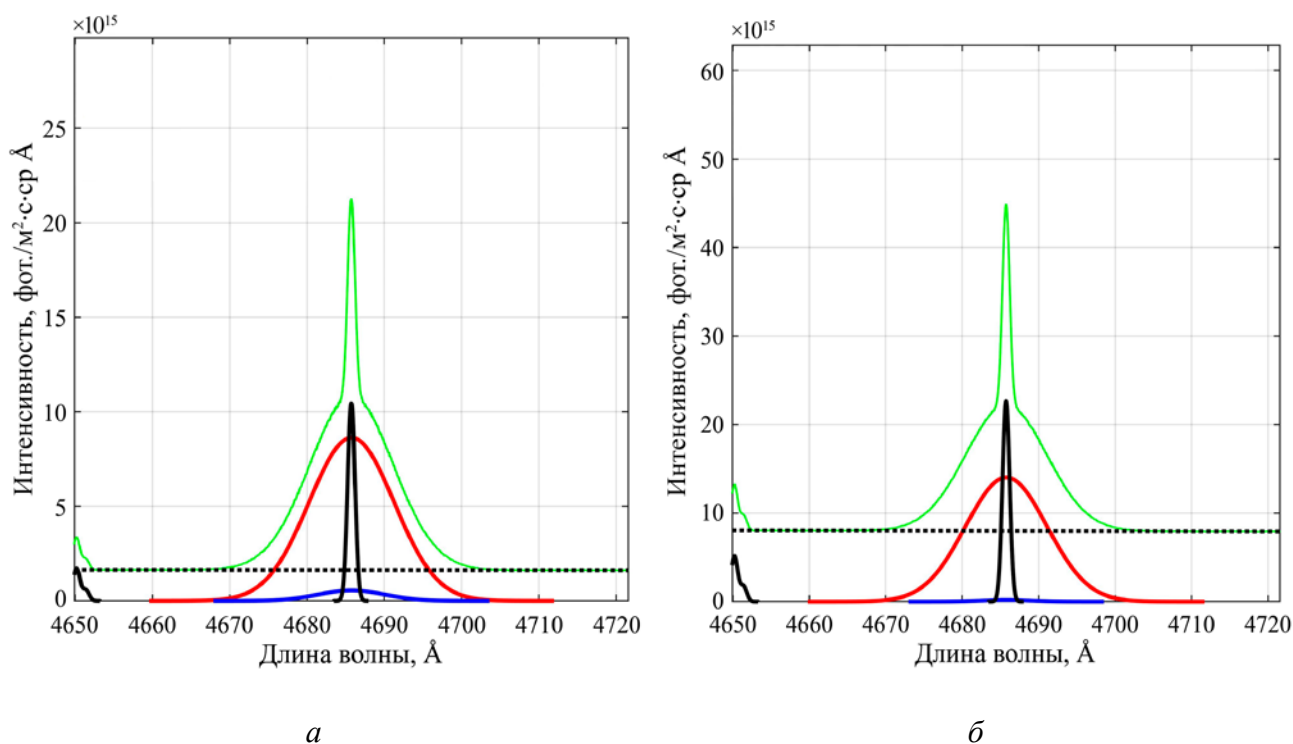


Рис. 3. Спектр в синем канале спектрометра, смоделированный в SOS для точки наблюдения  $\rho = r/a = 0,8$  для D—D-сценария (а) и для D—Т-сценария (б). Спектр содержит активные (ACX) и пассивные (PCX) линии He II (4686 Å). Для спектральной линии ACX He соотношение сигнал—шум  $\text{SNR} = 115,54$  (а), 116,02 (б) и статистические погрешности определения скорости  $v_{\text{EIT}} = 0,23$  км/с, температуры ионов  $t_{\text{EIT}} = 0,13\%$  (а), 0,14% (б) и амплитуды линии  $a_{\text{EIT}} = 0,07\%$ .

На рис. 4 представлены спектры C и Ne в «зелёном» канале спектрометра, полученные в точке наблюдения  $\rho = r/a = 0,8$  для D—D- и D—Т-сценариев TRT. Показаны линии активной (красный цвет) и пассивной (синий цвет) перезарядки C VI с длиной волны перехода 5291 Å, активной (пурпурный цвет) и пассивной (голубой цвет) перезарядки Ne X с длиной волны перехода 5249 Å, а также линии с границ (чёрный цвет): три линии C II с длинами волн 5257, 5259 и 5260 Å, линия C VI с длиной волны 5291 Å, линия C III с длиной волны 5305 Å и четыре линии Ne I с длинами волн 5287, 5292, 5294 и 5298 Å. Пунктирной линией показан уровень фонового тормозного излучения плазмы, а зелёной линией — суммарный спектр с добавленными шумами. Для спектральных линий C и Ne SNR немного выше, чем для He, что приводит к чуть меньшим величинам погрешностей измерения температуры и амплитуды линии. Погрешность определения проекции скорости на линию наблюдения составляет 0,09 км/с для линии C VI и 0,08 км/с для линии Ne X, что соответствует относительной погрешности 4—5% для полоидальной скорости 2 км/с.

Для радиуса  $r/a = 0,95$  диагностический пучок ослаблен ещё меньше, чем для  $r/a = 0,8$ , что приводит к большему соотношению сигнал—шум и меньшим величинам погрешностей измерения параметров плазмы. В табл. 1 для разных примесей, точек наблюдения и сценариев показаны полученные с помощью моделирования абсолютные случайные погрешности определения полоидальной скорости вращения плазмы, определённые по формуле  $\sigma_{\text{pol}} = \sigma_{\text{abs}}/\cos\alpha$ , где  $\alpha$  — угол между линией наблюдения и полоидальным направлением,  $\sigma_{\text{abs}}$  — абсолютная погрешность определения проекции скорости на линию наблюдения. Видно, что наибольшей точностью будут обладать измерения, проводимые по спектральным линиям C VI, и минимальная полоидальная скорость, которую можно измерять по этим линиям со статистической погрешностью не выше 10% для всех точек наблюдения в интервале значений малого радиуса от  $r = 0,8a$  до  $r = a$ , равна 0,9 км/с.

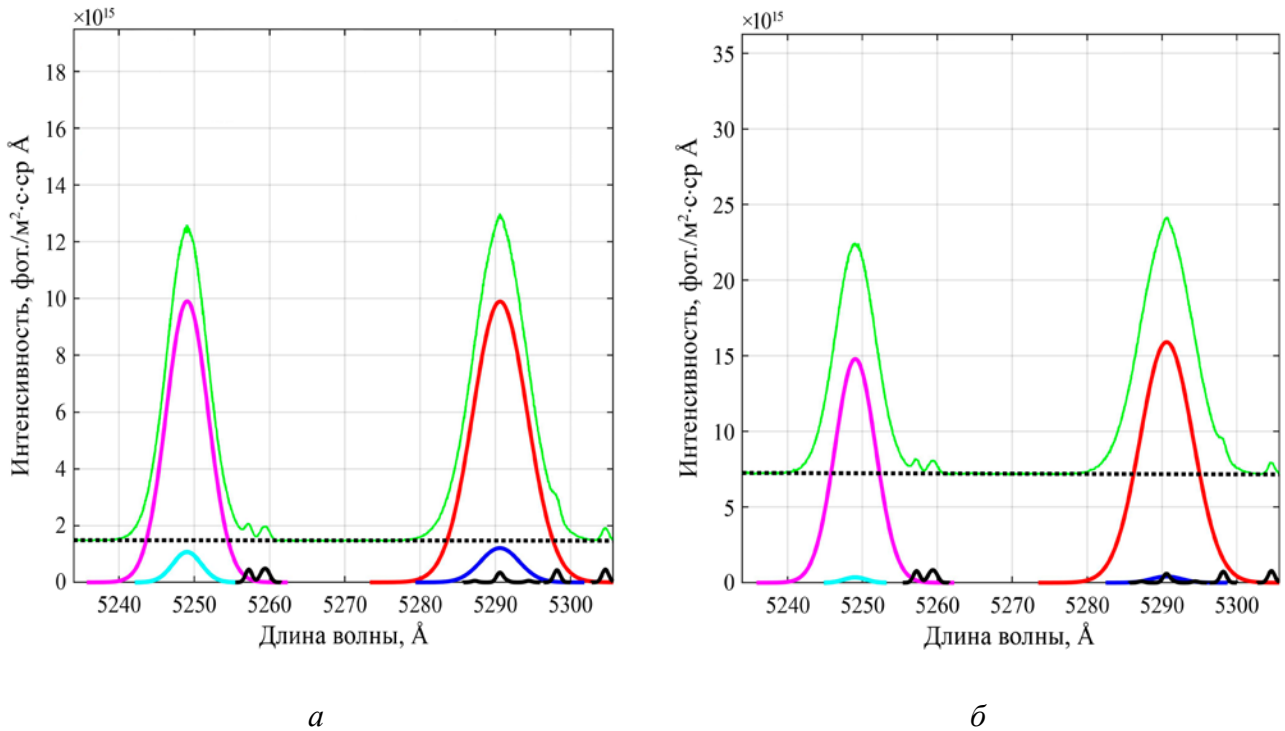


Рис. 4. Спектр в зелёном канале спектрометра, смоделированный в SOS для точки наблюдения  $\rho = r/a = 0,8$  для D—D-сценария (а) и для D—Т-сценария (б). Спектр содержит активные (АСХ) и пассивные (РСХ) линии С VI (5291 Å) и Ne X (5249 Å). Для спектральной линии АСХ Ne соотношение сигнал—шум SNR = 128,63 (а), 132,36 (б) и статистические погрешности определения скорости  $v_{EIT} = 0,09$  км/с (а),  $v_{EIT} = 0,08$  км/с (б), температуры ионов  $t_{EIT} = 0,10\%$  и амплитуды линии  $a_{EIT} = 0,07\%$

Таблица 1. Абсолютные случайные погрешности определения полоидальной скорости вращения плазмы  $\sigma_{pol}$ , оцененные с помощью моделирования в SOS

Спектральная линия	$\langle n_e \rangle = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (D—D-сценарий)		$\langle n_e \rangle = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ (D—Т-сценарий)	
	$r/a = 0,8$	$r/a = 0,95$	$r/a = 0,8$	$r/a = 0,95$
He II (переход 4—3, 4686 Å)	0,23 км/с	0,13 км/с	0,23 км/с	0,10 км/с
C VI (переход 8—7, 5291 Å)	0,09 км/с	0,06 км/с	0,08 км/с	0,04 км/с
Ne X (переход 11—10, 5249 Å)	0,10 км/с	0,06 км/с	0,09 км/с	0,05 км/с

В коде SOS было также оценено пространственное разрешение измерений, проводимых при помощи предложенной конфигурации диагностики. С учётом эффекта гало [13], который может существенно повлиять на пространственное разрешение, оно не хуже 20 мм для внешней области плазменного шнура, наблюдаемой из верхнего патрубка ТРТ.

### 3. ПРЕДПОЛАГАЕМАЯ СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОЙ СИСТЕМЫ НАБЛЮДЕНИЯ ДЛЯ ДИАГНОСТИКИ АС

После проведения моделирования схема построения вертикальной системы наблюдения для диагностики АС была проработана детально. Для сбора и вывода излучения из плазмы была спроектирована оптическая система, которая строит изображение диагностического пучка в заданном масштабе 7:1. Из плоскости изображения оптической системы излучение передаётся на спектрометры с использованием оптоволоконного коллектора. Таким образом, на щель спектрометра попадает свет с прямоугольного участка пучка, который вытянут в тороидальном направлении перпендикулярно направлению инъекции пучка.

Основные требования к оптической системе следующие:

- соответствие выходного телесного угла светосиле спектрометра ( $F/3$ );
- увеличение системы — 1:7, чтобы половина высоты входной щели спектрометра (10 мм) соответствовала области пучка в плазме с высокой плотностью атомов (менее, чем ширина пучка атомов на полувысоте);
- пространственное разрешение — порядка 10 мм во всем диапазоне рабочих длин волн в области наблюдения.

На основе этих требований была разработана оптическая схема построения изображения исследуемого участка плазмы при наблюдении из вертикального патрубка установки TRT. Схема наблюдения из вертикального патрубка установки TRT представлена на рис. 5.

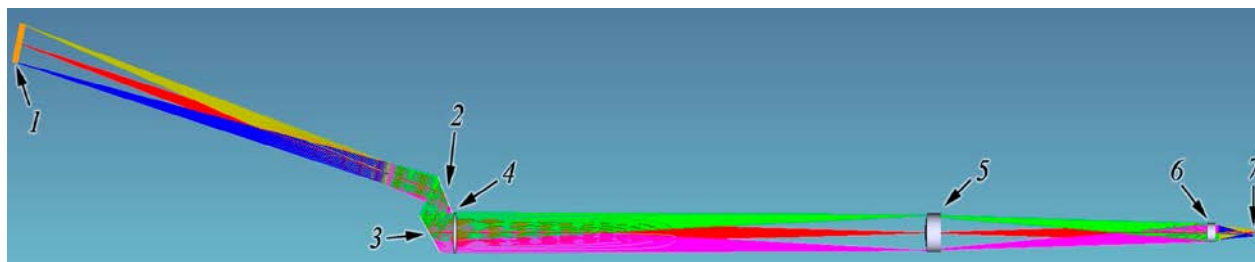


Рис. 5. Схема наблюдения из вертикального патрубка установки TRT: 1 — наблюдаемый участок плазмы; 2, 3 — первое и второе зеркало; 4, 5, 6 — первая, вторая и третья линзы; 7 — плоскость изображения

Излучение из области прохождения диагностического пучка через плазму 1 (см. рис. 5) с помощью плоского первого 2 и второго 3 зеркал направляется на систему из трёх линз 4, 5 и 6, строящих изображение пучка в плоскости изображения 7. Интеграция оптических элементов системы сбора света в верхнем патрубке TRT и область наблюдения диагностического пучка представлены на рис. 6.

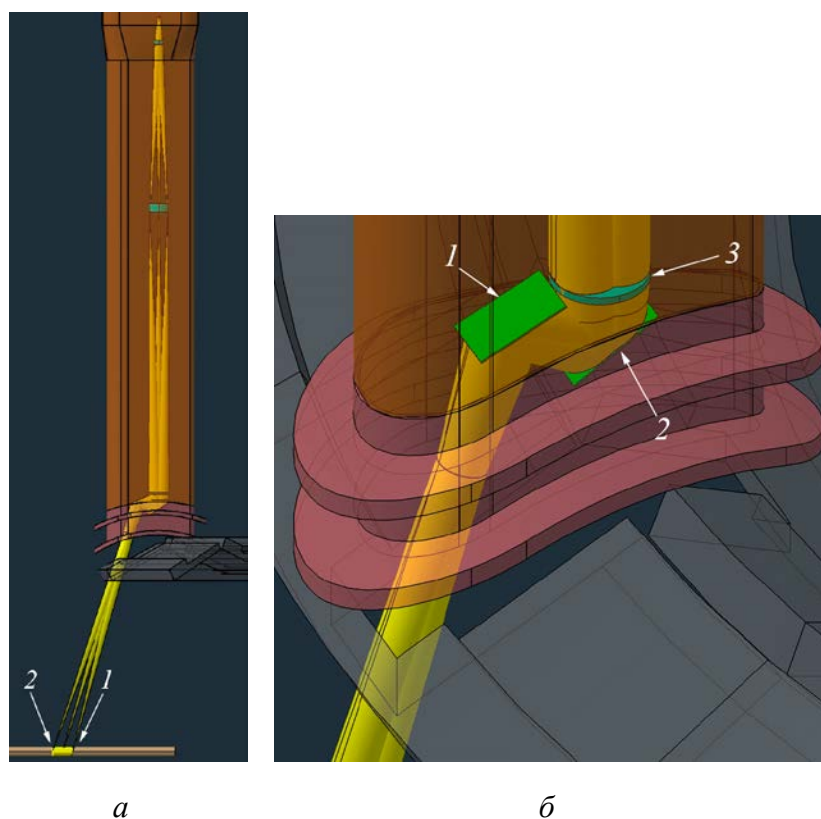


Рис. 6. Интеграция оптических элементов в верхнем патрубке TRT: 1 — точка  $r = 0,8a$ ; 2 — точка  $r = a$  (а); область наблюдения диагностического пучка: 1, 2 — первое и второе плоские зеркала; 3 — первая линза (б)

Оптическая системы сбора света была оптимизирована с использованием программного обеспечения ZEMAX [14]. Рассчитанные параметры оптических элементов приведены в табл. 2.

Все оптические элементы получились достаточно компактными и технологичными. Опыт разработки диагностики АС для ИТЭР показывает, что изготовление соответствующих линз и зеркал не составит большой проблемы. Величина пространственного разрешения, которую позволяет получить оптимизированная оптическая система сбора света, приведена в табл. 3.

Видно, что пространственное разрешение предлагаемой оптической системы соответствует заложенным требованиям порядка 10 мм во всей области наблюдения.

Таблица 2. Параметры элементов оптической системы сбора света

Элемент	Ширина, мм	Высота, мм	Толщина, мм	Кривизна передней поверхности, мм	Кривизна задней поверхности, мм
Первое зеркало	80	120	—	$\infty$	—
Второе зеркало	88	128	—	$\infty$	—
Первая линза	120 (диаметр)		14	800	700
Вторая линза	114 (диаметр)		50	261	-424
Третья линза	58 (диаметр)		30	127	374

Таблица 3. Пространственное разрешение оптической системы сбора света в зависимости от малого радиуса плазмы, полученное в результате оптимизации в ZEMAX

Нормированный малый радиус плазмы $r/a$	Пространственное разрешение, мм
1,00	10,4
0,9	7,6
0,8	10,8

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Данная работа посвящена разработке концепции вертикальной системы наблюдения для диагностики АС на установке TRT. Было проведено моделирование работы этой диагностики для различных рабочих сценариев установки TRT. Областью наблюдения для вертикальной системы будет являться периферийная плазма в области значений малого радиуса от  $r = 0,8a$  до  $r = a$ . Было показано, что диагностика АС будет успешно работать при использовании диагностического пучка атомов водорода с энергией 80 кэВ/а.е.м. — как в плазме со средней плотностью  $n_e = 1 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$ , так и при средней плотности  $n_e = 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$  измерения будут возможны во всей наблюдаемой области плазмы. По результатам моделирования была предложена схема расположения элементов диагностики в верхнем патрубке установки TRT. Оптимизация оптической системы сбора излучения позволила обеспечить требуемое пространственное разрешение во всей области измерений.

В результате проведённой работы можно сделать вывод, что предложенная концепция вертикальной системы наблюдения для системы АС на диагностическом пучке установки TRT позволит производить измерения профиля ионной температуры, концентрации лёгких примесей и полоидальной скорости вращения на краю плазмы с временным разрешением 10 мс. При этом статистические ошибки, вызванные зашумлённостью спектров, будут менее 1% для температуры и концентрации ионов примесей и 10% для скорости полоидального вращения.

Работа выполнена при финансовой поддержке за счёт средств государственного контракта от 17.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1060 «НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023—2024 годов».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Серов С.В. и др. Разработка концепции диагностической системы «Активная спектроскопия» (CXRS) для установки TRT. — Физика плазмы, 2022, т. 48, № 8, с. 700—710.
2. Зиновьев А.Н., Афросимов В.В. Корпускулярно-спектроскопическая диагностика высокотемпературной плазмы. — В. сб.: Сборник статей «Диагностика плазмы». Под ред. М.И. Пергамент. Вып. 7. — М.: Энергоатомиздат, 1990, с. 56—111.
3. Isler R.C. An overview of charge-exchange spectroscopy as a plasma diagnostic. — Plasma Physics and Controlled Fusion, 1994, vol. 36, № 2, p. 171—208; <https://doi.org/10.1088/0741-3335/36/2/001>.
4. Groebner R.J., Burrell K.H., Gohil P., Seraydarian R.P. Spectroscopic study of edge poloidal rotation and radial electric fields in the DIII-D tokamak (invited). — Review of Scientific Instruments, 1990, vol. 61 (10), p. 2920; <https://doi.org/10.1063/1.1141777>.
5. Кузьмин Н.В. и др. Светосильный спектрометр-полихроматор высокого разрешения, оснащенный научными КМОП-камерами, для спектроскопической диагностики плазмы токамаков. — Приборы и техника эксперимента, 2023, № 6, с. 85—97.
6. Von Hellermann M. et al. Simulation of Spectra Code (SOS) for ITER Active Beam Spectroscopy. — Atoms, 2019, vol. 7, p. 30.

7. **Serov S.V., Tugarinov S.N., von Hellerman M.** Benchmarking of CXRS modelling against JET experimental data. — In: Proc. of 3<sup>rd</sup> European Conference on Plasma Diagnostics (ECPD). Lisbon, Portugal, 6—9 May 2019. — European Physical Society, 2019, P1.17.2020.
8. **Jaspers R.J.E. et al.** Validation of the ITER CXRS design by tests on TEXTOR. — Review of Scientific Instruments, 2008, vol. 79, 10F526; <https://doi.org/10.1063/1.2979874>.
9. **Huang J. et al.** Validation of fast-ion D-alpha spectrum measurements during EAST neutral-beam heated plasmas. — Review of Scientific Instruments, 2016, vol. 87, 11E542; <https://doi.org/10.1063/1.4960308>.
10. **Давыденко В.И., Иванов А.А., Ступишин Н.В.** Концептуальный проект диагностического инжектора пучка атомов водорода для токамака TRT. — Физика плазмы, 2022, т. 48, № 8, с. 694—699.
11. **Леонов В.М. и др.** Сценарии разряда токамака с реакторными технологиями. — Физика плазмы, 2021, т. 47, с. 986; <https://doi.org/10.31857/S0367292121120040>.
12. **Summers H.P.** The ADAS User Manual; <http://www.adas.ac.uk/>.
13. **Pavlova G.S., Serov S.V., Tugarinov S.N., von Hellerman M.** Studies of the halo effect in the charge exchange recombination spectroscopy edge measurements at ITER. — J. of Physics: Conference Series, 2021, vol. 2055, № 1, 012002; <https://doi.org/10.1088/1742-6596/2055/1/012002>.
14. <https://www.zemax.com>.

Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2, Россия



Галина Сергеевна Павлова, научный сотрудник  
[g.pavlova@iterrf.ru](mailto:g.pavlova@iterrf.ru)



Сергей Николаевич Тугаринов, начальник сектора АС ОНСД  
[s.tugarinov@iterrf.ru](mailto:s.tugarinov@iterrf.ru)



Николай Викторович Кузьмин, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.  
[n.kuzmin@iterrf.ru](mailto:n.kuzmin@iterrf.ru)



Вадим Вячеславович Серов, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.  
[v.serov@iterrf.ru](mailto:v.serov@iterrf.ru)

Статья поступила в редакцию 1 ноября 2024 г.

После доработки 14 апреля 2025 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 48—56.

УДК 621.039.6

## ОБРАЩЕНИЕ С ТРИТИЕМ В КОМПЛЕКСЕ ТОКАМАКА С РЕАКТОРНЫМИ ТЕХНОЛОГИЯМИ

*В.Н. Кондрашов<sup>1</sup>, Н.Б. Родионов<sup>1</sup>, Д.С. Родионов<sup>1</sup>, В.Н. Докука<sup>1</sup>, Р.Р. Хайрутдинов<sup>1</sup>, А.С. Аникин<sup>2</sup>,  
А.А. Семенов<sup>2</sup>, А.В. Лизунов<sup>2</sup>, А.Н. Букин<sup>2</sup>, Д.А. Карпов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия

<sup>2</sup>АО «ВНИИИМ», Москва, Россия

<sup>3</sup>АО «НИИЭФА», Санкт-Петербург, Россия

В работе рассмотрены факторы, влияющие на обращение с тритием в токамаке с реакторными технологиями (ТРТ) и в системах обеспечения его работы. Сформулированы проблемы, которые следует учесть при проектировании тритиевого технологического комплекса установки ТРТ и его реализации в существующем комплексе зданий на площадке АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ». Изложены принцип работы тритиевого технологического комплекса, рабочие характеристики аппаратов, обеспечивающих сбор, обработку и хранение трития для экспериментов по термоядерному синтезу.

**Ключевые слова:** тритий, термоядерный синтез, дейтерий-тритиевая плазма, топливная смесь, токамак с реакторными технологиями, тритиевый комплекс (цикл, система), ректификация, термодиффузия, масс-спектрометрический анализ трития.

## TRITIUM HANDLING IN THE TOKAMAK COMPLEX WITH REACTOR TECHNOLOGIES

*V.N. Kondrashov<sup>1</sup>, N.B. Rodionov<sup>1</sup>, D.S. Rodionov<sup>1</sup>, V.N. Dokuka<sup>1</sup>, R.R. Khairutdinov<sup>1</sup>, A.S. Anikin<sup>2</sup>,  
A.A. Semenov<sup>2</sup>, A.V. Lizunov<sup>2</sup>, A.N. Bukin<sup>2</sup>, D.A. Karpov<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>JSC «SSC RF TRINITY», Moscow, Troitsk, Russia

<sup>2</sup>JSC «VNIINM», Moscow, Russia

<sup>3</sup>JSC «NIEFA», St. Petersburg, Russia

The paper examines factors influencing tritium handling in a tokamak with reactor technologies (TRT) and in its operation support systems. The problems that should be taken into account when designing the tritium technological complex of the TRT facility and its implementation are formulated in the existing complex of buildings on the site of JSC «SSC RF TRINITY». The operating principle of the tritium complex, the operating characteristics of the devices that ensure the collection, processing and storage of tritium for thermonuclear fusion experiments are described.

**Key words:** tritium, thermonuclear fusion, deuterium-tritium plasma, fuel mixture, tokamak with reactor technologies, tritium complex (cycle, system), rectification, thermal diffusion, mass spectrometric analysis of tritium.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Проект ТРТ — токамака с реакторными технологиями разрабатывается в рамках программы управляемого термоядерного синтеза (УТС), основной целью которой является создание термоядерного реактора для энергетики будущего [1]. Тем не менее результаты, ожидаемые на ТРТ, несомненно, будут представлять интерес и для программы создания гибридного реактора (синтез—деление), в частности, для разработки термоядерного источника нейтронов. В основе обеих программ лежит идея использования реакции синтеза ядер дейтерия и трития. По-видимому, можно допустить и совместные экспериментальные разработки, в особенности касательно осуществления ряда аналогичных функциональных элементов термоядерного топливного цикла.

ТРТ будет являться уникальной исследовательской установкой, поэтому её инструментарий должен включать, помимо заявленных конструктивных особенностей, также и, по возможности, самый широкий набор технологий, диагностических методов и технических средств, позволяющих проверять *in situ*

перспективные новые идеи и решения, в том числе и в отношении обращения с тритием, например, предлагаемые А.И. Лившицем схемы сепарации трития с помощью сверхпроницаемых мембран [2] (далее СПМ-насосы Лившица), разрабатываемые в АО «НИИЭФА» плёночные металлгидридные аккумуляторы водорода.

В планируемых экспериментах на ТРТ мы будем иметь дело с изотопами водорода: протием, дейтерием и тритием. Если протий и дейтерий являются стабильными, то тритий — радиоактивный изотоп водорода с периодом полураспада 12,3 лет. В результате бета-распада он превращается в  ${}^3\text{He}$ , излучая низкоэнергичный электрон со средней энергией 5,7 кэВ и электронное антинейтрино со средней энергией 10 кэВ. Важно отметить, что тритий, как и протий, может существовать в разных формах — как газообразной, так и жидкой, причём тритиевая вода имеет три изотопные модификации —  $\text{T}_2\text{O}$ , НТО и ТДО. Использование трития в топливном цикле и его наработка в термоядерных экспериментах требуют детального контроля и учёта из-за его опасности для человека и живой природы. Внешне излучение трития безопасно, так как оно не проникает через защитные средства. Опасность представляют высокая проникающая способность и попадание трития (главным образом в форме воды) внутрь организма через кожные покровы, через дыхание или с пищей, его быстрое распространение с циркулирующей кровью во все органы и последующее внутреннее воздействие на живые ткани. Биологическое действие трития определяется тем, что при его трансформации в  ${}^3\text{He}$  рвутся водородные связи в клетках, в цепочках РНК и ДНК в биологических структурах всех живых организмов [3].

При построении ТРТ и его инфраструктуры необходимо руководствоваться принципами надёжности, резервирования, безопасности, как и для любого радиационно опасного объекта.

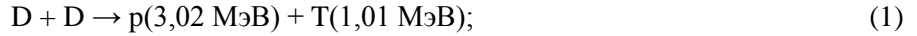
Ранее в статье [4] была разработана и предложена схема тритиевого цикла токамака с реакторными технологиями. Она включает следующие компоненты: подсистему сорбционного хранения дейтерия и трития на интерметаллических соединениях на основе циркония; подсистему химической очистки отработанной газовой смеси из вакуумной камеры токамака, улавливающей ионы азота, кислорода и углерода; подсистемы мембранной сепарации изотопов водорода из газовой смеси; подсистемы разделения изотопов водорода методом термодиффузии; узел очистки тритированных технологических потоков методом фазового изотопного обмена, включая предварительное каталитическое окисление изотопов водорода до паров воды; подсистему концентрирования тритийсодержащей воды методом химического изотопного обмена в системе «вода—водород». Несомненно, эта рабочая схема в дальнейшем будет развиваться и совершенствоваться, включая возможности автоматизации технологических процессов тритиевого технологического комплекса (ТТК) ТРТ.

В данной статье рассматриваются проблемы, которые следует учесть при проектировании ТТК ТРТ и его реализации в существующем комплексе зданий бывшего токамака с сильным полем (ТСП) после их реконструкции.

## 2. РАСЧЁТ НАРАБОТКИ ТРИТИЯ В РАЗРЯДЕ D-ПЛАЗМЫ ТРТ С УЧЁТОМ ДОПОЛНИТЕЛЬНОГО НАГРЕВА

Прежде всего необходимо отметить, что тритий появляется в экспериментах на ТРТ не только как компонент наиболее выгодной топливной смеси DT, но и нарабатывается в реакциях синтеза DD. Вопрос выхода и накопления трития в сценариях с дейтериевой плазмой (D-плазмой) актуален с точки зрения безопасной работы установки УТС. Поэтому разрабатываемый ТТК необходим для соблюдения требований радиационной безопасности и будет востребован уже на этой стадии исследований. Нарработка трития происходит в D-плазме как за счёт термоядерных реакций в горячей плазме, так и в ходе взаимодействия нагретых пучков атомов с плазмой. Для дополнительного нагрева плазмы в ТРТ предлагается применять три двухпучковых инжекционных комплекса, каждый из которых состоит из двух расположенных вертикально друг над другом инжекторов нейтральных частиц с энергией 500 кэВ. В условиях инжекции атомов дейтерия в плазменном шнуре ТРТ возникает значительная доля быстрых частиц — ионов дейтерия.

Мощность ядерных реакций в D-плазме складывается из двух частей: мощности термоядерных DD-реакций максвелловской плазмы и мощности реакций при торможении быстрых дейтронов в D-плазме. Каналы DD-реакций:



В данной работе реализованы два подхода к оценке наработки трития в D-плазме ТРТ:

1. Рассчитана наработка трития в нуль-мерном приближении для термоядерных DD-реакций максвелловской плазмы и реакций при торможении быстрых дейтронов в D-плазме;
2. Проведена оценка наработки трития по данным расчёта DD-реакций на основе расчётных сценариев, выполненных в [5, 6] по коду АСТРА.

В нуль-мерном приближении оценка числа реакций синтеза в D-плазме проводится на основе рассчитанных сечений и скоростей термоядерных DD-реакций. Сечения и скорости DD-реакций (в максвелловской плазме) взяты из работ [7, 8]. Для оценки скорости реакций при торможении быстрых дейтронов в D-плазме применялась модель, использованная в работе В.И. Пистуневича [9].

Скорость реакций при немаксвелловском распределении (в условиях инжекции атомов дейтерия) с большой долей быстрых (высокоэнергетических) частиц может быть существенно выше, чем для термически равновесной максвелловской плазмы при температурах плазмы порядка 10 кэВ. Источник быстрых ионов в этом случае связан с ионизацией атомов пучка, вводимого в плазму. При движении быстрого иона в плазме, состоящей из ионов и электронов, происходит его торможение вследствие кулоновских соударений с частицами плазмы.

Число быстрых нейтральных атомов дейтерия, поступающих в плазму из инжектора в единицу времени:

$$N_D = \frac{P_{\text{NBI}}}{E_0},$$

где  $P_{\text{NBI}}$  — мощность пучка быстрых дейтронов,  $E_0$  — начальная энергия дейтрона.

Тогда число образовавшихся за единицу времени ядер трития в плазме за счёт реакций на пучке будет равно

$$\frac{dN_{\text{T,NBI}}}{dt} = N_D f_{\text{DD} \rightarrow \text{pT}}.$$

Вероятность DD-реакции за время торможения пучка дейтронов в плазме рассчитывается по формуле

$$f_{\text{DD} \rightarrow \text{pT}} = \int_0^{\tau} n_d \sigma_{\text{DD}} v dt = \sqrt{\frac{2}{M}} \int_0^{E_0} n_d \sigma_{\text{DD}} \sqrt{E} (-dE / dt) dE,$$

где  $v$  и  $E$  — скорость и энергия дейтрона, тормозящегося в плазме с плотностью электронов  $n_e \approx n_d$ ;  $n_d$  — плотность дейтерия в плазме;  $M$  — масса ядра дейтерия;  $\sigma_{\text{DD}}$  — сечение DD-реакции.

В нуль-мерном приближении оценка наработки трития в максвелловской D-плазме проведена для усреднённой по всему объёму плазмы температуры.

Число образовавшихся в единицу времени в результате термоядерных реакций ядер трития в плазме можно оценить по формуле

$$\frac{dN_{\text{T,th}}}{dt} = \frac{1}{2} n_D^2 V \langle \sigma v \rangle_{\text{DD} \rightarrow \text{pT}},$$

где  $\langle \sigma v \rangle_{\text{DD} \rightarrow \text{pT}}$  — скорость реакции (1);  $V$  — объём плазмы.

Оценки скорости образования трития проведены для термоядерных DD-реакций максвелловской плазмы и реакций при торможении быстрых дейтронов в D-плазме в зависимости от температуры плазмы. Для оценок приняты следующие параметры ТРТ: большой и малый радиусы плазмы

$R = 2,15$  м,  $a = 0,57$  м соответственно, вытянутость плазмы  $K = 1,8$ , объём плазмы  $V = 25$  м<sup>3</sup>, мощность инжекции 20 МВт, энергия пучка 500 кэВ, средняя плотность плазмы  $1 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup>. Температура плазмы задана в представляющем интерес диапазоне 5—20 кэВ, предполагая, что электронная и ионная температуры совпадают.

В табл. 1 приведена мощность  $Q_{th}$  в термоядерных реакциях  $DD \rightarrow pT$ , мощность  $Q_{nb}$  в реакциях на пучках и их сумма  $Q_{tot}$  при разной температуре плазмы. В столбце  $f_{th/nb}$  указано отношение  $Q_{th}/Q_{nb}$ , которое характеризует долю термоядерных реакций к реакциям на пучке. Здесь же представлены скорости образования ядер трития  $dN_T/dt$  и наработки массы трития  $dM_T/dt$ .

Таблица 1. Мощность DD-реакций и скорость образования ядер трития

$T$ , кэВ	$Q_{nb}$ , МВт	$Q_{th}$ , МВт	$Q_{tot}$ , МВт	$f_{th/nb}$	$dN_T/dt$ , $10^{17}$ с <sup>-1</sup>	$dM_T/dt$ , мкг/с
5	0,057	0,007	0,064	0,123	0,994	0,499
10	0,126	0,047	0,172	0,373	2,661	1,335
15	0,183	0,112	0,294	0,612	4,548	2,282
20	0,227	0,193	0,420	0,85	6,486	3,255

Расчёты по нуль-мерной модели показывают, что в реакциях при торможении быстрых дейтронов имеется существенная доля суммарной наработки трития.

Во втором подходе данной работы проведён анализ наработки трития по данным расчёта DD-реакций на основе расчётных сценариев, выполненных в [5, 6] по коду АСТРА.

В работе [5] выполнены расчёты сценариев разрядов в ТРТ для дейтериевой и дейтерий-третиевой плазмы (DT-плазмы). Результаты моделирования показали, что длительность стадии плато тока превышает 100 с при плотности плазмы  $n_e \leq 1 \cdot 10^{20}$  м<sup>-3</sup>. Изучение режимов разряда в D-плазме с различными плотностями плазмы было продолжено в работе [6]. В табл. 2 представлены результаты моделирования таких разрядов, выполненных по коду АСТРА. В этих режимах полный ток плазмы составляет 5 МА, тороидальное магнитное поле на оси 8 Тл, дополнительный нагрев 10 МВт ЭЦН (электронно-циклотронный резонансный нагрев) и 20 МВт нейтральной инжекции. Для выбора оптимального режима задавалась плотность плазмы, а параметр CF1, отвечающий за аномальный перенос, изменялся так, чтобы выйти на заданный H-фактор (HH) в стационаре. Режим 1 (см. табл. 2) воспроизводит расчёт сценария D-плазмы из работы [5]. В остальных режимах пренебрегается дополнительным нагревом плазмы от DD-реакций, а H-фактор выбирается близким к единице.

Полученные результаты сведены в табл. 2, где также приведены электронная плотность, температура ионов и электронов. В двух последних столбцах приведены скорости образования ядер трития  $dN_T/dt$  и скорость наработки трития  $dM_T/dt$ , учитывая, что DD-реакции по каналам ( $DD \rightarrow pT$ ) и ( $DD \rightarrow n^3He$ ) проходят с равной вероятностью.

Таблица 2. Нароботка трития в модельных сценариях с кодом АСТРА

№ режима	$\langle n_e \rangle$ , $10^{19}$ м <sup>-3</sup>	$\langle T_e \rangle$ , кэВ	$\langle T_i \rangle$ , кэВ	HH	CF1	$Q_{th}$ , МВт	$Q_{tot}$ , МВт	$f_{th/nb}$	$dN_T/dt$ , $10^{17}$ с <sup>-1</sup>	$dM_T/dt$ , мкг/с
1	10	10,3	10,9	1,22	0,298	0,088	0,457	0,239	5,744	2,882
7	9	9,34	9,49	1,01	0,31	0,050	0,384	0,150	4,825	2,421
8	10	8,71	8,42	0,986	0,28	0,048	0,370	0,150	4,649	2,333
9	11	8,37	7,95	1,0	0,25	0,052	0,364	0,167	4,573	2,295
4	13	7,97	7,51	1,05	0,2	0,064	0,363	0,214	4,561	2,289
5	15	6,94	6,45	1,0	0,18	0,058	0,318	0,223	3,995	2,004
6	20	5,71	5,37	0,992	0,13	0,064	0,265	0,318	3,328	1,670

Максимальные расчётные значения  $dM_T/dt$  могут достигать 2—3 мкг/с, что согласуется с данными оценки скорости наработки трития в расчётах по нуль-мерной модели, приведёнными в табл. 1.

Итак, данные оценки скорости образования трития показали, что в представленных разрядах D-плазме ТРТ за 1 с может генерироваться до 2—3 мкг трития, а в разряде длительностью 100 с будет набираться 200—300 мкг.

С учётом оценочного потока трития 3 мкг/с ежемесячная наработка трития составит 0,03 г ( $1,07 \cdot 10^{13}$  Бк), если производить 100 пусков при ежедневной работе по четыре пуска в день.

### 3. ЭСКИЗНЫЙ ПРОЕКТ ТТК ТРТ

Эскизный проект ТТК ТРТ был разработан на основе совместных разработок АО «ВНИИНМ» имени академика А.А. Бочвара и АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» [4]. Проект основан на постадийно-блочном принципе, согласно которому каждая стадия процесса обеспечивается отдельным автономным блоком, состоящим из аппаратов, предназначенных для выполнения конкретных задач, связанных с проведением работ с тритием и обеспечением безопасности, а также для снабжения топливной DT-смесью экспериментальной установки управляемого термоядерного синтеза ТРТ. В соответствии с [4] тритиевый технологический цикл ТРТ должен состоять из следующих укрупнённых блоков:

- вакуумно-технологический комплекс;
- тритиевая технологическая система;
- система радиационной безопасности;
- система аналитического контроля тритийсодержащих газовых смесей.

На рис. 1 представлена принципиальная схема ТТК для токамака с реакторными технологиями, где ВТК — вакуумно-технологический комплекс, ТТС — тритиевая технологическая система, СРБ — система радиационной безопасности, ФИО — фазовый изотопный обмен, ХИО — химический изотопный обмен, НТО и ТРО — жидкая и твёрдая тритийсодержащие формы, ТПК — тороидальная плазменная камера. На этом рисунке не отражена система аналитического контроля тритийсодержащих газовых смесей, с помощью которой осуществляется мониторинг трития практически во всех ветвях данной схемы.

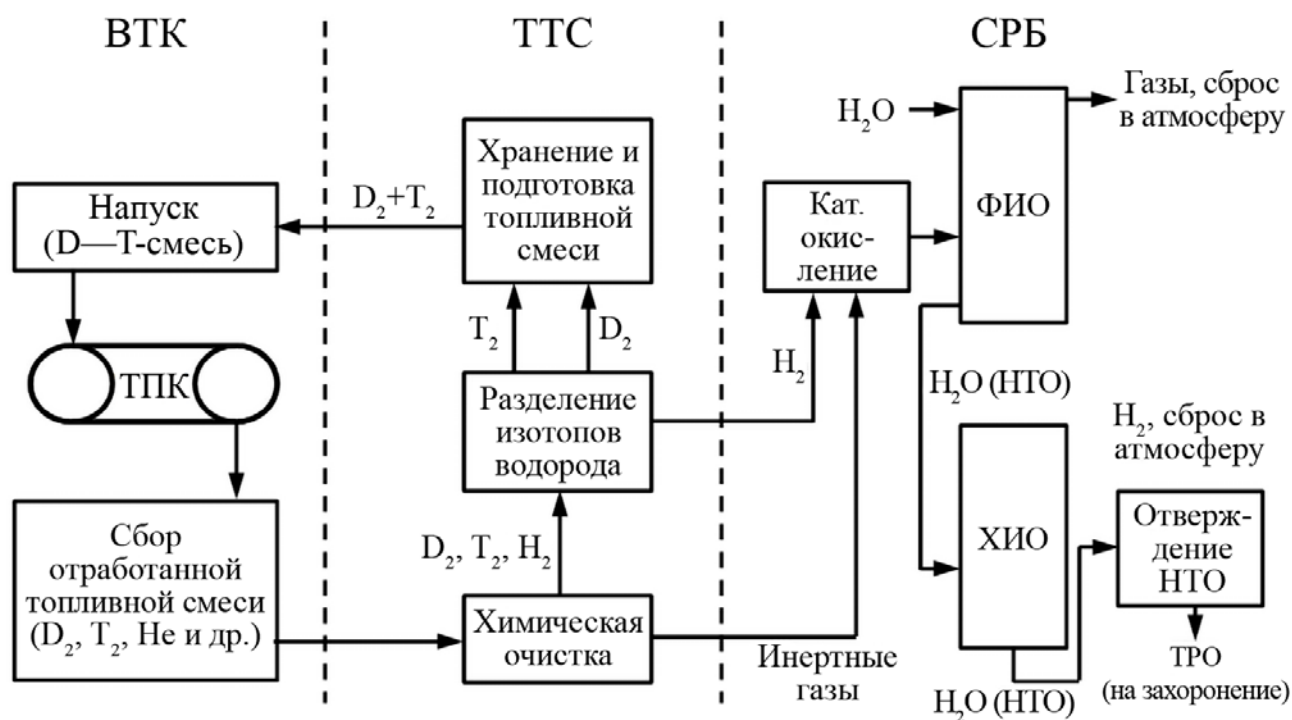


Рис. 1. Принципиальная схема ТТК для ТРТ [4]

Укрупнённые блоки для разработки эскизного проекта были разбиты на ряд подсистем. Учитывая условия эксплуатации создаваемой термоядерной установки, на предыдущих этапах работ были обоснованы технические решения для подсистем хранения, химической и изотопной очистки трития, основанные на характеристиках сорбции трития интерметаллическими соединениями и термодиффузионного разделения, экспериментально подтверждённых в АО «ВНИИНМ». Кроме того, была разработана

подсистема детритизации для обеспечения радиационной безопасности на основе экспериментальных данных по фазовому изотопному обмену в противоточных массообменных колоннах.

В процессе конструирования были проведены расчёты необходимого количества сорбента и условий хранения для обеспечения термоядерной установки топливной смесью, состоящей из дейтерия и трития. Экспериментальным путём была установлена величина полной адсорбционной ёмкости по водороду интерметаллида  $ZrCo$ , выбранного в качестве сорбента, которая составила около  $200 \text{ см}^3/\text{г}$  газа при нормальных условиях. Исходный тритий будет поступать на предприятие в сорбционных аппаратах хранения на обеднённом уране. Затем газ будут перепускать в комплекс из пяти аппаратов хранения ёмкостью по 3—4 г трития каждый. При необходимости будет проводиться аналитический контроль газовой смеси. Всего в подсистеме планируется использование шести аппаратов для хранения трития. Один из них предназначен для резерва и может использоваться для перекачки трития из других. Каждый аппарат будет подсоединяться к гребёнке, имеющей буферную ёмкость, вакуумметры, коммуникации для связи с аналитической системой и подсистемой разделения изотопов водорода. Конструкция ТТК предполагает подключение каждого аппарата хранения к автономному спиральному циркуляционному насосу. Все аппараты хранения в подсистеме хранения трития и дейтерия будут иметь независимое подключение, что позволяет одновременно проводить в некоторых аппаратах газоочистку, а другие использовать для напуска трития в камеру токамака. При этом все циркуляционные насосы связаны общими коммуникациями, что даёт возможность перекачивать тритий из одного аппарата в другой. Подсистема хранения будет оснащена двумя парами насосов для двухступенчатого вакуумирования системы. В качестве форвакуумного насоса в подсистеме хранения будут использованы спиральные безмасляные насосы, а для создания глубокого вакуума — турбомолекулярные посты.

Химическая очистка на ТТК ТРТ будет проводиться в две стадии. На первой стадии изотопы водорода, находящиеся в форме паров воды, аммиака и метана, переводят в восстановленную форму. Содержащиеся в газовой смеси кислород, азот и углерод поглощаются с помощью нагретых гранул интерметаллида  $ZrCo$ , используя его свойство необратимо связывать эти компоненты газовой смеси. На второй стадии изотопы водорода отделяют от инертных газов мембранным методом с использованием трубок из палладиевых сплавов, селективно пропускающих водород, или сверхпроницаемых ванадиевых мембран, разработанных А.И. Лившицем. Экспериментально показано, что применение палладий-серебряных мембран позволяет получать изотопы водорода чистотой более 99,99999% [10]. При работе блока химической очистки отработанную газовую смесь, состоящую из ДТ-смеси с примесями водородсодержащих соединений ( $NH_3$ ,  $H_2O$ ,  $CH_4$ ), компонентов воздуха ( $N_2$ ,  $O_2$ ,  $Ar$ ) и изотопов гелия, после откачки из токамака с помощью вакуумного спирального насоса закачивают в ресивер, откуда она периодически поступает в систему восстановления и химической очистки.

Подсистема изотопной очистки ТТК включает термодиффузионную колонну для работы с высокими концентрациями трития, вплоть до чистого трития. Термодиффузионная колонна предназначена для разделения изотопов водорода, она имеет внутреннюю горячую стенку в виде металлического стержня с полированной поверхностью из нержавеющей стали, нагреваемого электрорезистивным методом, и внешнюю холодную стенку, изготовленную из медной трубки, полированной изнутри, наружная поверхность которой охлаждается проточной водой. Натяжение стержня и компенсация его удлинения при нагреве осуществляются при помощи пневмоцилиндра, расположенного внутри верхнего накопительного объёма колонны.

В подсистеме детритизации воздуха рабочих помещений и технологических газовых потоков ТТК ТРТ для удаления трития реализован метод фазового изотопного обмена [11]. Подсистема обеспечивает степень детритизации от  $2 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^5$  для потока газа расходом от 0,5 до  $50 \text{ м}^3/\text{ч}$ . Процесс фазового изотопного обмена реализуется в противоточных насадочных колоннах. Эти аппараты просты по своей конструкции, легко обслуживаются и отличаются высокой надёжностью. Схема аппарата фазового изотопного обмена представлена на рис. 2, где  $L_{\text{вх}}$  и  $L_{\text{вых}}$  — входящий и выходящий потоки воды,  $G_{\text{вх}}$  и  $G_{\text{вых}}$  — входящий и выходящий потоки газа,  $X$  и  $Y$  — концентрация трития в жидкости и газе соответственно,  $i$  — номер ступени в колонне.

В основе использованного метода лежит реакция фазового изотопного обмена между тритированным паром ( $G_{\text{вх}}$ ), содержащимся в очищаемых от трития газах, и жидкой дистиллированной водой ( $L_{\text{вх}}$ ), подаваемой на орошение колонны. Тритий при этом концентрируется в небольшом количестве жидкой фазы ( $L_{\text{вых}}$ ), которая может быть либо переработана, либо захоронена как радиоактивный отход. При этом отходящий газ ( $G_{\text{вых}}$ ) очищается от трития до сбросных норм. Эскизный проект включает две установки фазового изотопного обмена: для очистки локальных сбросов и выбросов вакуумного оборудования и для детритизации воздуха рабочих помещений и технологических газовых потоков. Отличие между этими установками заключается лишь в размерах и производительности оборудования. На этих установках поток перерабатываемого газа, содержащего тритий, поступает в приёмный ресивер объёмом  $0,3 \text{ м}^3$ . Далее с помощью компрессора газовую смесь направляют в каталитический реактор с катализатором, где при температуре  $200 \text{ }^\circ\text{C}$  происходит окисление молекулярного водорода до паров тритированной воды. Далее паровоздушная смесь направляется в теплообменник, где происходит её охлаждение до температуры работы  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ . Противотоком потоку газа из питающих ёмкостей (1-я — объёмом  $30 \text{ л}$ , 2-я — объёмом  $50 \text{ л}$ ) на орошение колонны подаётся дистиллированная вода. За счёт реакции ФИО происходит перенос трития из газовой фазы в жидкую. Очищенный от трития поток газа сбрасывается в специальную вентиляцию, а тритированная вода собирается в приёмной ёмкости.

В дополнение к приведённому описанию эскизного проекта ТТК стоит указать на несомненную перспективность разработанного в АО «НИИЭФА» прототипа плёночного металлгидридного аккумулятора водорода на основе плёнок  $\text{Mg}$  и  $\text{Ni}$  [12, 13] для аккумуляции и хранения не вступившей в термоядерную реакцию топливной смеси и последующей её повторной инжекции в ТРТ. Преимуществом такого способа накопления и хранения изотопов водорода (в особенности, трития) в сравнении с их поглощением геттером на основе  $\text{ZrCo}$  (хемосорбция) является химическое связывание изотопов водорода с образованием гидридов металлов, не допускающее их самопроизвольный выход в окружающее пространство.

Исторически хранение трития осуществляется в металлгидридных ловушках на основе порошка  $^{238}\text{U}$  [14, 15]. Однако такие его недостатки, как токсичность соединений, радиоактивность, пирофорность, необходимость специального учёта, приводят к необходимости поиска альтернативных вариантов для хранения и доставки топлива в системе топливного цикла термоядерных установок. В ИТЭР, где за систему хранения и доставки топлива отвечает Южная Корея, для хранения и доставки трития выбран металлгидрид  $\text{ZrCo}$ , близкий по своим сорбционным характеристикам к урану, но более приемлемый для регулирующих органов [16]. Недостатком этого сплава является непрерывное снижение ёмкости хранения изотопов водорода при проведении циклов сорбция/десорбция в результате реакции диспропорционирования ( $2\text{ZrCoX}_3 \rightarrow \text{ZrCo}_2 + \text{ZrX}_2 + 2\text{X}_2$ ,  $\text{X} = \text{H, D, T}$ ) с увеличением концентрации бесполезных компонентов  $\text{ZrCo}_2$  и  $\text{ZrX}_2$  [17]. Проведённые в АО «НИИЭФА» исследования плёночных

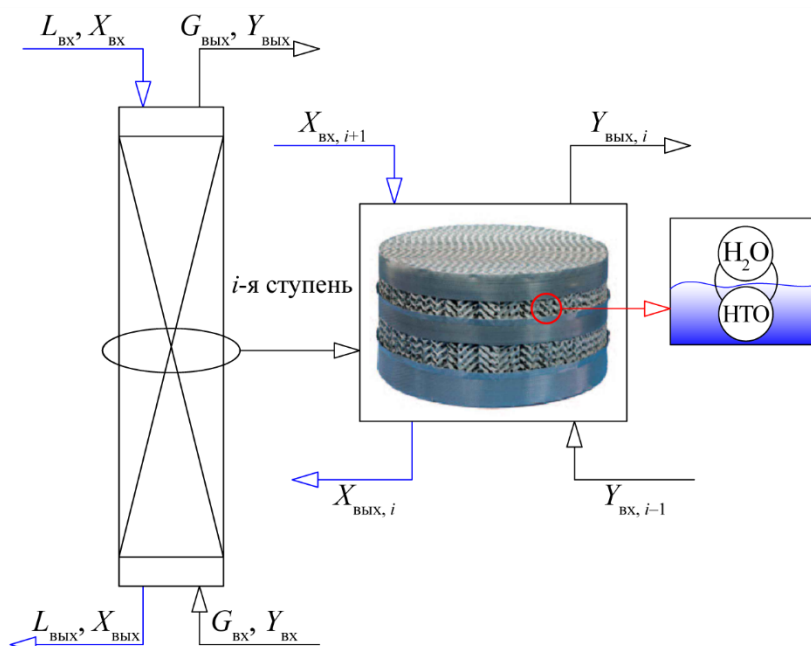


Рис. 2. Схема аппарата фазового изотопного обмена

структур на основе Mg и Ni для хранения и выделения водорода, в которых Mg используется как гидридообразующий материал с высоким содержанием водорода (до 7,6 мас.%), а никель в качестве атомизатора и катализатора, показали как высокие сорбционные/десорбционные характеристики таких структур, так и постоянную величину ёмкости хранения водорода, не меняющуюся от цикла к циклу [13]. Нагрев таких плёночных структур до рабочей температуры 200—250 °С осуществляется плёночным медным нагревателем, непосредственно к ним примыкающим, что обеспечивает низкоинерционный и равномерный прогрев гидридообразующего материала. Использование вместо порошка плёнки, как показали эксперименты, значительно снижает температуру, энтальпию фазообразования и повышает кинетику сорбционных/десорбционных процессов (плёнка легче, чем объёмный материал, поглощает и выделяет водород). Испытания разработанного на основе проведённых экспериментов прототипа плёночного аккумулятора ёмкостью 3,5 г водорода показали хорошую циклируемость сорбционных/десорбционных процессов с удельной обратимой ёмкостью водорода 500 см<sup>3</sup>/г при нормальных условиях [18]. Вес прототипа аккумулятора в герметичном корпусе 320 г, объём 0,2 л. Предполагаются испытания такого плёночного аккумулятора водорода в составе комплекса топливоподачи, вакуумной откачки и выделения топливной смеси на дотритиевой стадии работы ТРТ и использование его в работе с тритием при успешном проведении испытаний. Удобство использования аккумулятора подобного типа в ТРТ состоит в том, что как подача в него топливной смеси для накопления, так и её последующий выход в систему топливоподачи могут проводиться без разгерметизации и без каких-либо дополнительных устройств при давлении меньше атмосферного, что исключает попадание изотопов водорода в окружающую среду.

#### 4. СОПРЯЖЕНИЕ ТТК С КОМПЛЕКСОМ ТРТ И ИНЖЕНЕРНЫМИ СИСТЕМАМИ

После пуска наладки и ввода в эксплуатацию всех инженерных систем и исследовательских диагностик на ТРТ состоятся пробные пуски с целью отладки режимов работы, и далее планируется проведение серий экспериментов с технологическими перерывами между ними согласно научной и эксплуатационной программ. В рамках первой стадии исследований будут использоваться газы H<sub>2</sub> и He, а эксперименты будут проводиться с водородной и гелиевой плазмой при  $B \leq 8$  Тл,  $I_p \leq 5$  МА без образования нейтронов. На второй стадии уже с дейтериевым рабочим газом ожидается получение потоков нейтронов до  $5 \cdot 10^{17}$  н./с. На третьей стадии станут возможными нейтронные эксперименты с DT-плазмой при максимально допустимой нейтронной нагрузке до 0,2 МВт/м<sup>2</sup>.

Начальный топливный запас трития в комплексе ТРТ (по аналогии с ТСП) — 20 г, что даёт общую активность  $7,1 \cdot 10^{15}$  Бк, а для заполнения разрядной камеры в DT-экспериментах потребуется 0,1 г этого компонента. Исходя из этого, помещения экспериментального зала ТРТ и бывшего ТТК ТСП, в которых расположены приборы, аппараты и установки, контактирующие с тритийсодержащими веществами, должны быть оборудованы по первому классу работ с радиоактивными веществами [19].

На рис. 3 представлена принципиальная схема обращения с тритием в проекте ТРТ.

Для предотвращения проникновения трития в помещения при нормальной эксплуатации установки и в случае аварийной разгерметизации рекомендуется реализовать следующие меры:

1. Система барьеров безопасности и многозонная защита. Создание многоуровневой системы барьеров, включающей боксы, вытяжные шкафы, шлюзы и др., а также организацию зон с различным уровнем радиационной опасности (например, красная зона для особо опасных участков и зелёная зона для менее опасных участков) [20];

2. Контроль давления воздуха и использование инертных газов. Поддержание отрицательного баланса давления воздуха в зонах с повышенным риском (например, в экспериментальном зале и в зоне обращения с тритием), что предотвращает распространение трития за пределы этих зон. Применение инертных газов (например, азота) в критически важных зонах для снижения риска возгорания и уменьшения вероятности образования взрывоопасных концентраций водорода;

3. Создание герметичного конфайнмента. Организация полностью герметичной системы, исключающей попадание трития внутрь здания, например, использование саркофага;

4. Использование двухконтурных схем для инженерных систем. Разработка двухконтурной системы охлаждения, водоснабжения и отопления, что позволит минимизировать риск загрязнения тритием;

5. Автоматизированная система радиационного мониторинга и реагирования. Установка адресной системы автоматической радиационной сигнализации, интегрированной с системой автоматического оповещения персонала, аналогично системе пожарной сигнализации. Система должна инициировать автоматические защитные мероприятия, такие как закрытие клапанов, включение вентиляции и другие меры локализации радиации;

6. Разработка систем детектирования и мониторинга. Решение проблем с детектированием и идентификацией трития, обусловленных низкой энергией бета-излучения.

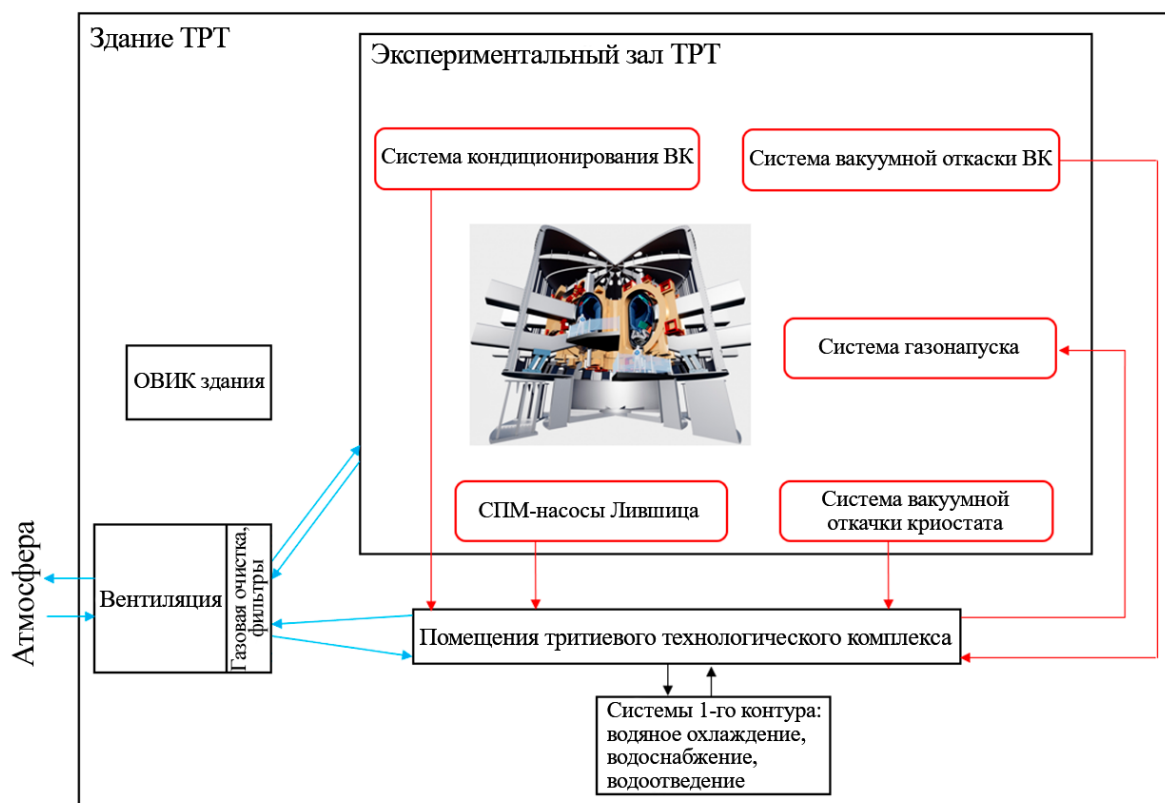


Рис. 3. Принципиальная схема обращения с тритием в комплексе ТРТ

СПМ-насосы Лившица, которые позволяют осуществить селективную откачку изотопов водорода с выделением их из газовой смеси с помощью сверхпроницаемых мембран и возврат в систему подачи топлива, показаны на рис. 3 условно.

С тритиевым технологическим комплексом тесно связаны следующие системы инфраструктуры токамака, представленные на рис. 3: система вакуумной откачки плазменной камеры, включая форвакуумные насосы (ФН), турбомолекулярные насосы (ТМН) и СПМ-насосы Лившица; система вакуумной откачки криостата, включая крионасосы и ФН-насосы; система охлаждения; система кондиционирования плазменной камеры; система газонапуска; специальная и аварийная вентиляция здания; специальная канализация; хранилище радиоактивных тритийсодержащих отходов. Исполнение и режимы работы инженерных систем, имеющих отношение к обращению трития в проектируемом ТРТ, должны минимизировать любые утечки трития на всех этапах его использования и минимизировать выбросы трития в окружающую среду с соблюдением принципов оптимизации, изложенных в Федеральном законе № 3 «О радиационной безопасности населения» и требованиях других нормативных актов в области радиационной безопасности [19, 21—27].

Управление перечисленными системами следует организовывать и вручную, и с помощью обязательной для особо опасных объектов автоматической структурированной системы мониторинга и управления инженерными системами, которая интегрирована в общую систему диспетчеризации инженерных систем инфраструктуры ТРТ [28].

Далее рассмотрим подробнее особенности этих систем.

**Система вакуумной откачки плазменной камеры.** Все рабочие газы и продукты реакций из плазменного разряда откачиваются системой вакуумной откачки, состоящей из турбомолекулярных и форвакуумных насосов, в накопительный ресивер, а далее, при необходимости, в ТТК, где происходит их очистка, выделение изотопов дейтерия и трития для их сохранения и дальнейшего использования в качестве топлива. Представляет интерес использование СПМ-насосов Лившица, которые позволяют осуществить селективную откачку изотопов водорода с выделением их из газовой смеси с помощью сверхпроницаемых мембран и возврат в систему подачи топлива [2]. Для отработки этой технологии в условиях ТРТ на дотритиевой стадии предполагается установка сверхпроницаемых мембран в одну из 16 откачных линий, чтобы при переходе ТРТ на работу с тритием применить отработанную технологию в масштабах всего реактора и осуществить таким образом внутренний рециклинг всей топливной смеси. Следует отметить, что работоспособность СПМ в режиме рециклинга трития была подтверждена в работе [29].

Для форвакуумных насосов системы вакуумной откачки плазменной камеры ТРТ, установленных в отдельном помещении, возможно организовать общую герметичную область либо каждый форвакуумный насос установить в боксовую камеру. Также предполагается рассмотреть возможность модификации разработанных в РФ спиральных и винтовых безмасляных насосов в цельнометаллических конструкциях без использования органических уплотнителей.

Специфика вакуумной откачки с рабочими смесями, содержащими тритий, в основном будет заключаться в периодических мерах по удалению остаточного трития с поверхностей вакуумной камеры, вакуумных трубопроводов и насосов (безмасляные), контроле атмосферы помещений с насосами на наличие изотопов водорода. Перед отключением насосов необходимо их прогреть для удаления трития с внутренних поверхностей. Для удаления трития с поверхности вакуумных трубопроводов необходимо также предусмотреть возможность их прогрева.

По конструктивному исполнению трубопроводов, транспортирующих тритийсодержащие смеси, предпочтительны магистрали по типу «труба в трубе» с защитным вакуумом для предотвращения попадания трития в помещение при аварийной разгерметизации внутренней трубы.

**Влияние трития на органические материалы и на материалы электрических изоляторов.** Основные опасности при воздействии трития на материалы:

— замещение тритием атомов протия в органических соединениях будет вызывать ухудшение характеристик электрических изоляторов и эластомеров;

— замещение тритием атомов протия в стенках из нержавеющей стали может повышать содержание трития в установке в целом;

— тритиевая вода имеет высокую коррозионную активность, поскольку при бета-распаде трития в  $^3\text{He}$  происходит выделение атомарного кислорода [30];

— образование тритийсодержащего метана.

При обнаружении повышенной активности в узлах инженерных систем требуется контролировать состояние изоляции, эластомерных уплотнений и, в случае необходимости, своевременно их заменять.

**Система кондиционирования плазменной камеры.** Тритий как продукт реакций DT и DD из-за своей высокой проникающей способности диффундирует в объем материала вакуумной камеры. Очистка поверхностей от трития представляет собой сложную комплексную задачу. Здесь подразумеваются тритиевые загрязнения на поверхности, объемные включения в приповерхностном слое в пылевые зольные отложения (продукты эрозии, отслоения материалов дивертора и первой стенки, контактирующих с плазмой). Очистка проводится в процессе специальных мероприятий и при удалении любых загрязнений и примесей с внутренних поверхностей во время подготовки вакуумной камеры к экспериментам (так называемого кондиционирования для улучшения качества плазменного разряда), в период

технологического перерыва между сериями экспериментов. Как показывает опыт (JET, TFTR, LHD), даже после специальных мероприятий по очистке и удалению трития из вакуумной камеры в ней может оставаться до 20% содержащегося трития. На ТРТ предусмотрены система прогрева первой стенки (до 170 °С) и система тлеющего разряда. При этом важно учитывать и контролировать общий баланс трития: сколько нарабатывается в эксперименте, сколько удаляется и перерабатывается в ТТК, сколько остаётся в камере и ТТК, сколько удаляется при техническом обслуживании, сколько поступает в хранилище радиоактивных отходов и в захоронения, а также сколько выбрасывается в атмосферу.

**Система газонапуска.** Выделяемые в ТТК и СПМ-насосах Лившица дейтерий и тритий хранятся в специальных геттерных аппаратах хранения и при необходимости поступают в систему топливоподдачи для их использования в экспериментах в качестве топлива. Представляется перспективной для ТРТ так называемая система внутреннего рециклинга топливной смеси в случае использования СПМ-насосов Лившица. Сверхпроницаемые мембраны выделяют из продуктов выхлопа реактора изотопы водорода с высокой и достаточной чистотой для их дальнейшего использования в качестве топлива. В этом случае нет необходимости направлять выделенные изотопы в ТТК для их очистки и разделения. На выходной стороне сверхпроницаемой мембраны осуществляются аккумуляция выделенных изотопов водорода и последующее их направление в систему подачи топлива, а далее в камеру ТРТ. Таким образом осуществляется рециклинг термоядерного топлива внутри самого токамака.

**Общеобменная, специальная и аварийная вентиляция, кондиционирование здания.** Загрязнённый тритием воздух из боксовых камер, саншлюзов, вытяжных камер специальной вентиляции поступает в ТТК для очистки, а затем выбрасывается в атмосферу.

В случае аварии с выбросом трития вентиляция экспериментального зала или помещения, где произошла утечка трития, выключается, и загрязнённый воздух поступает через систему специальной вентиляции в ТТК для очистки.

Подсистема детритизации ТТК включает в себя две параллельные установки очистки: установка очистки сбросных и технологических потоков производительностью от 0,5 до 5 м<sup>3</sup>/ч; установка детритизации атмосферных и вентиляционных газов производительностью от 5 до 50 м<sup>3</sup>/ч. Параметры подсистемы детритизации позволяют обеспечить заданную сбросную концентрацию трития (не более 5 · 10<sup>6</sup> Бк/м<sup>3</sup>) при любом режиме работы.

**Специальная канализация.** Все загрязнённые тритированной водой стоки из системы специальной канализации поступают в ТТК для очистки, а затем после обработки удаляются в систему водоотведения или в хранилище радиоактивных отходов.

**Хранилище радиоактивных тритийсодержащих отходов.** Жидкие и твёрдые радиоактивные отходы концентрируются и хранятся в специальных резервуарах, а затем вывозятся для захоронения.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Одной из важнейших задач в создании термоядерного реактора является обеспечение безопасной работы с количествами трития, характеризующегося высокой радиотоксичностью. Уже на стадии работы с DD-плазмой и инжекционным нагревом ожидается наработка трития. Как показали оценки, тритий нарабатывается по двум каналам: в максвелловской плазме при термоядерных температурах и при взаимодействии плазмы с атомарными пучками инжекторов, причём при температуре 10 кэВ наработка трития на атомарных пучках превышает наработку в максвелловской плазме более чем в 4 раза. Было получено, что на установке ТРТ в базовом сценарии за 100 с работы нарабатывается 200—300 мкг трития с активностью 2,8 Ки (1,065 · 10<sup>11</sup> Бк), что соответствует 1,27 · 10<sup>7</sup> Бк/м<sup>3</sup>.

В таких условиях при попадании трития в атмосферу помещения рабочей зоны и при невозможности определения химической формы трития превышение допустимой среднегодовой активности составит 30 раз для одного импульса. Таким образом, для токамака ТРТ в случае DD-плазмы с тремя сдвоенными инжекторами с энергией пучков 500 кэВ существует «тритиевая угроза» для рабочих помещений и систем инфраструктуры, которые имеют непосредственное соприкосновение с тритием. В дальнейшем следует провести более тщательные расчёты.

Непосредственно с наработанным в вакуумной камере тритием тесно связаны следующие системы инфраструктуры токамака:

- система вакуумной откачки плазменной камеры и поддержания рабочего давления, включая ФН, ТМН и СПМ-насосы Лившица;
- система вакуумной откачки криостата, включая крионасосы и форвакуумные насосы;
- система кондиционирования плазменной камеры;
- система газонапуска;
- специальная и аварийная вентиляция здания;
- специальная канализация;
- хранилище радиоактивных тритийсодержащих отходов.

Для предотвращения проникновения трития в помещения при нормальной эксплуатации установки, минимизации любых утечек, выбросов трития в окружающую среду и в случае аварийной разгерметизации необходимо реализовать следующие меры:

- система барьеров безопасности и многозональная защита;
- контроль давления воздуха и использование инертных газов;
- создание герметичного конфаймента;
- использование двухконтурных схем для инженерных систем;
- автоматизированная система радиационного мониторинга и реагирования.

Таким образом, для установки такого масштаба, как ТРТ, необходимо спроектировать систему инфраструктуры токамака с учётом наработки трития в плазменных экспериментах, чтобы обеспечить надёжную и безопасную работу токамака.

Работа выполнена по государственному контракту от 22.04.2024 № Н.4к.241.09.1043 в рамках НИОКР «Разработка эскизного проекта тритиевого комплекса, технического предложения по инфраструктуре инжекторного стенда и создание элементов энергетической системы электропитания токамака ТРТ. Этап 2024 года».

## 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. Токамак с реакторными технологиями (TRT): концепции, миссии, основные особенности и ожидаемые характеристики. — *Физика плазмы*, 2021, т. 47, № 11, с. 970—985.
2. Livshits A.I. Superpermeability of Solid Membranes and Gas Evacuation. Part 1. Theory. — *Vacuum*, 1979, vol. 29, p. 103—113.
3. Беловодский Л.Ф., Гаевой В.К., Гришмановский В.И. Тритий. — М.: Энергоатомиздат, 1985.
4. Аникин А.С., Семенов А.А., Лизунов А.В., Розенкевич М.Б., Родионов Н.Б., Хайров А.Р., Рудов А.В., Кондрашов В.Н. Система тритиевого цикла токамака с реакторными технологиями. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2024, т. 47, вып. 2, с. 31—39.
5. Леонов В.М., Коновалов С.В., Жоголев В.Е., Кавин А.А., Красильников А.В., Куянов А.Ю., Лукаш В.Э., Минеев А.Б., Хайрутдинов Р.Р. Сценарии разряда токамака с реакторными технологиями. — *Физика плазмы*, 2021, т. 47, № 11, с. 986—997.
6. Смирнов Д.В. Скан по электронной плотности для TRT DD. Table-dd\_22.docx, 22.05.2023. Частное сообщение.
7. Huba J.D. NRL Plasma Formulary. — Washington DC: Naval Research Laboratory, 2013, p. 44—45.
8. Bosh H.S., Hale G.M. Improved Formulas for fusion Cross-sections and Thermal Reactivities. — *Nuclear Fusion*, 1992, vol. 32, p. 611—631.
9. Пистуневич В.И. Некоторые задачи токамака с инъекцией быстрых нейтронов. — *Физика плазмы*, 1976, вып. 2, № 1, с. 3—29.
10. Bornschein L., Glugla M., Günther K., Lässer R. Tritium tests with a technical PERMCAT for final clean-up of ITER exhaust gases. — *Fusion Engineering and Design*, 2003, vol. 69, № 1—4, p. 51—56.

11. **Перевезенцев А.Н., Розенкевич М.Б., Пак Ю.С., Марунич С.А., Букин А.Н.** Фазовый изотопный обмен как метод детритизации газов. — Теоретические основы химической технологии, 2013, т. 47, № 1, с. 54—61.
12. **Карпов Д.А., Литуновский В.Н.** Пленочный аккумулятор водорода: способ производства и перспективы применения. — В сб.: Труды 13-й Международной конференции «Пленки и покрытия-2017». Санкт-Петербург, 18—20 апреля 2017 г. — Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического университета, 2017, с. 507—510.
13. **Ivanov A.G., Karpov D.A., Chebukov E.S., Yurchenko M.I.** Investigation of Microscale Periodic Ni—Mg—Ni—Mg Film Structures as Metal-Hydride Hydrogen Accumulators. — *Hydrogen*, 2023, vol. 4, p. 226—236.
14. **Юхимчук А.А., Виноградов Ю.И., Голубков А.Н., Гришечкин С.К., Дёмин А.М., Дёмин Д.Л., Первозчиков В.В., Родин А.М., Тер-Акопьян Г.М., Харитонов В.М.** Научно-экспериментальные комплексы для безопасного обращения с тритием и его соединениями в интересах фундаментальных и прикладных исследований. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2013, т. 36, вып. 3, с. 26—52.
15. **DOE Handbook Tritium Handling and Safe Storage**, id: DOE HDBK 1129-2008. 12/08.
16. **Hongsuk Chunga, Myunghwa Shima, Hiroshi Yoshidab, Haksu Jin.** Korea's progress on the ITER tritium systems. — *Fusion Engineering and Design*, 2009, vol. 84, p. 599—603.
17. **Zhenyang Li, Shiyuan Liu, Yanhui Pu, Gang Huang, Yingbo Yuan, Ruiqi Zhu, Xufeng Li, Chunyan Chen, Gao Deng, Haihan Zou, Peng Yi, Ming Fang, Xin Sun, Junzhe He, He Cai, Jiexiang Shang, Xiaofang Liu, Ronghai Yu, Jianglan Shui.** Single-crystal ZrCo nanoparticle for advanced hydrogen and H-isotope storage. — *Nature Communications*, 2023, vol. 14(1), p. 7966; doi: 10.1038/s41467-023-43828-5.
18. **Ivanov A.G., Karpov D.A., Chebukov E.S., Yurchenko M.I.** Investigation of Multilayer Ni—Mg—Ni—Mg Film Structures and Development of a Prototype of Film Metal-Hydride Hydrogen Accumulator. Preprint; doi: 10.20944/preprints202503.0328.v1.
19. **СП 2.6.1.2612-10.** Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности (ОСПОРБ 99/2010). Санитарные правила и нормативы. Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 26.04.2010 № 40. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. 83 с.
20. **Yukhimchuk A.A.** Tritium-related activities in the Russian Federation. — *Fusion Sci. Technol.*, 2020, vol. 76, p. 567—577.
21. **О радиационной безопасности населения.** ФЗ от 09.01.1996 № 3-ФЗ.
22. **СП 2.6.1.05-04.** Радиационная безопасность при работе с тритием и его соединениями (СП РБ-РТС-04). Санитарные правила. Зарегистрировано Минюстом России 09.03.2004, регистрационный № 5332.
23. **СанПиН 2.6.1.2523-09.** Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. Утверждены и введены в действие постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации Г.Г. Онищенко от 7 июля 2009 г. № 47. — М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. 100 с.
24. **МУ 2.6.1.15-02.** Методические указания. Тритий и его соединения. Контроль величины индивидуальной эффективной дозы внутреннего облучения при поступлении в организм человека.
25. **МУ 2.6.5.033-2017.** Методические указания. Организация вентиляции на радиационно опасных предприятиях (производствах) Госкорпорации «Росатом».
26. **НП-036-23.** Правила устройства и эксплуатации систем вентиляции, важных для безопасности, атомных станций.
27. **СТО 1.1Л.01.0678-2015.** Основные правила обеспечения эксплуатации атомных станций.
28. **ГОСТ Р 22.1.12-2005.** Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Структурированная система мониторинга и управления инженерными системами зданий и сооружений. Общие требования.
29. **Musyaev R.K., Lebedev B.S., Grischekin S.K., Yukhimchuk A.A.** Tritium Superpermeability: experimental investigation and simulation of tritium recirculation in «Prometheus» setup. — *Fusion Science and Technology*, 2005, vol. 48, p. 35—38.
30. **Велихов Е.П., Путвинский С.В.** Термоядерная энергетика. Статус и роль в долгосрочной перспективе. Доклад от 22.10.1999, выполненный в рамках Energy Center of the World Federation of Scientists; <https://scorcher.ru/art/science/termo/1.php>.



Владимир Николаевич Кондрашов, ведущий научный сотрудник, к.ф.-м.н.; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
vlnkondrashov@triniti.ru



Николай Борисович Родионов, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н.; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
nbrodnik@triniti.ru



Денис Сергеевич Родионов, младший научный сотрудник; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
denisqar@triniti.ru



Владимир Николаевич Докука, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
dokuka@triniti.ru



Рустам Рашитович Хайрутдинов, ведущий научный сотрудник, д.ф.-м.н.; АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия  
khayr@triniti.ru



Александр Сергеевич Аникин, заместитель директора, начальник научно-исследовательского отдела, к.т.н.; АО «ВНИИНМ», 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а, Россия  
ASAnikin@bochvar.ru



Александр Александрович Семенов, главный эксперт, к.х.н.; АО «ВНИИНМ», 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а, Россия  
AASemenov@bochvar.ru



Алексей Владимирович Лизунов, директор отделения, к.т.н.; АО «ВНИИНМ», 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а, Россия  
AVLizunov@bochvar.ru



Алексей Николаевич Букин, старший научный сотрудник, к.т.н.; АО «ВНИИНМ», 123098, Москва, ул. Рогова, д. 5а, Россия  
aleks.bukin88@gmail.com



Дмитрий Алексеевич Карпов, начальник отделения, к.т.н.; АО «НИИЭФА», 196641, Санкт-Петербург, пос. Металлострой, дорога на Металлострой, д. 3, Россия  
karpovd@sintez.niiefa.spb.su

Статья поступила в редакцию 12 декабря 2024 г.

После доработки 16 апреля 2025 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 57—70.

УДК 621.039.665

## МОЛИБДЕНОВЫЕ ЛАЗЕРНЫЕ ЗЕРКАЛА ДЛЯ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ СИСТЕМ ТОКАМАКА ТРТ

*А.Г. Раздобарин<sup>1,2</sup>, Д.И. Елец<sup>2</sup>, И.М. Букреев<sup>2</sup>, А.М. Дмитриев<sup>2</sup>, О.С. Медведев<sup>2</sup>, Е.Е. Мухин<sup>1,2</sup>,  
Л.А. Снизгирев<sup>2</sup>, С.Ю. Толстяков<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Частное учреждение «ИТЭР-Центр», Москва, Россия

<sup>2</sup>ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург, Россия

В работе рассмотрена возможность использования молибдена марки МЧВП в качестве материала внутривакуумных лазерных зеркал в токамаке ТРТ как альтернативы монокристаллическим молибденовым зеркалам. Премонстрирована динамика модификации поверхности зеркал под действием излучения импульсного лазера. Исследована зависимость порога лазерного пробоя от числа лазерных импульсов. Сравнение экспериментальных результатов с моделью лазерно-индуцированного усталостного разрушения молибденовых зеркал показало, что отклонение от модели обусловлено явлением селективной эрозии поверхности в лазерном пятне вследствие наличия зёрен с различной ориентацией.

**Ключевые слова:** токамак с реакторными технологиями, оптические диагностики, лазерные зеркала, молибденовые зеркала.

## MOLIBDENUM LASER MIRRORS FOR DIAGNOSTIC SYSTEMS OF TRT TOKAMAK

*A.G. Razdobarin<sup>1,2</sup>, D.I. Elets<sup>2</sup>, I.M. Bukreev<sup>2</sup>, A.M. Dmitriev<sup>2</sup>, O.S. Medvedev<sup>2</sup>, E.E. Mukhin<sup>1,2</sup>,  
L.A. Snigirev<sup>2</sup>, S.Yu. Tolstyakov<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>Institution «Project Center ITER», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Ioffe institute, Saint-Petersburg, Russia

The paper considers “MChVP” molybdenum as a material for in-vacuum laser mirrors in the TRT tokamak as an alternative to single-crystal molybdenum mirrors. The dynamics of mirror surface modification under the impact of pulsed laser radiation is demonstrated. The dependence of the laser breakdown threshold on the number of laser pulses is investigated. Comparison of the experimental results with the model of laser-induced fatigue failure for molybdenum mirrors showed that the deviation from the model is due to the phenomenon of selective erosion of the surface in the laser spot stems from the presence of grains with different orientations.

**Key words:** Tokamak with Reactor Technologies, optical diagnostics, laser mirrors, molybdenum mirrors.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В проектируемом токамаке с реакторными технологиями ТРТ реализация оптических методов исследования плазмы и поверхности первой стенки сопряжена с необходимостью размещения диагностических элементов внутри вакуумного объёма. В ряде диагностик, таких как томсоновское рассеяние [1], диагностика накопления изотопов водорода [2] или монитор эрозии первой стенки [3], использующих мощное импульсное лазерное излучение для исследования параметров плазмы или состояния первой стенки, вопрос выбора материалов и конструкции внутривакуумных лазерных зеркал является одним из определяющих. Размещаемые вблизи границы плазмы зеркала будут подвержены высоким тепловым и радиационным нагрузкам. Кроме того, при необходимости работы диагностики во время рабочих разрядов установки зеркала будут запыляться продуктами эрозии взаимодействующих с плазмой элементов или распыляться потоками быстрых частиц. В совокупности такие внешние условия эксплуатации существенно ограничивают выбор материалов и конструкций при проектировании систем ввода лазерного излучения. Одним из наиболее перспективных вариантов является использование цельнометаллических молибденовых зеркал.

Молибденовые зеркала планируется использовать в большинстве оптических диагностик ИТЭР в качестве первых элементов систем сбора света [4]. В то же время в диагностиках томсоновского рассе-

яния в диверторе и в краевой плазме [5] молибденовые зеркала будут установлены в оптических ловушках, предназначенных для поглощения и диссипации лазерного излучения. Следует отметить, что в ловушках лазерного излучения, расположенных в непосредственной близости к плазме, как и для первых собирающих зеркал большинства оптических диагностик в ИТЭР, предполагается использовать монокристаллический молибден. В данной работе рассмотрена возможность использования зеркал из молибдена марки МЧВП в качестве альтернативы существенно более дорогим и сложным в производстве монокристаллическим молибденовым зеркалам.

## 2. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ УСТАНОВКА

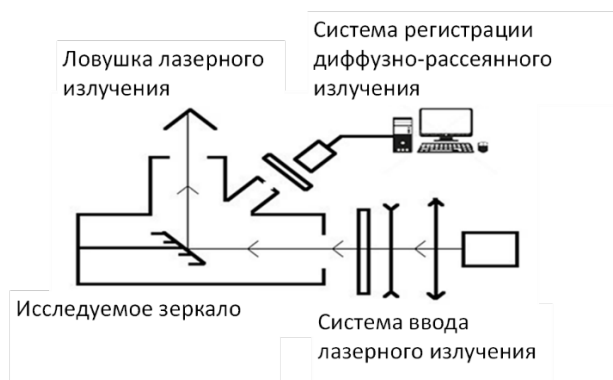


Рис. 1. Схема регистрации диффузного отражения в результате лазерно-индуцированной деградации поверхности

диффузного отражения сопоставлялась с морфологическими изменениями поверхности зеркала. Морфология поверхности зеркал исследовалась методами электронной сканирующей микроскопии (СЭМ).

Микрофотографии изменения морфологии поверхности Мо-зеркала из материала марки МЧВП по мере увеличения времени экспозиции с плотностью энергии  $0,8 \text{ Дж/см}^2$  показаны на рис. 2. При увеличении количества лазерных импульсов поверхность образца постепенно деградирует. В процессе можно выделить несколько стадий разрушения. Как следует из рис. 2, б, уже после первых 2000 импульсов наблюдается увеличение контраста на границах зёрен, что свидетельствует о начале разрушения по границам. Увеличение экспозиции последовательно приводит к частичному выкрашиванию зёрен и оплавлению поверхности (рис. 2, в, г). На основе микроскопического анализа можно выбрать критерии недопустимой деградации зеркала и определить таким образом порог лазерно-индуцированного разрушения. Если предположить, что они должны отражать значительные изменения, потенциально опасные для целостности зеркала, то таким критерием можно выбрать начало оплавления зёрен. Интенсивность собранного рассеянного света использовалась в эксперименте как индикатор, отражающий состояние поверхности зеркала. Принималось, что пробой наступает при достижении интенсивности диффузно рассеянного излучения, соответствующей началу оплавления зёрен. Такой выбор критерия позволил провести далее сравнение порогов разрушения поликристаллических и монокристаллических молибденовых зеркал.

## 3. ЛАЗЕРНАЯ СТОЙКОСТЬ МОЛИБДЕНА МАРКИ МЧВП

Время экспозиции и соответствующая кратность роста диффузного отражения лазерного излучения приведены на рис. 2. Из рисунка видно, что первые признаки выкрашивания наблюдаются при увеличении исходного диффузного отражения в 4 раза.

Скорость деградации поверхности зеркала зависит от плотности энергии падающего излучения. На рис. 3 показана динамика роста диффузного излучения для нескольких значений плотности энергии лазера. Согласно модели усталостного разрушения металлических зеркал при многоимпульсном воздействии лазера [6], порог разрушения зависит от числа лазерных импульсов как  $T_N = T_1 \cdot N^{s-1}$  ( $\text{Дж/см}^2$ ), где

$T_1$  и  $T_N$  — пороги разрушения при воздействии одного и  $N$  импульсов соответственно,  $s$  — безразмерный коэффициент. Для монокристаллического молибдена в [7] были определены значения параметров  $T_1 = 3 \pm 0,5$  Дж/см<sup>2</sup> и  $s = 0,89$ .

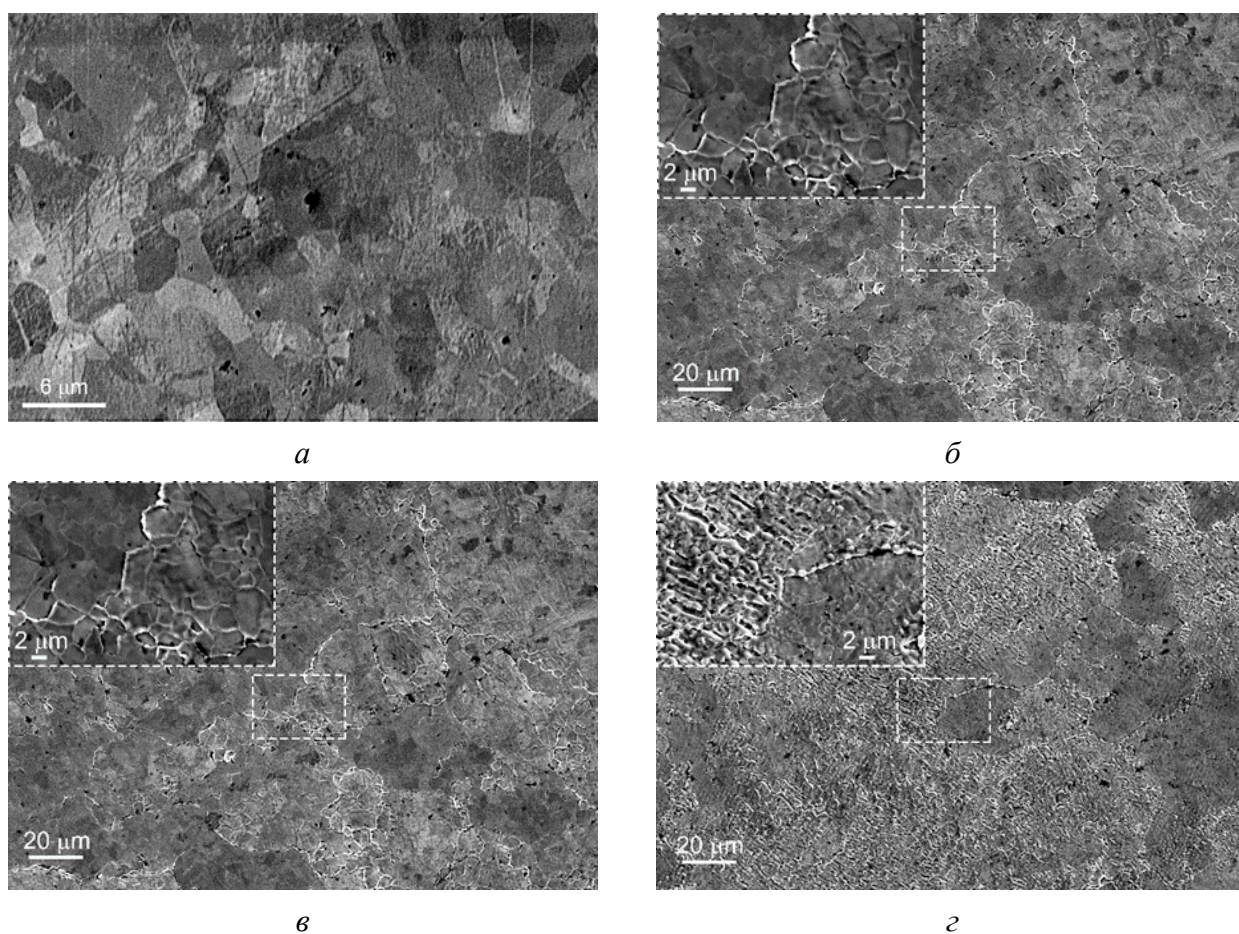


Рис. 2. СЭМ-изображение модификации поверхности Мо-зеркала из материала марки МЧВП в ходе лазерной экспозиции с плотностью энергии 0,8 Дж/см<sup>2</sup>: *а* — исходная поверхность; *б* — 2000 импульсов, увеличение исходного диффузно рассеянного сигнала в 2 раза; *в* — 4000 импульсов, увеличение исходного диффузно рассеянного сигнала в 4 раза; *г* — 9000 импульсов, увеличение исходного диффузно рассеянного сигнала в 8 раз

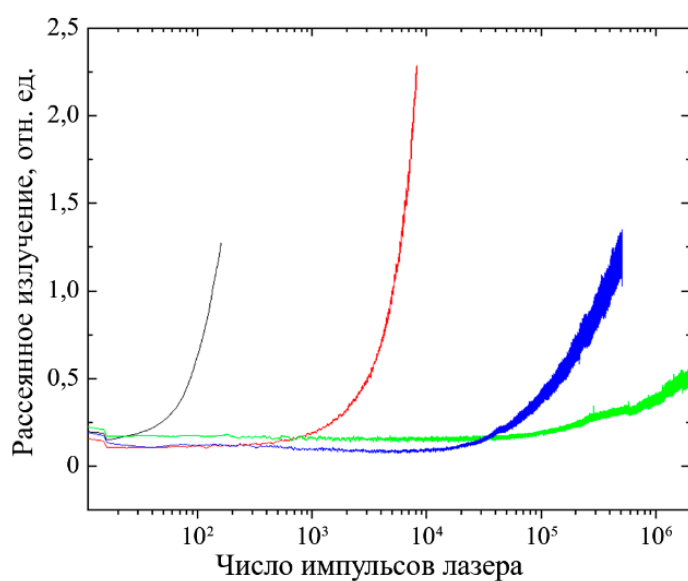


Рис. 3. Динамика диффузно рассеянного света от зеркала из молибдена марки МЧВП с ростом экспозиции для различных значений плотности энергии: — — 1,9 Дж/см<sup>2</sup>; — — 0,8 Дж/см<sup>2</sup>; — — 0,7 Дж/см<sup>2</sup>; — — 0,5 Дж/см<sup>2</sup>

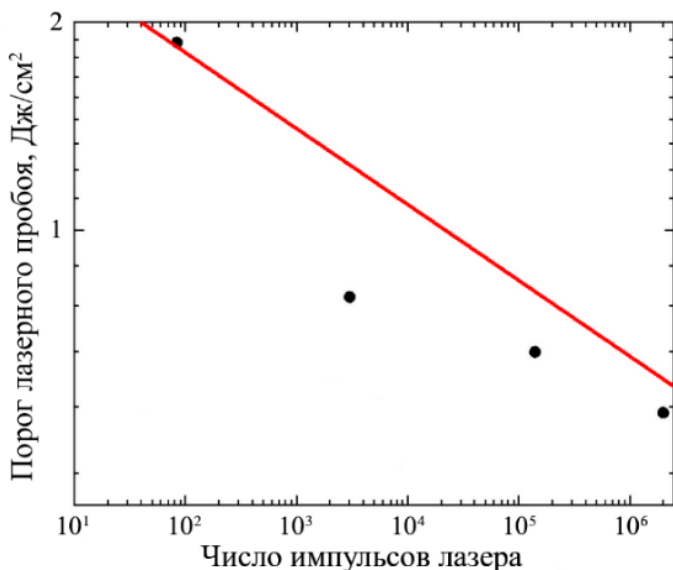
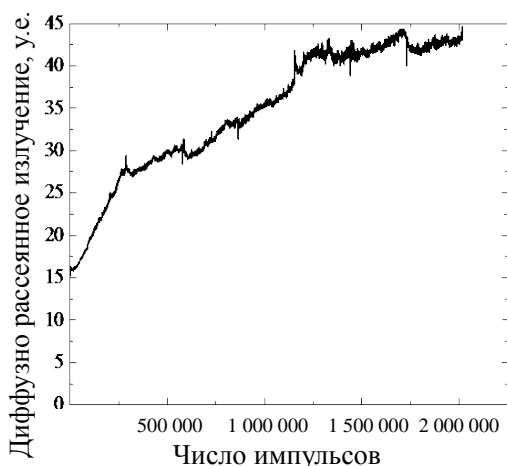


Рис. 4. Сравнение экспериментальной зависимости порога лазерно-индуцированного пробоя зеркала из молибдена марки МЧВП с расчётом согласно модели усталостного разрушения [7]: ● — эксперимент; — данные из [6]

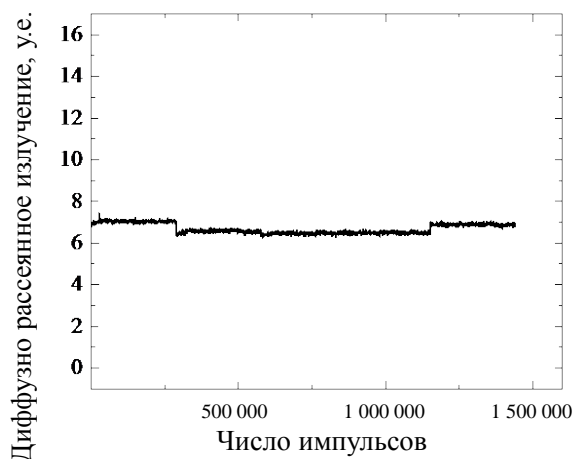
Сравнение предсказательной модели с полученными в [7] коэффициентами с результатами измерений (рис. 4) показывает, что для молибденового зеркала зависимость порога пробоя от числа импульсов плохо описывается предложенной степенной формулой. Данный факт свидетельствует о том, что модель усталостного разрушения, построенная в предположении однородных по поверхности тепловых и механических свойств материала, неприменима в случае, если размер лазерного пятна существенно превышает размеры зёрен материала.

#### 4. СРАВНЕНИЕ ЛАЗЕРНОЙ СТОЙКОСТИ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО И ПОЛИКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО МОЛИБДЕНА

На рис. 5 приведены результаты сравнения лазерно-индуцированной деградации оптических свойств зеркал из молибдена МЧВП и монокристаллического (SC) молибдена с ориентацией [100] при облучении лазерными импульсами с плотностью энергии 0,5 Дж/см<sup>2</sup>. На рис. 6 показаны микроскопические изображения поверхностей этих же зеркал после облучения. Суммарная экспозиция составила 2 · 10<sup>6</sup> и 1,5 · 10<sup>6</sup> импульсов соответственно. Начальные значения интенсивности диффузно рассеянного излучения различаются для двух зеркал из-за различной чувствительности схемы регистрации в двух экспериментах. Исследования исходного диффузного отражения на зеркалах не проводились, и хотя полировка обоих исследуемых зеркал соответствует одинаковому (IV) классу чистоты, можно предположить, что для поликристаллического зеркала оно было несколько выше из-за рассеяния на границах зёрен.



*a*



*б*

Рис. 5. Динамика интенсивности диффузного рассеянного света при многоимпульсном лазерном воздействии, плотность энергии 0,5 Дж/см<sup>2</sup>, 12 нс: *a* — зеркало из молибдена марки МЧВП; *б* — зеркало из монокристаллического молибдена с ориентацией [100]

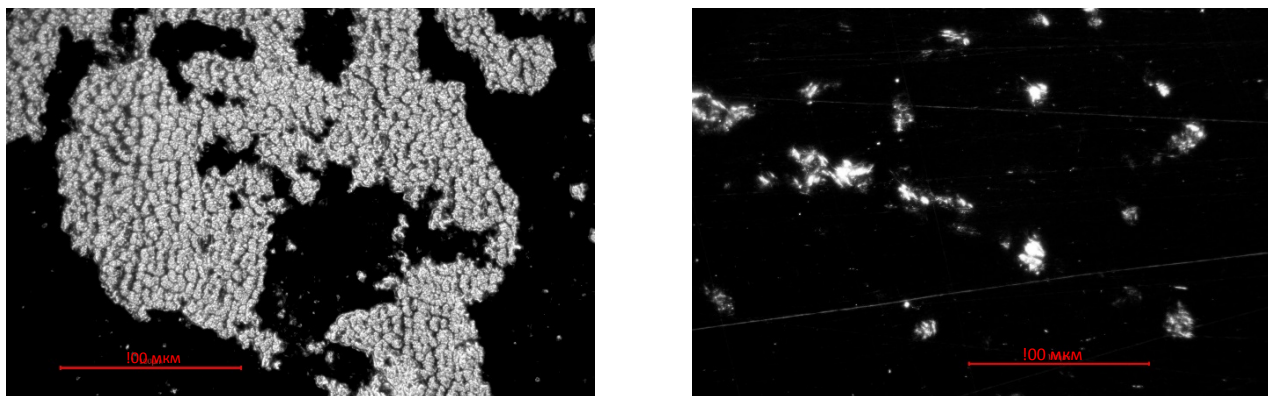


Рис. 6. Влияние лазерного облучения на зеркала из молибдена марки МЧВП и монокристаллического молибдена с ориентацией [100], плотность энергии  $0,5 \text{ Дж/см}^2$ ,  $12 \text{ нс}$ : *a* — зеркало из молибдена марки МЧВП, суммарная экспозиция  $2 \cdot 10^6$  импульсов; *б* — зеркало из монокристаллического молибдена с ориентацией [100], суммарная экспозиция  $1,5 \cdot 10^6$  импульсов

Как следует из рис. 5, 6, воздействие  $\sim 1,5 \cdot 10^6$  импульсов не приводит к заметному изменению оптических характеристик и морфологии поверхности монокристаллического молибденового зеркала, в то время как молибден МЧВП претерпевает значительную деградацию, приводящую к увеличению диффузного рассеяния. При этом лазерное облучение по-разному воздействует на различные зёрна на поверхности. На рис. 6 видно, что на части зёрен наблюдается развитие шероховатости, в то время как другие остаются нетронутыми. Такое селективное разрушение можно объяснить различием теплофизических или механических свойств молибдена в разных кристаллографических направлениях.

Анизотропия температуропроводности и/или условий перехода от упругой к пластической деформации может приводить к выборочному разрушению зёрен, при котором часть зёрен начинает разрушаться при меньшей плотности энергии и экспозиции, в то время как другая часть остаётся в исходном состоянии, что в итоге приводит к селективной эрозии поверхности. Вследствие наличия в материале зёрен всех ориентаций порог пробоя зеркала совпадает с минимальным порогом для множества зёрен, попавших в лазерное пятно, и имеет меньшее значение, чем в случае монокристаллического молибдена, что и наблюдается на рис. 5 и 6.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе рассмотрена возможность использования молибдена марки МЧВП в качестве материала внутривакуумных лазерных зеркал в токамаке ТРТ как альтернативы существенно более дорогим и сложным в производстве монокристаллическим зеркалам. Показано, что многократное облучение лазерными импульсами приводит к постепенной деградации зеркал, которая последовательно проявляется в заглублении границ зёрен, выкрашивании зёрен и оплавлении поверхности. Наличие в лазерном пятне зёрен материала с различной ориентацией приводит к селективной эрозии, что снижает порог лазерно-индуцированного пробоя зеркал. Наблюдаемая селективная эрозия должна также учитываться в предложенной в [6] модели лазерно-индуцированного усталостного разрушения, что усложняет оценку стойкости зеркала для числа импульсов, превышающих экспозицию, достижимую в лабораторных условиях.

На основании проведённых исследований можно сделать достаточно общую оценку о предельных лазерных нагрузках на зеркала из молибдена марки МЧВП. Для экспозиции  $10^6$  импульсов лазера  $1064 \text{ нм}$  с длительностью  $10 \text{ нс}$  лазерное излучение с плотностью энергии до  $0,5 \text{ Дж/см}^2$  не приводит к заметной механической деградации зеркал и, следовательно, росту диффузно-рассеянного излучения. Следует отметить, однако, что в диагностических схемах ТРТ допустимый уровень рассеянного на зеркале излучения будет определяться в первую очередь ограничением уровня фоновой засветки приёмного детектора диагностики и, следовательно, выбор критерия возникновения лазерно-индуцированного разрушения зеркала может отличаться от используемого в статье. Наиболее критичным ограничением на интенсивность диффузного отражения будет в случае, если система сбора света и ввода лазерного

излучения использует одни и те же первые зеркала, как, например, в диагностике накопления водорода и эрозии первой стенки ТРТ [2, 3].

Другой фактор — полное количество лазерных импульсов за время эксплуатации диагностической системы. В схеме измерения томсоновского рассеяния в плазме полная экспозиция может быть порядка  $10^8$  импульсов и более. В этом случае для более точного прогнозирования величины порога лазерного пробоя поликристаллических молибденовых зеркал необходимы дальнейшие исследования зависимости лазерной стойкости от кристаллографической ориентации молибдена как на монокристаллических, так и на поликристаллических образцах. В то же время для такой диагностики, как анализ накопления водорода в первой стенке, число импульсов за один цикл измерения будет составлять не более нескольких сотен, что в сумме за время жизни диагностики даст количество, сопоставимое с набранными в ходе данного исследования  $2 \cdot 10^6$  импульсами. Соответственно при условии неперевышения плотности энергии на зеркале  $0,5 \text{ Дж/см}^2$  молибден марки МЧВП можно будет использовать для изготовления внутривакуумных зеркал схемы ввода лазерного излучения данной диагностики.

При выборе материала первых зеркал одним из решающих аргументом является стойкость материала к воздействию плазмы. В первую очередь это относится к диагностическим системам, открытым на плазму во время рабочих разрядов. Для таких систем монокристаллические молибденовые зеркала в случае доступности требуемых размеров, очевидно, являются более надёжным и предсказуемым вариантом. Как было неоднократно показано [8], монокристаллический молибден обладает существенно более высокой стойкостью к плазменному распылению по сравнению с поликристаллическим материалом, в котором селективное распыление приводит к возникновению рельефа на поверхности. Зеркала из молибдена марки МЧВП можно рассматривать в качестве альтернативы монокристаллическим зеркалам только при условии их эксплуатации в периоды между рабочими разрядами токамака и защиты от воздействия плазмы специальными шторками.

Работа выполнена при финансовой поддержке за счёт средств государственного контракта от 17.04.2023 № Н.4к.241.09.23.1060 «НИОКР в обоснование программы исследований и технических требований к системам токамака с реакторными технологиями. Этап 2023—2024 годов».

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mukhin E.E., Tolstyakov S.Yu., Kurskiev G.S., Zhiltsov N.S., Ermakov N.V., Tkachenko E.E., Koval A.N., Solovey V.A., Aleksandrov S.A., Nikolaev A.V., Antropov D.A., Bondar A.V., Kedrov I.V., Marchenko T.A., Kornev A.F., Makarov A.M., Bogachev D.L., Samsonov D.S., Guk E.G., Klimov V.N., Smirnova E.P., Sotnikov A.V., Razdobarin A.G., Bazhenov A.N., Bocharov I.V., Bocharnikov V.A., Bukreev I.M., Dmitriev A.M., Elets D.I., Tereshchenko I.B., Varshavchik L.A., Chernakov An.P., Pankrat'ev P.A., Marchii G.V., Minbaev M., Nikolaenko K.O., Kungurtsev N.A., Sakharov N.V., Petrov Yu.V., Mokeev A.N. Set of Thomson Scattering Diagnostics for TRT. — *Plasma Phys. Rep.*, 2024, vol. 50, p. 406—422; <https://doi.org/10.1134/S1063780X24600324>.
2. Razdobarin A.G., Gasparyan Yu.M., Bogachev D.L., Dmitriev A.M., Elets D.I., Koval A.N., Kurskiev G.S., Mukhin E.E., Bulgadaryan D.G., Krat S.A., Marenkov E.D., Alekseenko I.V. Diagnostics Complex of the First Wall and Divertor of Tokamak with Reactor Technologies: Control of Erosion and Temperature and Monitoring of Fusion Fuel Build-up. — *Plasma Phys. Rep.*, 2022, vol. 48, p. 1389.
3. Razdobarin A.G., Shubin Ya.R., Belokur A.A., Bogachev D.L., Elets D.I., Medvedev O.S., Mukhin E.E., Snigirev L.A., Alekseenko I.V. Conceptual Project for Diagnostics of Erosion of the First Wall and Divertor of the Tokamak with Reactor Technologies TRT. — *Plasma Phys. Rep.*, 2024, vol. 50, p. 441—456; <https://doi.org/10.1134/S1063780X24600348>.
4. Litnovsky A., Voitsenya V.S., Reichle R., Walsh M., Razdobarin A., Dmitriev A., Babinov N., Marot L., Moser L., Yan R., Rubel M., Widdowson A., Moon S., Oh S.G., An Y., Shigin P., Orlovskiy I., Vukolov K.Yu., Andreenko E., Krimmer A., Kotov V., Mertens Ph. and for the Specialists Working Group on First Mirrors of the ITPA Topical Group on Diagnostics. Diagnostic mirrors for ITER: research in the frame of International Tokamak Physics Activity. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 066029.

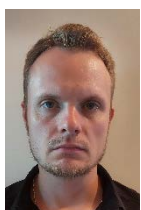
5. **Yatsuka E., Hatae T., Vayakis G., Bassan M., Itami K.** Chevron beam dump for ITER edge Thomson scattering system. — Rev. Sci. Instrum., 2013, vol. 84, p. 103503; doi: 10.1063/1.4824141.
6. **Becker M.F., Ma C., Walser R.M.** Predicting multipulse laser-induced failure for molybdenum metal mirrors. — Applied Optics, 1991, vol. 30—36, p. 5239—5245.
7. **Gorshkov A., Bel'bas I., Sannikov V., Vukolov K.** Frequency laser damage of Mo mirrors. — Fus. Eng. Des., 2003, vol. 66/68, p. 865—869.
8. **Voitsenya V.S., Bardamid A.F., Donn  A.J.H.** Experimental Simulation of the Behaviour of Diagnostic First Mirrors Fabricated of Different Metals for ITER Conditions. — The Open Optics Journal, 2016, vol. 3, p. 23—54.



Алексей Геннадьевич Раздобарин, старший научный сотрудник; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия; главный специалист; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2, Россия  
Aleksey.razdobarin@mail.ioffe.ru



Денис Игоревич Елец, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия  
Elets.Denis@mail.ioffe.ru



Иван Максимович Букреев, научный сотрудник; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия  
Bukreev.I.M@mail.ioffe.ru



Артем Михайлович Дмитриев, научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия  
Dmitriev239@yandex.com



Олег Сергеевич Медведев, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия  
O.Medvedev@mail.ioffe.ru



Евгений Евгеньевич Мухин, заведующий лабораторией, к.ф.-м.н., ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия; ведущий научный сотрудник; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2, Россия  
E.Mukhin@mail.ioffe.ru



Леонид Алексеевич Снигирев, младший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия  
Snigirev@mail.ioffe.ru



Сергей Юрьевич Толстяков, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, 194021, Санкт-Петербург, ул. Политехническая, д. 26, Россия; главный специалист; Частное учреждение «ИТЭР-Центр», 123060, Москва, ул. Расплетина, д. 11, корп. 2, Россия  
S\_Yu\_Tolstyakov@mail.ru

Статья поступила в редакцию 08 ноября 2024 г.

После доработки 15 апреля 2025 г.

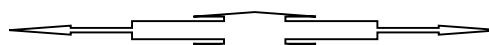
Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 71—77.



**T-11M**



УДК 533.9

## РЕСУРСНЫЕ ИСПЫТАНИЯ ВЕРТИКАЛЬНОГО ЛИТИЕВОГО ЛИМИТЕРА С ВНЕШНЕЙ ПОДАЧЕЙ ЛИТИЯ НА ТОКАМАКЕ T-11M

*Я.А. Васина, В.Б. Лазарев, С.В. Мирнов, А.Н. Щербак, Н.Т. Джигайло, А.В. Зорин, А.С. Пришвицын*  
АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия

В статье представлены результаты испытаний вертикального жидкометаллического литиевого лимитера на основе капиллярно-пористой структуры (КПС) с внешней подачей лития в течение первых двух лет его использования. КПС изготовлена из вольфрамового «войлока» со средним размером пор около 50 мкм. Определён расход лития при длительной эксплуатации лимитера и изучены процессы, ответственные за расход лития. Лимитер может работать без дозаправки литием, по крайней мере, на протяжении 500 рабочих разрядов. Дозаправка литием позволяет восполнить количество лития в лимитере до первоначального значения без разгерметизации камеры токамака. Основной расход лития происходит во время подготовки камеры токамака к рабочим режимам при индукционном прогреве стенок и при тлеющем разряде за счёт химического взаимодействия остаточных паров воды с элементарным литием.

**Ключевые слова:** токамак, литиевый лимитер, внешняя дозаправка литием.

## LIFETIME TESTING OF THE VERTICAL LITHIUM LIMITER WITH EXTERNAL LITHIUM SUPPLY ON T-11M TOKAMAK

*Ya.A. Vasina, V.B. Lazarev, S.V. Mirnov, A.N. Shcherbak, N.T. Djigailo, A.V. Zorin, A.S. Prishvitsyn*  
SRC RF TRINITI, Moscow, Troitsk, Russia

The paper presents the results of tests of the vertical liquid-metal lithium CPS limiter with external lithium supply during the first two years of its operation. The capillary-porous system (CPS) is made of tungsten “felt” with an average porosity of about 50  $\mu\text{m}$ . The lithium consumption during long-term operation of the limiter was determined and the processes responsible for the lithium consumption were studied. It was shown that the limiter can operate without lithium refilling for at least 500 working discharges. Refilling with lithium allows replenishing the amount of lithium in the limiter to the initial value. It was shown that the main consumption of lithium occurs during the preparation of the tokamak chamber for operating modes during induction heating of the walls and during a glow discharge due to the chemical interaction of residual water vapor with elemental lithium.

**Key words:** tokamak, lithium limiter, external lithium refilling.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Защита внутрикамерных элементов токамака жидким металлом с низким зарядом ядра позволяет создать возобновляемое покрытие, которое, с одной стороны, практически не загрязняет центральную реакторную область плазмы, а с другой — охлаждает за счёт излучения периферийную плазму и снижает тепловую нагрузку на лимитер или дивертор. Наиболее перспективным материалом для этой задачи является литий в комбинации с капиллярно-пористой структурой (КПС) из вольфрамового «войлока» [1].

В АО «Красная Звезда» (в наст. вр. подразделение АО «НИКИЭТ») были разработаны различные варианты литиевых лимитеров на основе КПС для российских и зарубежных установок (рис. 1) [2]. Эти внутрикамерные элементы не имели возможности дозаправки литием без разгерметизации вакуумной камеры установки.

Последний вариант лимитера, разработанный в АО «НИКИЭТ» для токамака T-11M, — вертикальный лимитер, в котором предусмотрена система подкачки жидкого лития из внешнего резервуара, что

позволяет производить дозаправку литием КПС без вскрытия вакуумной камеры установки и существенно повышает его ресурс. Такой лимитер позволил провести эксперименты на токамаке в течение длительного периода (более 2 лет) и получить данные по расходу лития в процессе эксплуатации. Анализ этих данных позволил изучить и понять механизм расхода лития из КПС и определить экспериментально рабочий ресурс литиевого лимитера.

Литий — химически активный элемент, который легко взаимодействует с атмосферными газами (кислородом, азотом, парами воды, углекислым газом). Это создаёт технологические сложности при использовании литиевых лимитеров, так как все работы с ними нужно проводить без их

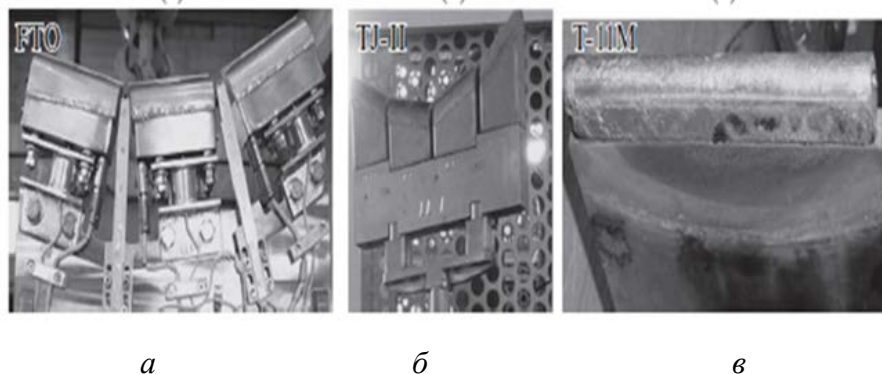


Рис. 1. Литиевые лимитеры на основе КПС нижнего порта FTU (а), TJ-II (б), T-11M [2] (в)

контакта с атмосферой. Поэтому для возможности работы токамака в стационарном режиме необходимо обеспечить дозаправку эмиттера литием без разгерметизации установки.

При использовании лимитера в рабочих разрядах количество лития в нём уменьшается. В итоге это может привести к ухудшению параметров плазмы, срыву разряда и разрушению КПС. Поскольку предполагается работа в стационарном режиме, нужно своевременно проводить дозаправку лимитера литием и контролировать количество лития в КПС. Эксперименты с таким лимитером при длительной работе в токамаке (2 года) позволили определить расход лития лимитером в различных режимах эксплуатации и изучить физико-химические процессы, протекающие на его поверхности.

## 2. ВЕРТИКАЛЬНЫЙ ЛИТИЕВЫЙ ЛИМИТЕР С ВНЕШНЕЙ ПОДПИТКОЙ

В АО «НИКИЭТ» был разработан вертикальный лимитер на основе КПС, дозаправка литием которого осуществляется без разгерметизации камеры токамака. В 2021 г. он был установлен в камеру токамака T-11M и испытан в рабочих разрядах. Устройство состоит из внутрикамерной части, контактирующей с плазмой, а также внешней системы подачи лития (рис. 2) [3]. Внутрикамерная часть имеет промежуточную ёмкость для

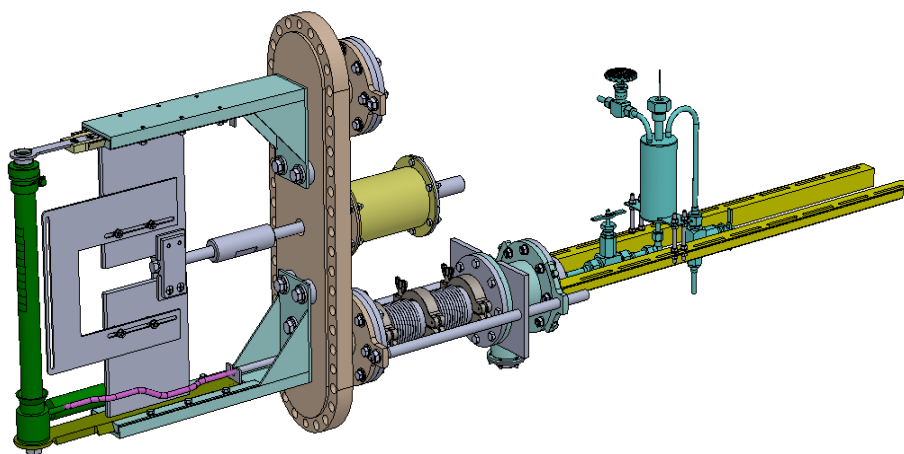


Рис. 2. Модель вертикального лимитера с внешней подачей лития

подачи лития в КПС. Внешняя система содержит резервуар с запасом лития объёмом 300 см<sup>3</sup> и прогреваемый трубопровод подачи лития в промежуточную ёмкость лимитера. Для прогрева трубопровода используются четыре электрических нагревателя. Для контроля температуры лития в различных частях лимитера и трубопровода используются семь термодатчиков типа хромель-алюмель.

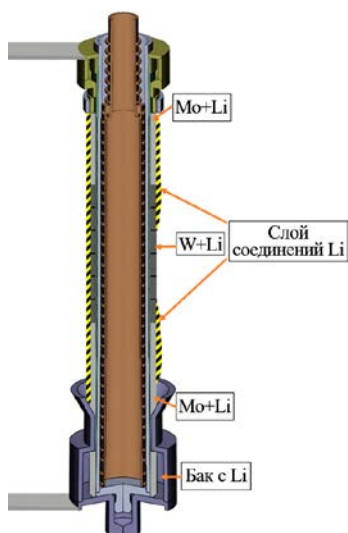


Рис. 3. Трёхмерная модель вертикального лимитера

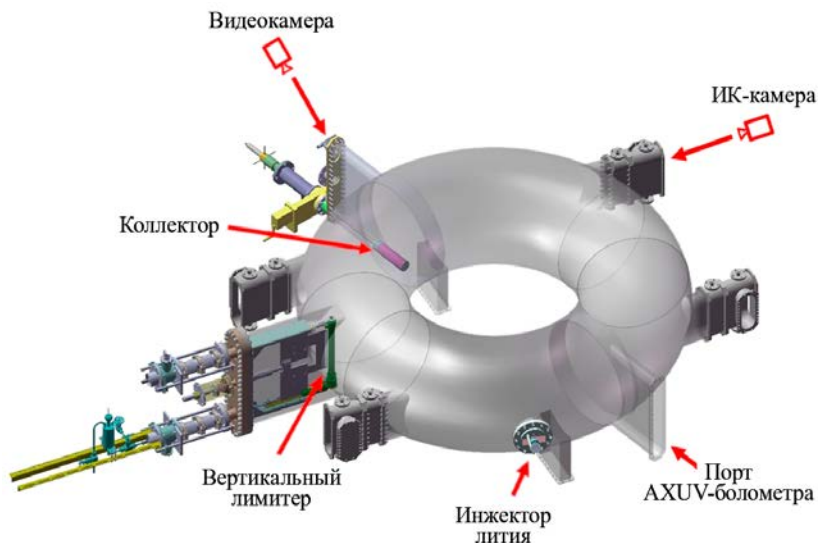


Рис. 4. Расположение основных внутрикамерных элементов токамака Т-11М

Принципиальная схема вертикального лимитера представлена на рис. 3. Он представляет собой трубчатую стальную (12Х18Н10Т) конструкцию, концы которой покрыты сеткой из молибдена (Мо) марки МЧ. Центральная часть конструкции покрыта пористой структурой на основе прессованного вольфрамового «войлока» со средним диаметром пор около 50 мкм.

Вертикальный лимитер установлен на внешнем обводе тора в экваториальном сечении камеры токамака Т-11М и имеет механизм перемещения вдоль её большого радиуса. Расположение лимитера на камере токамака показано на рис. 4, а его внешний вид перед установкой — на рис. 5.

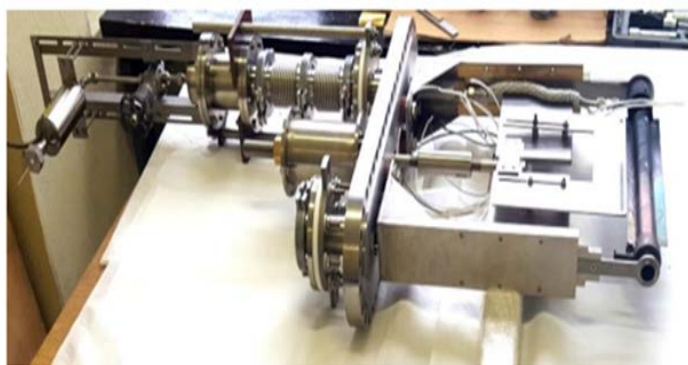


Рис. 5. Общий вид лимитера с внешней подпиткой литием перед установкой [4]

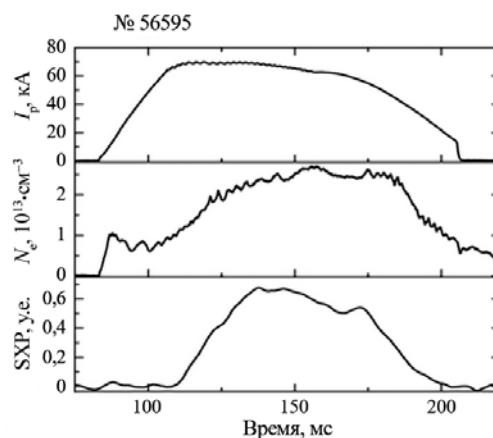


Рис. 6. Типичные осциллограммы основных параметров разряда

Дозаправка лимитера происходит путём перетекания жидкого лития из внешнего резервуара в промежуточную ёмкость лимитера под действием гидростатического давления столба лития или создания избыточного давления гелия. Количество подаваемого лития заранее определяется и измеряется датчиком уровня во внешнем резервуаре. После заправки заданного количества подача лития перекрывается запорным вентилем. Первая экспериментальная серия (ЭС) с вертикальным лимитером в качестве эмиттера лития состояла из 500 рабочих разрядов. Осциллограммы параметров такого разряда представлены на рис. 6. За всё время работы с вертикальным лимитером (2 года) проведено 4000 разрядов и пять циклов дозаправки.

### 3. РАСЧЁТНАЯ ОЦЕНКА РАСХОДА ЛИТИЯ ВО ВРЕМЯ ПЕРВОЙ ЭС ТОКАМАКА T-11M

Первая ЭС с использованием вертикального лимитера в качестве эмиттера лития состояла из 500 рабочих разрядов длительностью 150—200 мс.

Рассмотрим сначала расчётный ресурс лимитера в ходе этой ЭС и определим основные факторы, влияющие на него. Предположим, что металлический литий в основном расходуется из лимитера в ходе рабочих разрядов токамака.

Рассчитаем количество металлического лития, израсходованного за ЭС из 500 рабочих разрядов до первой дозаправки. Ожидаемыми физическими факторами, определяющими расход лития в ходе рабочих разрядов токамака, являются распыление лития ионами дейтерия в плазме и испарение с поверхности нагретого лимитера.

Расчётный расход лития (за 500 разрядов) определяется:

— за счёт распыления

$$m_p = \frac{\Gamma_{\text{Li}} N t A_{\text{Li}}}{N_A}, \quad (1)$$

где  $\Gamma_{\text{Li}} = 0,3 S_p \Gamma_D = 3 \cdot 10^{19}$  ат./с — поток нейтралов лития с лимитера (учитываем, что только 30% частиц лития в виде нейтралов [5]);  $\Gamma_D = N_e / \tau_p = 5 \cdot 10^{20}$  ион/с — усреднённый поток ионов дейтерия на лимитер;  $N_e$  — полное число электронов в плазменном шнуре;  $\tau_p$  — время жизни частиц в плазменном шнуре;  $S_p = 0,17$  — коэффициент распыления лития ионами дейтерия при 215 °C и энергии ионов дейтерия 700 эВ [6];  $N = 500$  — количество разрядов в ЭС до первой дозаправки;  $t = 180$  мс — средняя длительность разряда T-11M;  $A_{\text{Li}} = 6,94 \cdot 10^3$  мг/моль — атомная масса лития;  $N_A = 6,02 \cdot 10^{23}$  ат./моль — число Авогадро;

— за счёт испарения

$$m_n = \frac{V S A_{\text{Li}} t_n}{N_A}, \quad (2)$$

где  $V = 1 \cdot 10^{12}$  ат./с(см<sup>2</sup>·с) — скорость испарения атомов лития с лимитера [7];  $S = 450$  см<sup>2</sup> — площадь испаряющей поверхности лимитера;  $t_n = 5,4 \cdot 10^5$  с — общее время нахождения лимитера при 215 °C.

Суммарный расчётный расход лития за первую ЭС разрядов, определяемый по формулам (1) и (2), составляет 34,3 мг (31,5 мг за счёт распыления и 2,8 мг за счёт испарения). Видно, что преобладающим фактором является распыление плазмы.

### 4. МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАСХОДА ЛИТИЯ

Экспериментально расход лития в вертикальном лимитере определяется как разница между изначально содержащейся в нём массой металлического лития и массой металлического лития в конкретный экспериментальный день. Для определения массы лития использовалась длина плато на температурно-временной зависимости, наблюдаемой при остывании лимитера, так как оно происходит в одинаковых условиях в каждый экспериментальный день (рис. 7). Масса лития, содержащегося в лимитере, в каждый экспериментальный день пропорциональна длине плато. Плато на температуре лимитера соответствует фазовому переходу лития из жидкого состояния в твёрдое, который происходит при постоянной температуре плавления (182 °C). Длительность температурного плато пропорциональ-

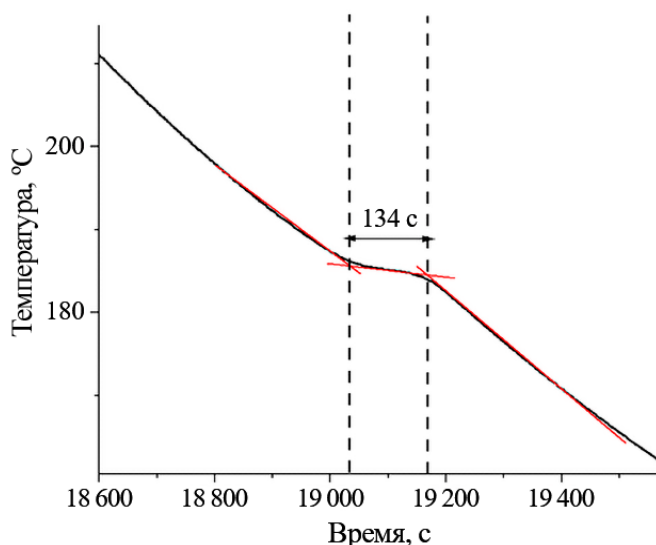


Рис. 7. Динамика температуры вертикального лимитера при его охлаждении

на массе лития, содержащегося в КПС. Чем больше лития содержится в КПС лимитера, тем дольше времени потребуется для перехода его в твёрдое состояние и тем длиннее будет плато на температуре.

### 5. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСХОДА ЛИТИЯ

Каждая ЭС, проводимая на токамаке Т-11М с вертикальным лимитером в качестве эмиттера лития, включает в себя следующие этапы: подготовку камеры токамака к рабочим разрядам (индукционный прогрев, чистка с помощью тлеющего разряда, пробные разряды), проведение рабочих разрядов, когда длительность пробных разрядов превышает 180 мс, дозаправку лимитера литием. Экспериментальный расход лития определялся для первой такой ЭС в целом, включая период подготовки и проведения рабочих разрядов.

Наибольшая длина плато наблюдается до начала ЭС, затем по мере расходования лития она уменьшается (табл. 1).

Таблица 1. Масса лития в лимитере и длина плато на различных этапах экспериментальной кампании

Стадия экспериментальной кампании	Длительность плато, с	Масса лития в лимитере, г
До начала ЭС	256	8,5
Перед дозаправкой литием (конец ЭС)	132	4
После дозаправки	250	8,3

Измеренная длина плато до начала ЭС составила 256 с, что соответствует 8,5 г лития. Длина плато, измеренная сразу после окончания ЭС, составляет 132 с, что соответствует 4 г. Таким образом, расход лития за ЭС составляет 4,5 г. Это в 131 раз больше расчётного суммарного расхода за счёт распыления и испарения. Существуют ещё факторы, влияющие на расход лития.

После окончания ЭС из 500 рабочих разрядов была проведена первая дозаправка лимитера литием. После проведения дозаправки длина плато составила 250 с. Это соответствует массе лития, что практически совпадает с первоначальным значением до начала ЭС. Таким образом, лимитер может успешно работать не менее чем 500 рабочих разрядов без дозаправки.

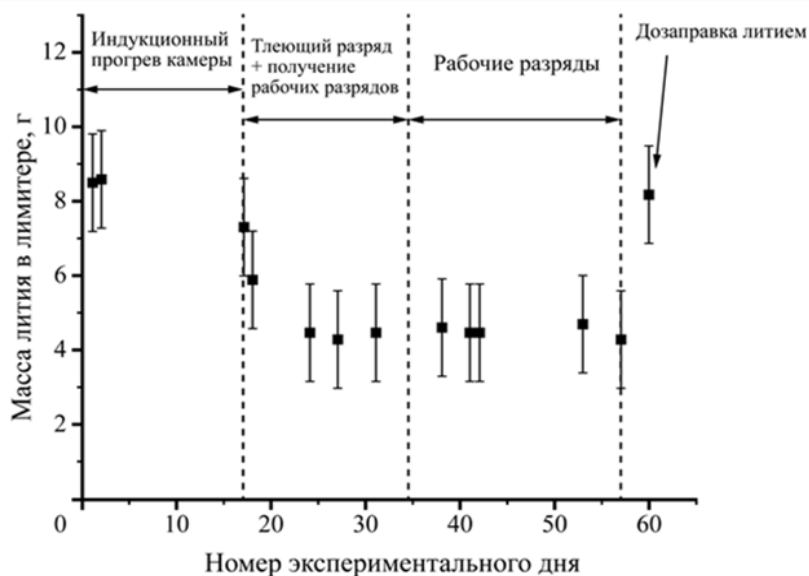


Рис. 8. Динамика изменения массы лития в КПС в ходе ЭС до первой дозаправки

При этом металлический литий, превращаясь в соединение, выпадает из баланса металлического лития, определяемого по методике, приведённой в предыдущем разделе.

Был оценен вклад подготовительных процедур и рабочих разрядов в общий измеренный расход лития. Динамика изменения массы чистого лития в лимитере за ЭС показана на рис. 8. В ходе ЭС до первой дозаправки было израсходовано 4,5 г лития. Основной расход лития (4,2 г) происходит во время подготовки вакуумной камеры токамака к рабочим режимам при индукционном прогреве стенок и тлеющем разряде. Причиной этого, видимо, является образование на лимитере химических соединений лития с остаточными газами в камере токамака — преимущественно с парами воды и кислородом.

## 6. ХИМИЧЕСКИЕ РЕАКЦИИ ЛИТИЯ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ЕГО РАСХОД

**Рентгенофазовый анализ (РФА) наслоений, собранных с лимитера.** За первые два года эксплуатации лимитера на токамаке T-11M проведено 4000 разрядов и пять циклов дозаправки. После такого длительного периода работы при очередной разгерметизации установки был проведён РФА соединений, образовавшихся на поверхности лимитера преимущественно на более холодных концах. Метод РФА основан на получении данных о качественном и количественном химическом (фазовом) составе пробы на основании порошковой рентгеновской дифракции. Данный метод позволяет определить, из каких индивидуальных веществ (фаз) состоит проба и каково их соотношение.

Для проведения РФА была взята проба, содержащая материал наслоений как с концов лимитера, так и из центральной части (см. рис. 3). Наслоения, снятые с лимитера, визуально представляли собой фрагменты полого цилиндра. В дальнейшем с помощью скальпеля их разделили на две равные по массе пробы — на фрагменты внешней (контактирующей с плазмой) и внутренней (непосредственно контактирующей с лимитером) сторон. Суммарная масса наслоений (внешняя и внутренняя стороны), отобранных с вертикального лимитера, составила 10,28 г (по 5,14 г с каждой стороны), а средняя толщина наслоений — 7 мм (обе стороны суммарно).

Наибольший интерес представляла именно внешняя сторона наслоений, которая непосредственно контактировала с остаточной атмосферой камеры токамака и была вовлечена в протекавшие физико-химические процессы. РФА, проведённый для отобранной с внешней стороны наслоений пробы, выявил наличие в ней следующих соединений (фаз):  $\text{Li}_2\text{O}$ ,  $\text{Li}_2\text{C}_2$ ,  $\text{Li}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{LiOH}$  и  $\text{LiH}$ . При этом большая часть лития присутствует в наслоениях в форме его оксида —  $\text{Li}_2\text{O}$ . На долю  $\text{Li}_2\text{O}$  приходится ~85% от общего Li, содержащегося во внешней стороне наслоений (табл. 2).

Таблица 2. Количественные оценки содержания веществ в пробе (внешняя сторона наслоений с вертикального лимитера)

№ п/п	Компонент	M, г/моль	Содержание компонента		Доля атомов Li в форме данного компонента, %
			% мас.	% мол.	
1	$\text{Li}_2\text{O}$	29,88	81,5	79,1	85,0
2	$\text{Li}_2\text{C}_2$	37,90	7,9	6,0	6,5
3	$\text{LiOH}$	23,95	6,0	7,3	3,9
4	$\text{Li}_2\text{CO}_3$	73,89	2,6	1,0	1,1
5	$\text{LiH} + \text{LiD}$	~8,45	1,9	6,5	3,5
	Итого		~100	~100	~100

**Химический механизм образования оксида лития.** Оксид лития  $\text{Li}_2\text{O}$  может образовываться в камере токамака как при взаимодействии с остаточными газами, так и в результате взаимодействия с атмосферой при вскрытии установки. Рассмотрим, возможно ли образование оксида лития в зафиксированных количествах исключительно за счёт взаимодействия с остаточными газами в камере до её вскрытия.

На рис. 9 представлен состав остаточного газа (парциальные давления) в камере токамака во время её прогрева при подготовке к рабочим разрядам. Можно следующим образом соотнести массы индивидуальных остаточных газов с их молекулярными массами: M18 —  $\text{H}_2\text{O}$ , M2 —  $\text{H}_2$ , M19 —  $\text{HDO}$ , M3 —  $\text{HD}$  и M32 —  $\text{O}_2$ . Из масс-спектрограммы остаточных газов (см. рис. 9) следует, что в течение всего периода индукционного прогрева (с 10:30 по 15:00) график парциального давления остаточного кислорода проходит значительно ниже, чем аналогичные графики не только для лёгкой ( $\text{H}_2\text{O}$ ), но и для полужёлой воды ( $\text{HDO}$ ), уступая им в среднем на ~1 и ~2 порядка соответственно.

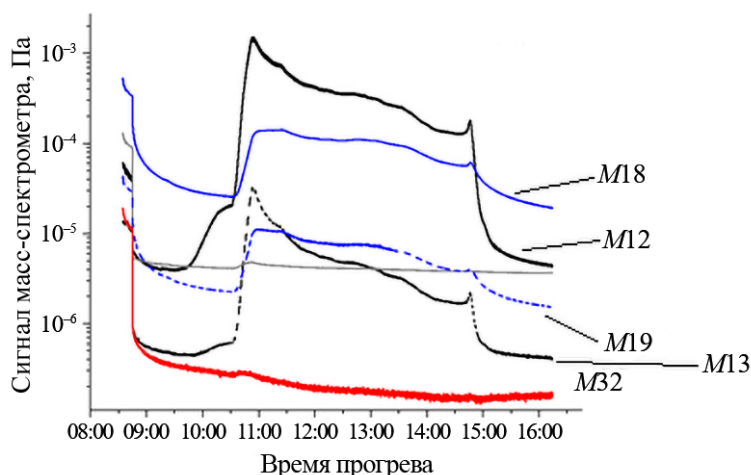


Рис. 9. Состав остаточного газа в камере токамака во время индукционного прогрева

Отметим, что ожидаемое образование оксида лития может протекать по двум основным сценариям:  
— при взаимодействии лития с водой



и полутяжёлой водой



с последующим термическим разложением лёгкого и тяжёлого гидроксидов лития



— при непосредственном взаимодействии с остаточным кислородом в результате химических реакций (4)—(8)



Исходя из рис. 9, можно предположить преимущественное образование оксида лития по сценарию (3); вероятность реализации одностадийного сценария (4)—(6) по прямой реакции (9) представляется гораздо более низкой.

Рассчитаем количество воды ( $\text{H}_2\text{O} + \text{HDO}$ ), которое потребуется для образования  $\text{Li}_2\text{O}$  по реакциям (3)—(8), исходя из заведомого избытка лития по отношению к остаточным парам воды в камере по формуле

$$m(\text{Li}_2\text{O})_{\text{внешн. насл}} = m_{\text{внешн. насл}} \omega(\text{Li}_2\text{O})_{\text{внешн. насл}} = 4,19 \text{ г}, \quad (10)$$

где  $m(\text{Li}_2\text{O})_{\text{внешн. насл}}$  — масса  $\text{Li}_2\text{O}$  во внешней стороне наслоений;  $m_{\text{внешн. насл}} = 5,14 \text{ г}$  — масса внешних наслоений;  $\omega(\text{Li}_2\text{O})_{\text{внешн. насл}} = 81,5\% = 0,815$  — массовая доля  $\text{Li}_2\text{O}$  во внешних наслоениях (см. табл. 2).

Количество вещества  $\text{Li}_2\text{O}$  во внешних наслоениях

$$n(\text{Li}_2\text{O})_{\text{внешн. насл}} = m(\text{Li}_2\text{O})_{\text{внешн. насл}} / M(\text{Li}_2\text{O}) = 0,14 \text{ моль}, \quad (11)$$

где  $M(\text{Li}_2\text{O}) = 29,88 \text{ г/моль}$  — молярная масса оксида лития.

Из уравнений реакций (3)—(8) следует, что  $n(\text{H}_2\text{O} + \text{HDO}) = 2n(\text{Li}_2\text{O})_{\text{внешн. насл}} = 0,28 \text{ моль}$  — суммарное количество вещества лёгкой и полутяжёлой воды ( $\text{H}_2\text{O} + \text{HDO}$ ), необходимое для образования 0,14 моль  $\text{Li}_2\text{O}$  во внешних наслоениях.

Принимая во внимание, что значение парциального давления остаточных паров лёгкой воды ( $\text{H}_2\text{O}$ ) в камере токамака превышает на  $\sim 1$  порядок соответствующее значение для паров полутяжёлой воды ( $\text{HDO}$ ) в течение всего периода прогрева (см. рис. 9), рассчитаем средневзвешенное значение молярной массы паров воды по формуле

$$M(\text{H}_2\text{O} + \text{HDO}) = \frac{p(\text{H}_2\text{O})}{p(\text{H}_2\text{O}) + p(\text{HDO})} M(\text{H}_2\text{O}) + \frac{p(\text{HDO})}{p(\text{H}_2\text{O}) + p(\text{HDO})} M(\text{HDO}) = 18,11 \text{ г / моль}, \quad (12)$$

где  $M(\text{H}_2\text{O}) = 18,02$  г/моль — молярная масса лёгкой воды;  $M(\text{HDO}) = 19,02$  г/моль — молярная масса полутяжёлой воды;  $\frac{p(\text{H}_2\text{O})}{p(\text{H}_2\text{O}) + p(\text{HDO})} \approx \frac{10}{11}$  и  $\frac{p(\text{HDO})}{p(\text{H}_2\text{O}) + p(\text{HDO})} \approx \frac{1}{11}$  — относительные вклады парциальных давлений лёгкой и полутяжёлой воды в общее остаточное давление водяного пара, так как  $\frac{p(\text{H}_2\text{O})}{p(\text{HDO})} \approx 10:1$ .

Таким образом, общая масса воды (обоих изотопных составов в соотношении 10 к 1), необходимая для образования определённой нами массы 4,19 г  $\text{Li}_2\text{O}$  во внешней стороне наслоений, составляет  $m(\text{H}_2\text{O} + \text{HDO}) = n(\text{H}_2\text{O} + \text{HDO})M(\text{H}_2\text{O} + \text{HDO}) = 0,28 \text{ моль} \times 18,11 \text{ г/моль} = 5,07 \text{ г}$ , что соответствует 5,07 мл (при н.у.).

В работе [8] показано, что в камере содержится не менее 1,5 г водяных паров, т.е. каждый раз при разгерметизации вакуумной камеры в неё попадает 1,5 г воды. Считаем, что она полностью реагирует с литием на лимитере. Таким образом, за пять циклов вскрытия камеры с литием могло прореагировать 7,5 г воды, а значит, возможность образования 4,19 г  $\text{Li}_2\text{O}$  в камере (во внешней стороне наслоений, снятых с вертикального лимитера-эмиттера) можно считать установленной.

Образование  $\text{Li}_2\text{O}$  может происходить как в нескрытой камере (при индукционном прогреве стенок и тлеющем разряде), так и при её вскрытии/выносе лимитера на атмосферу.

Однако поскольку  $\text{Li}_2\text{O}$  в наслоениях имеет чёрный цвет, с высокой вероятностью обусловленный образованием дефектов в его кристаллической решётке при сорбции им различных изотопов газообразного водорода под воздействием водородсодержащей плазмы, то наиболее вероятным является образование оксида лития именно в камере до её вскрытия. Такая сорбция сопровождается диссоциацией молекул водорода, образованием групп  $-\text{O}-\text{H}/-\text{O}-\text{D}$  и возникновением различных дефектов в кристаллической решётке  $\text{Li}_2\text{O}$  при его взаимодействии с изотопами водорода под воздействием облучения частицами с высокими энергиями [9].

## 7. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе работы показано, что вертикальный литиевый лимитер с внешней подачей лития способен работать без дозаправки на протяжении не менее 500 разрядов. Дозаправка без разгерметизации камеры позволила восстановить количество лития в лимитере до первоначального значения. Основной расход лития (4,2 г или 9,3 мг/см<sup>2</sup>) происходит в процессе подготовки камеры к рабочим режимам при индукционном прогреве стенок и тлеющем разряде за счёт химического взаимодействия.

Главным фактором, определяющим расход лития в лимитере, является взаимодействие лития с водяными парами при индукционном прогреве стенок и тлеющем разряде. Для минимизации протекания нежелательных химических реакций лития подготовку камеры к рабочим разрядам следует проводить без дополнительного нагрева лимитера.

Авторы выражают благодарность сотрудникам АО «НИКИЭТ» А.В. Верткову и М.Ю. Жаркову за ценные замечания и сотрудничество в работе.

Работа выполнена в рамках контракта с Госкорпорацией «Росатом» № Н.4к.241.09.24.1040 от 16 апреля 2024 г.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мирнов С.В., Евтихин В.А.** Применения Ga и Li как материала лимитеров в токамаках Т-3М и Т-11М. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2005, вып. 2, с. 3—18.
2. **Вертков А.В., Люблинский И.Е., Жарков М.Ю.** Внутрикамерные устройства на основе капиллярно-пористых систем с жидким металлом для стационарного токамака. — Физика плазмы, 2018, т. 44, № 7, с. 572—578.
3. **Люблинский И.Е. и др.** Стационарно работающие литиевые внутрикамерные элементы токамака. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 1, с. 55—63.
4. **Васина Я.А.** Оптимизация литиевой эмиттер-коллекторной системы токамака. Дис. канд. физ.-мат. наук 01.04.08. — М.: НИЯУ МИФИ, 2022. 103 с.; <https://ds.mephi.ru/dissertations/118/public>.
5. **Allain J.P. et al.** Model development and analysis of temperature-dependent lithium sputtering and sputtered Li<sup>+</sup> transport for tokamak plasma-facing applications. — J. of Nuclear Materials, 2005, vol. 337—339, p. 94—98.
6. **Allain J.P. et al.** Kinematic and thermodynamic effects on liquid lithium sputtering. — Nucl. Fus., 2002, vol. 42, p. 202.
7. **Wei Ou et al.** A physical model of an ejection suppressed CPS liquid lithium divertor target. — Nucl. Fus., 2015, vol. 55(4), 043015.
8. **Морозов В.А., Щербак А.Н., Мирнов С.В.** Альтернативная возможность в технологии начальной подготовки разрядной камеры токамака к плазменному эксперименту на примере ТСП и Т-11М. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020, т. 43, вып. 3, с. 5—10.
9. **Kong X., Yu Yo., Ma Sh., Gao T., Xiao Ch., Chen X.** Dissociation mechanism of H<sub>2</sub> molecule on the Li<sub>2</sub>O/hydrogenated-Li<sub>2</sub>O (111) surface from first principles calculations. — Royal Soc. of Chem., 2017, vol. 7, iss. 56, p. 5239—5250; doi: 10.1039/c7ra05894b.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840 Москва, Троицк, ул. Пушкиновых, вл. 12, Россия



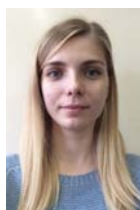
Яна Андреевна Васина, научный сотрудник, к.ф.-м.н.  
vasina@triniti.ru



Владимир Борисович Лазарев, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.  
v\_lazarev@triniti.ru



Сергей Васильевич Мирнов, научный руководитель отделения, д.ф.-м.н., профессор; ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат Государственной премии СССР и премии им. Л.А. Арцимовича РАН, член Международного комитета по координации физических исследований в поддержку проекта ИТЭР, эксперт МАГАТЭ по токамакам  
sergeimironov@yandex.ru



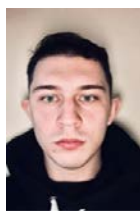
Анастасия Николаевна Щербак, ведущий инженер  
shcherbak@triniti.ru



Надежда Толятовна Джигайло, старший научный сотрудник, к.т.н.  
lvt@triniti.ru



Алексей Валерьевич Зорин, инженер  
1 категории  
zorinav@triniti.ru



Александр Сергеевич Пришвицын,  
инженер 2 категории  
prishvitsin@triniti.ru

Статья поступила в редакцию 15 октября 2024 г.

После доработки 26 декабря 2024 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 78—87.



УДК 533.924, 533.9...16, 539.231

## ДИАГНОСТИКА ДОЛГОВРЕМЕННОЙ ЭРОЗИИ И ОСАЖДЕНИЯ МАТЕРИАЛА ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТОКАМАКА КТМ: АПРОБАЦИЯ И ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

С.А. Крат<sup>1</sup>, Б.Ж. Чектыбаев<sup>2</sup>, Э.Г. Батырбеков<sup>3</sup>, И.А. Сорокин<sup>4, 1</sup>, В.А. Лузанов<sup>4</sup>, Т. Соларевич<sup>1</sup>,  
С.С. Довганюк<sup>1</sup>, Ю.М. Гаспарян<sup>1</sup>, И.Л. Тажибайева<sup>2, 5</sup>, Е.А. Кашикбаев<sup>2</sup>, Д.А. Ольховик<sup>2</sup>, В.В. Бакланов<sup>2</sup>,  
Е.Т. Коянбаев<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

<sup>2</sup>Филиал ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан, Курчатов, Республика Казахстан

<sup>3</sup>Национальный ядерный центр Республики Казахстан, Курчатов, Республика Казахстан

<sup>4</sup>Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязино, Московская обл., Россия

<sup>5</sup>Научно-технический центр безопасности ядерных технологий, Алматы, Республика Казахстан

Разработана и апробирована диагностика транспорта (эрозии и осаждения) материала в камере токамака КТМ на временах, сравнимых с временем экспериментальной кампании, основанная на образцах-свидетелях, крепящихся в тайлах первой стенки вакуумной камеры токамака. Установлено, что области наибольшей эрозии стенки находятся вблизи экваториальной плоскости и на верхнем куполе с внутренней стороны. Зоны осаждения выявлены на внешнем обходе с нижней стороны камеры. Рассмотрены возможные влияния кондиционирующего и рабочего разрядов на распыление стенки.

**Ключевые слова:** токамак, взаимодействие плазмы с поверхностью, эрозия, осаждение, диагностики.

## KTM TOKAMAK FIRST-WALL MATERIAL LONG-TERM EROSION AND DEPOSITION DIAGNOSTICS: APPROBATION AND FIRST RESULTS

S.A. Krat<sup>1</sup>, B.Zh. Chektybayev<sup>2</sup>, E.G. Bатыrbekov<sup>3</sup>, I.A. Sorokin<sup>4, 1</sup>, V.A. Luzanov<sup>4</sup>, T. Solarevich<sup>1</sup>,  
S.S. Dovganyuk<sup>1</sup>, Yu.M. Gasparyan<sup>1</sup>, I.L. Tazhibayeva<sup>2, 5</sup>, E.A. Kashikbayev<sup>2</sup>, D.A. Olkhovik<sup>2</sup>,  
Ye.T. Koyanbayev<sup>2</sup>, V.V. Baklanov<sup>2</sup>

<sup>1</sup> National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

<sup>2</sup> Branch of the Institute of Atomic Energy of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

<sup>3</sup> National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Republic of Kazakhstan

<sup>4</sup> Fryazino Branch of the V.A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the Russian Academy of Sciences, Fryazino, Moscow Region, Russia

<sup>5</sup> Nuclear technology safety center (NTSC), Almaty, Republic of Kazakhstan

Diagnostics of material transport (erosion and deposition) in the vacuum vessel of the KTM tokamak over time scales comparable to the time of the experimental campaign, based on witness samples mounted in the tiles of the first wall of the tokamak vacuum chamber, has been developed and tested. It was found that the areas of greatest erosion of the wall are located near the equatorial plane and on the upper dome from the high field side. Deposition zones were identified on the lower field side at the lower part of the vessel. The possible effects of conditioning and operating discharges on wall erosion are considered.

**Key words:** tokamak, plasma-surface interaction, erosion, deposition, diagnostics.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Эрозия и осаждение материалов поверхностей обращённых к плазме элементов являются ключевыми процессами взаимодействия плазмы с поверхностью, определяющими функционирование и безопасность термоядерных установок [1, 2]. Эрозия определяет долговечность элементов стенки, а осаждение продуктов эрозии приводит к образованию насыщенных водородом переосаждённых слоёв. Эти слои могут представлять опасность с точки зрения накопления трития и могут приводить к образованию

пыли в установке в результате их отшелушивания с поверхности [3]. Так, в токамаке JET с ИТЭР-подобной Ве—W-стенкой на долю соосаждённых слоёв приходится 50% всего накопленного в токамаке топлива [4].

Как эрозия, так и осаждение — длительные процессы, накопительный эффект которых становится заметен на временах, сравнимых с временами одной или даже нескольких экспериментальных кампаний, т.е. начиная от десятков и сотен секунд эффективного времени горения плазменного разряда. В силу этого для изучения данных процессов целесообразно применять особые методы диагностики, не обладающие высоким временным разрешением, но позволяющие определить накопительный эффект и детально изучить транспорт материала в токамаке [5, 6].

Токамак КТМ (Казахский токамак материаловедческий) — один из крупнейших сферических ( $R/a \leq 2$ ) токамаков в мире, нацеленный на решение актуальных задач управляемого термоядерного синтеза (УТС), научная повестка которого включает в себя исследования взаимодействия плазмы с поверхностью [7]. На текущем этапе токамак выходит на проектные режимы [8—10]. В связи с этим важным и актуальным является изучение эрозии и осаждения, транспорта материала облицовки в токамаке.

В данной работе представлены конструкция и принцип работы недорогой и технологически просто масштабируемой диагностики, позволяющей определять распределение эрозии и осаждения за экспериментальную кампанию в токамаке КТМ. Методика верифицирована на двух кампаниях — осенней 2023 г. и весенней 2024 г.

## 2. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

**Конструкция диагностической системы.** Облицовочные тайлы первой стенки токамака КТМ представляют собой графитовые элементы, закрепляемые на несущей конструкции вакуумной камеры при помощи винтов, фиксация которых производится через технологическое отверстие диаметром 7 мм на обращённой к плазме поверхности тайла. Каждый тайл имеет одно такое технологическое отверстие вблизи геометрического центра тайла [11].

Для определения эрозии и осаждения были разработаны образцы-свидетели, представляющие собой молибденовые винты специальной конструкции с покрытием на торцевой поверхности головки винта, которые устанавливались заподлицо с поверхностью тайла в описанное технологическое отверстие. Эскизное изображение диагностического винта, установленного в тайле, представлено на рис. 1.

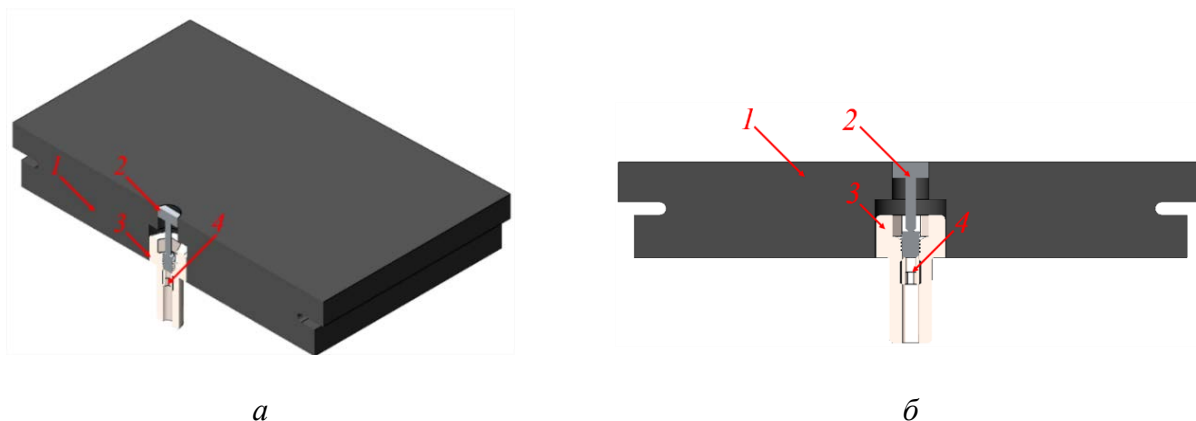


Рис. 1. Диагностический винт, установленный в тайл для проведения измерений эрозии и осаждения: *а* — изометрическое изображение; *б* — поперечный разрез; 1 — тайл стенки токамака КТМ; 2 — диагностический винт; 3 — крепежный винт, при помощи которого тайл крепится к стенке разрядной камеры; 4 — установочный контрвинт, при помощи которого достигается установка диагностического винта строго заподлицо с поверхностью тайла

В качестве материала диагностического винта был использован молибден марки МЧ. Головка винта представляет собой усечённый цилиндр со срезанными плоскопараллельными гранями (см. рис. 1, *а*). Таким образом, при установке винта в техническое отверстие крепления тайла в поверхности тайла оста-

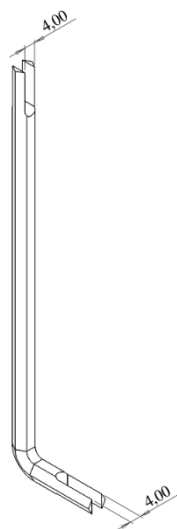


Рис. 2. Специальный инструмент для установки диагностических образцов

ётся отверстие минимально возможного размера. Уменьшение размера технического отверстия предотвращает возможное искажение в картине транспорта материала вблизи образцов. Такое искажение может возникнуть при взаимодействии частиц, ударяющихся о стенку, с боковыми поверхностями технического отверстия и отражении от них. Фиксация винта в резьбе осуществляется при помощи специального инструмента, изготовленного на основе шестигранного ключа путём проточки в нём прорези шириной 4 мм. При этом круглая форма границы прорези обеспечивает фактически полное отсутствие контакта инструмента с диагностической поверхностью винта в процессе установки и снятия после кампании. Эскизное изображение специального инструмента представлено на рис. 2.



Рис. 3. Фотография диагностического винта в графитовом тайле КТМ

На рис. 3 показана фотография винта, установленного в тайл внутри вакуумной камеры КТМ.

Для предотвращения образования областей с плохой откачкой в крепёжном винте и в установочном контрвинте просверлены сквозные отверстия.

Диагностические винты размещались в 7-м секторе вакуумной камеры КТМ, как показано на рис. 4. Сектор был выбран как один из наиболее удалённых от сечения расположения электрода тлеющего разряда (ЭТР).

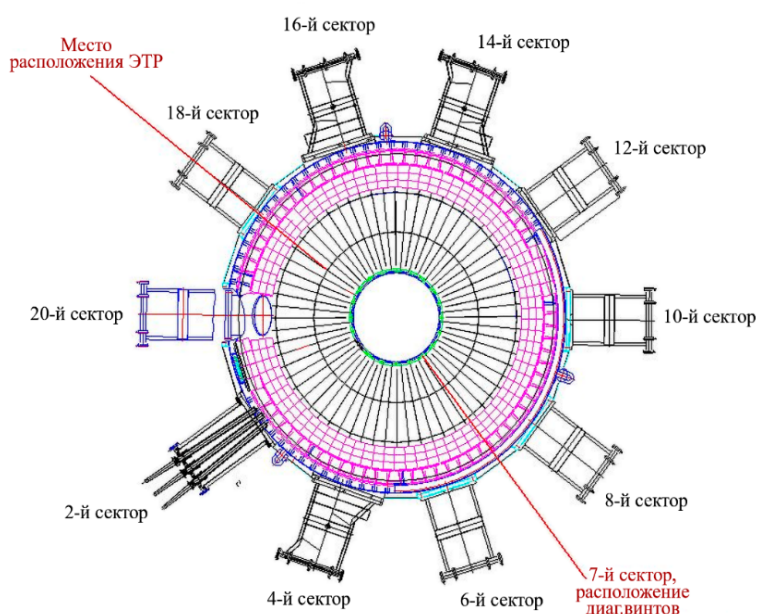


Рис. 4. Расположение сечения диагностических винтов в токамаке КТМ: — — расположение ЭТР и сечения расположения диагностических винтов

гического отверстия без необходимости демонтажа тайлов стенки. Разница между начальным и конечным количеством (поверхностной плотностью, толщиной) углеродного покрытия принималась равной эффективной эрозии/осаждению за кампанию.

После изготовления поверхность головки диагностического винта механически полировалась абразивами на бумажной основе с размерами зёрен от 40 до 2—3 мкм, что обеспечивало конечную шероховатость поверхности головки  $R_a \leq 9$  нм. После полировки винт очищался в ультразвуковой ванне последовательно в бензине, ацетоне и спирте. После такой подготовки на винт наносилось углеродное покрытие.

**Нанесение и анализ диагностического углеродного покрытия.** Толщина углеродного покрытия на каждом диагностическом винте измерялась до его установки в токамак и соответственно после его изъятия из токамака. Диагностические винты извлекались из токамака после экспериментальной кампании путём их выкручивания из техно-

Углеродная плёнка толщиной 300 нм наносилась на установке Leybold-Heraeus A550VZK с помощью магнетронного распыления графитовой мишени диаметром 7 дюймов в высокочастотном (ВЧ) режиме (13,56 МГц), мощность разряда составляла 300 Вт. Толщина и плотность плёнки контролировались постфактум комбинацией эллипсометрии и атомно-силовой микроскопии поверхности по высоте «ступеньки», формируемой методами обратной фотолитографии. На часть поверхности референтных образцов — монокристаллических плоских пластин кремния с ориентацией [100] наносился полимерный фоточувствительный материал. Далее на весь образец наносилась плёнка ZnO. Затем фоторезист растворялся с поверхности. Поверх образца, частично покрытого ZnO, наносилась углеродная плёнка в условиях полностью идентичных процессу осаждения диагностических покрытий на винты. Весь образец погружался в раствор слабой кислоты, что приводило к взрыву ZnO и формированию чёткого края границы углеродной плёнки. Это позволяло определить её толщину контактным методом с высокой точностью. Все диагностические винты покрывались углеродом за одну установку в соответствии с предварительно отработанным технологическим процессом, что обеспечивало однородность свойств покрытия. Для равномерного покрытия углеродом большой площади (диаметром не менее 4 см) были подобраны режимы установки с более высоким рабочим давлением аргона (до  $2 \cdot 10^{-2}$  Торр) и расстоянием до подложки (от 70 мм). Одновременно проводилось напыление на 10 винтов.

Неразрушающий контроль толщины углеродной плёнки до и после установки диагностических винтов в КТМ осуществлялся методами EPMA (Electron Probe Microanalysis), основанными на энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС) характеристического рентгеновского излучения (ХРИ) элементов, входящих в состав приповерхностных слоёв исследуемых образцов, и сравнении экспериментальных спектров с результатами численного моделирования. Измерения спектров, полученных с помощью ЭДС, проводились сканирующим электронным микроскопом (СЭМ) Tescan Vega, оснащённым ЭДС, приставкой INCA x-act Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (Oxford Instruments). Модельные спектры ХР поверхности образцов получены с помощью программы Casino [12], основанной на методе Монте-Карло, моделирование спектров ХРИ осуществлялось в близких к реальной геометрии СЭМ условиях (расположение диагностического окна модуля ЭДС, расстояние и наклон электронного зонда и т.д.). Для снижения значения абсолютной погрешности измерения толщины методами EPMA (до 10% [13, 14]) измерения экспериментальных спектров ЭДС проводились с помощью предустановленных доступных энергий электронного пучка 5, 9, 15 и 25 кэВ. Обзор существующих методов оценки толщины углеродных покрытий подробно представлен в [15].

В рассматриваемом случае использовались два метода на базе EPMA: с использованием и без использования референтного образца. На рис. 5 и 6 представлены принципиальные схемы и применяемые алгоритмы обработки полученных экспериментальных и модельных спектров ЭДС в рамках данных методов, а также калибровочные кривые зависимости коэффициента  $k$ , характеризующего относительную интенсивность учитываемых линий ХРИ материалов подложки и исследуемой плёнки.

В первом случае (см. рис. 5) строились модельные калибровочные кривые отношения интенсивности ХРИ Mo (LIII) (LIII — серия и номер линии ХРИ) поверхности исследуемого винта к поверхности без углеродного покрытия ( $k\text{-ratio} = I(\text{Mo})/I_{\text{ref}}(\text{Mo})$ ) в зависимости от толщины углеродного покрытия ( $h_c$ [нм]) для трёх используемых при анализе поверхности энергий электронного пучка в СЭМ (5, 9 и 15 кэВ). Во втором случае (см. рис. 6) использовались калибровочные кривые зависимости отношения интенсивности ХРИ Mo(LIII) к C(K) углеродного покрытия ( $k\text{-ratio} = I(\text{Mo})/I(\text{C})$ ) известной плотности ( $\sim 2,4$  г/см<sup>3</sup>). Интенсивность излучения ХРИ C(K) для используемого оборудования значительно превышала уровень шума и сплошного рентгеновского излучения во время измерения спектров ЭДС поверхности, поэтому метод также применим для относительного измерения толщины, в данном случае несмотря на заметное поглощение ХРИ в низкоэнергетичной области рентгеновского излучения. По измеренным спектрам ХРИ поверхности и построенным модельным калибровочным кривым  $f = k\text{-ratio}(h_c)$  косвенно определены толщины углеродного покрытия обоими методами для трёх энергий диагностического электронного пучка СЭМ.

Численный расчёт модельных ЭДС-спектров для всех образцов проводился в близких к экспериментальным условиям (расположение головки винта в вакуумном объёме СЭМ, угла падающего электронного пучка и диагностического окна ЭДС модуля относительно исследуемой поверхности).

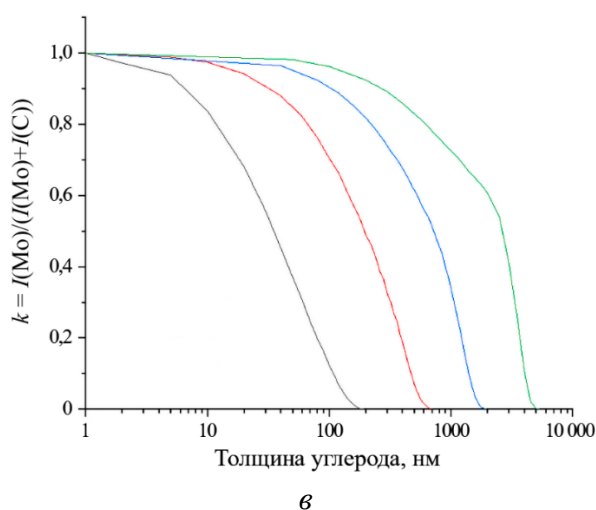
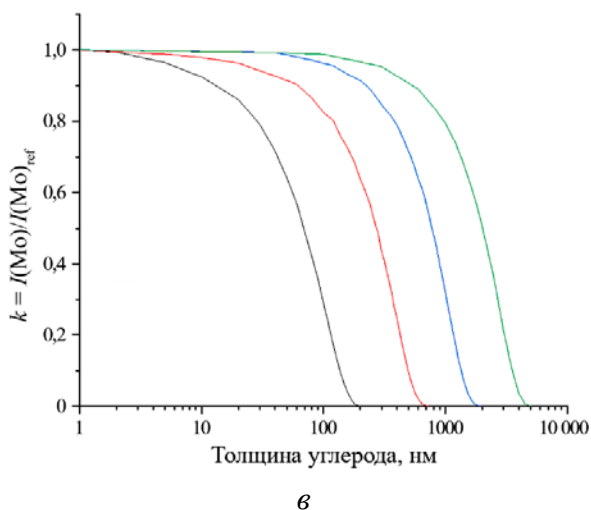
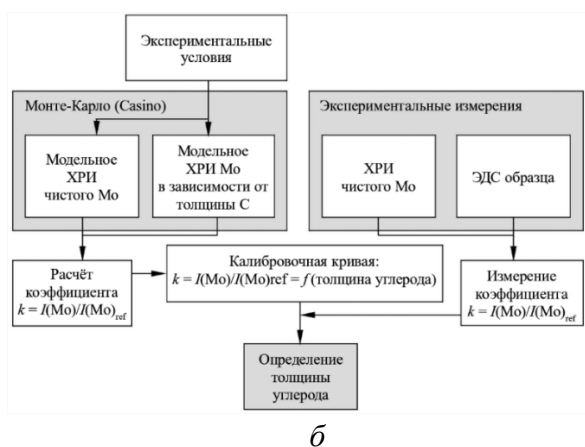
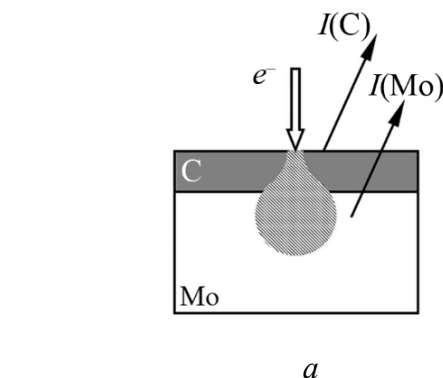
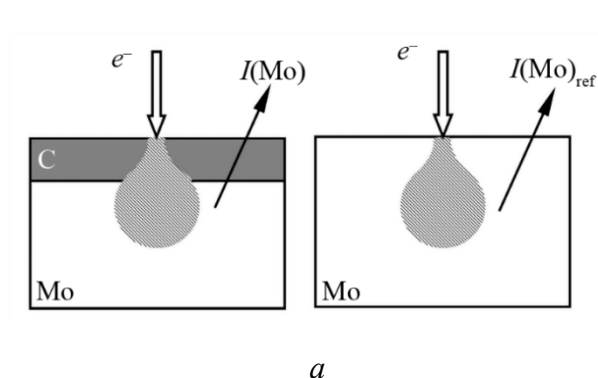


Рис. 5. Принципиальная схема (а) и алгоритм (б) ЭДС-методики определения толщины углерода на молибдене с использованием референсного сигнала характеристического излучения материала подложки, а также зависимость коэффициента  $k$  от толщины углерода при разных энергиях электронного пучка сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega (в): 5 (—), 9 (—), 15 (—), 25 кэВ (—)

Рис. 6. Принципиальная схема (а) и алгоритм (б) ЭДС-методики определения толщины углерода на молибдене без использования референсного сигнала характеристического излучения материала подложки, а также зависимость коэффициента  $k$  от толщины углерода при разных энергиях электронного пучка сканирующего электронного микроскопа Tescan Vega (в): 5 (—), 9 (—), 15 (—), 25 кэВ (—)

Для проведения первых экспериментов на КТМ толщина покрытия 300 нм была выбрана таким образом, чтобы как в случае распыления поверхности плёнки, так и для осаждения углерода на образцы можно было проводить измерения ЭДС поверхности с детектированием необходимых линий ХРИ молибдена и углерода как минимум для трёх энергий электронного пучка.

Одновременно с измерением толщины исследовано изменение морфологии поверхности образцов. На некоторых образцах наблюдаются образование поверхностных пробоев и отшелушивание плёнки, нанесённой ранее или осаждённой в процессе эксплуатации КТМ. Также с помощью ЭДС обнаружено отсутствие примесных элементов в приповерхностных слоях головок винтов (до 0,8 мкм для 25 кэВ) в пределах чувствительности используемого оборудования.

**Описание экспериментальных кампаний.** Диагностические винты были установлены в токамаке КТМ в период с декабря 2023 г. по апрель 2024 г. За это время проводились две экспериментальные кампании: в декабре 2023 г. — с 5242-го по 5435-й импульс и в марте—апреле 2024 г. — с 5440-го по 5690-й импульс.

Перед проведением каждой кампании проводилась подготовка разрядной кампании к эксперименту, включавшая в себя нагрев камеры до 180 °С и проведение чистящего тлеющего разряда с полым катодом (катод — разрядная камера токамака). Для кампании декабря 2023 г. суммарная длительность чистящего разряда составила 211 ч 25 мин, из них 11 ч 45 мин — на Ag, 111 ч 20 мин — на H, 88 ч 20 мин — на He. Для кампании марта 2024 г. суммарная длительность чистящего разряда составила 282 ч 10 мин, из них 3 ч — на Ag, 101 ч 20 мин — на H, 177 ч 50 мин — на He. Необходимо отметить, что в настоящее время не представляется возможным различить воздействие подготовительного тлеющего разряда и исследовательских плазменных разрядов токамака за период экспериментальных кампаний на образцы.

Зависимость конфигурации магнитных поверхностей в типичном удачном разряде во время экспериментальной кампании представлена на рис. 7 и 8. Удачным разрядом для целей данной работы считается разряд с образованием плазменного шнура с током ~500 кА и образованием стабильной полки. Суммарное время удачных разрядов составило в кампании декабря 2023 г. ~13 с, в кампании марта 2024 г. — 12,3 с. Успешными считались те разряды, в которых полностью выполнялся заложенный сценарий разряда. Типичные параметры такого разряда — ток плазмы на плато ~500 кА, время разряда не менее 40 мс.

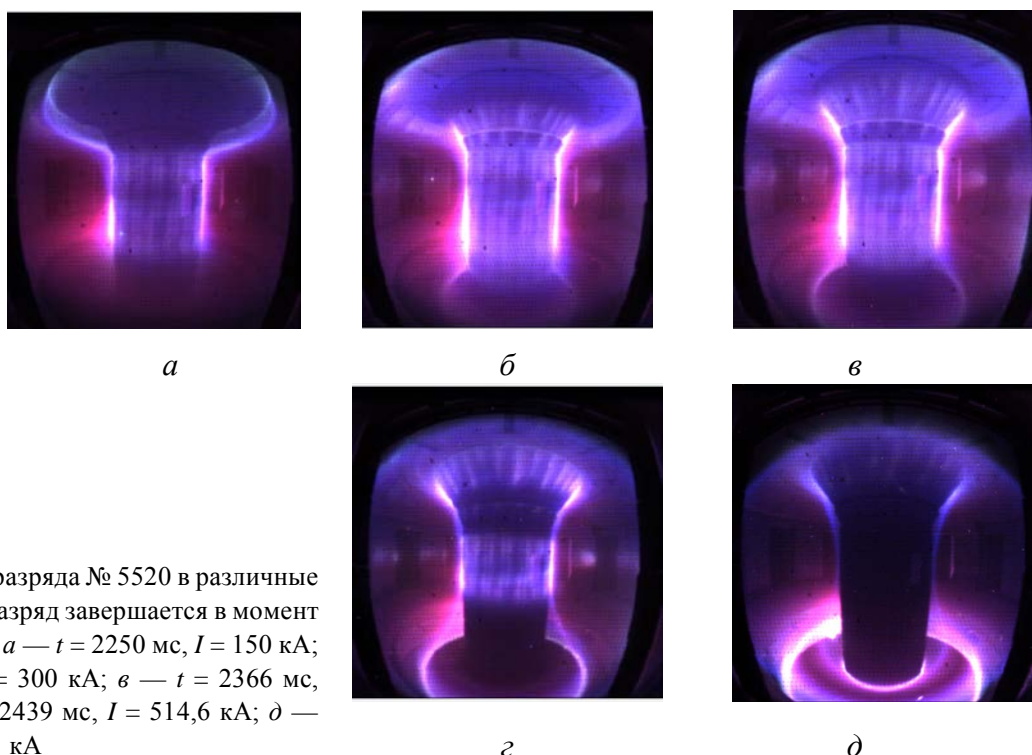


Рис. 7. Фотографии разряда № 5520 в различные моменты времени. Разряд завершается в момент времени 2976,29 мс: *а* —  $t = 2250$  мс,  $I = 150$  кА; *б* —  $t = 2324$  мс,  $I = 300$  кА; *в* —  $t = 2366$  мс,  $I = 400$  кА; *г* —  $t = 2439$  мс,  $I = 514,6$  кА; *д* —  $t = 2539$  мс,  $I = 513,1$  кА

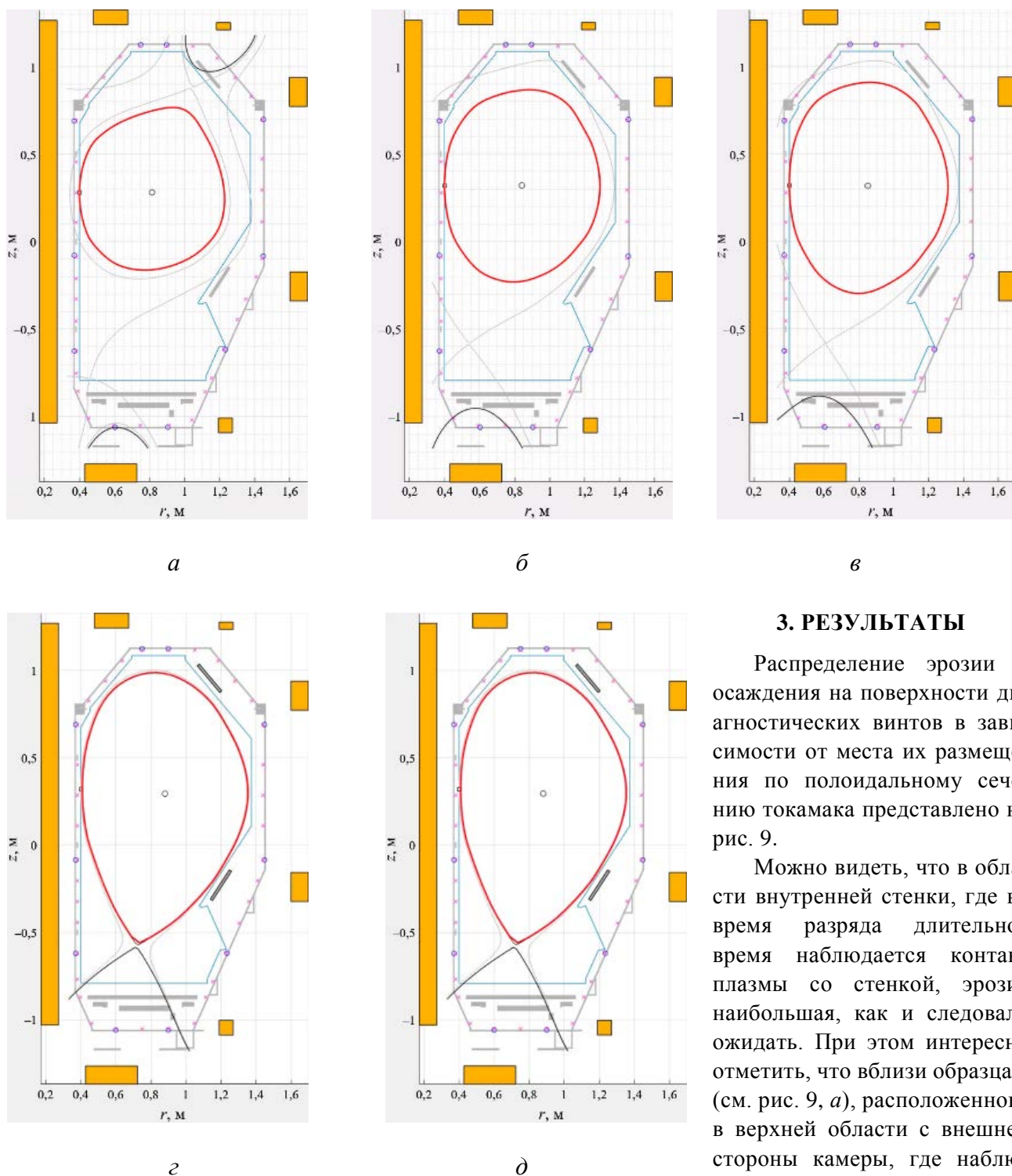


Рис. 8. Конфигурации магнитных поверхностей в разряде № 5520. Конфигурация в целом характерна для подавляющего большинства исследовательских разрядов. Разряд завершается в момент времени 2976,29 мс: *а* —  $t = 2250$  мс,  $I = 150$  кА; *б* —  $t = 2324$  мс,  $I = 300$  кА; *в* —  $t = 2366$  мс,  $I = 400$  кА; *г* —  $t = 2439$  мс,  $I = 514,6$  кА; *д* —  $t = 2539$  мс,  $I = 513,1$  кА

внутренней стенки, где во время разряда длительное время наблюдается контакт плазмы со стенкой, эрозия наибольшая, как и следовало ожидать. При этом интересно отметить, что вблизи образца 9 (см. рис. 9, *а*), расположенного в верхней области с внешней стороны камеры, где наблюдался контакт плазмы со стенкой во время перехода плазмы в диверторную конфигурацию, взаимодействие плазмы с поверхностью было незначительным либо наблюдался баланс эрозии и осадения такой, что количество углерода на поверхности образца не изменилось за две экспериментальные кампании.

В настоящее время нельзя исключить, что влияние кондиционирующего разряда на полученные разряды преобладает над влиянием рабочего разряда. В будущем первоочередной является задача

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

Распределение эрозии и осадения на поверхности диагностических винтов в зависимости от места их размещения по полоидальному сечению токамака представлено на рис. 9.

Можно видеть, что в области внутренней стенки, где во время разряда длительное время наблюдается контакт плазмы со стенкой, эрозия наибольшая, как и следовало ожидать. При этом интересно отметить, что вблизи образца 9 (см. рис. 9, *а*), расположенного в верхней области с внешней стороны камеры, где наблюдался контакт плазмы со стенкой во время перехода плазмы в диверторную конфигурацию, взаимодействие плазмы с поверхностью было незначительным либо наблюдался баланс эрозии и осадения такой, что количество углерода на поверхности образца не изменилось за две экспериментальные кампании.

разделения воздействия кондиционирующего и рабочего разрядов, что, вероятно, потребует стандартизации процедуры кондиционирования. Важно отметить, что суммарная длительность успешных рабочих разрядов составила всего ~25 с, а кондиционирующих — 483 ч 35 мин, т.е. примерно в 70 000 раз больше времени успешных рабочих разрядов.

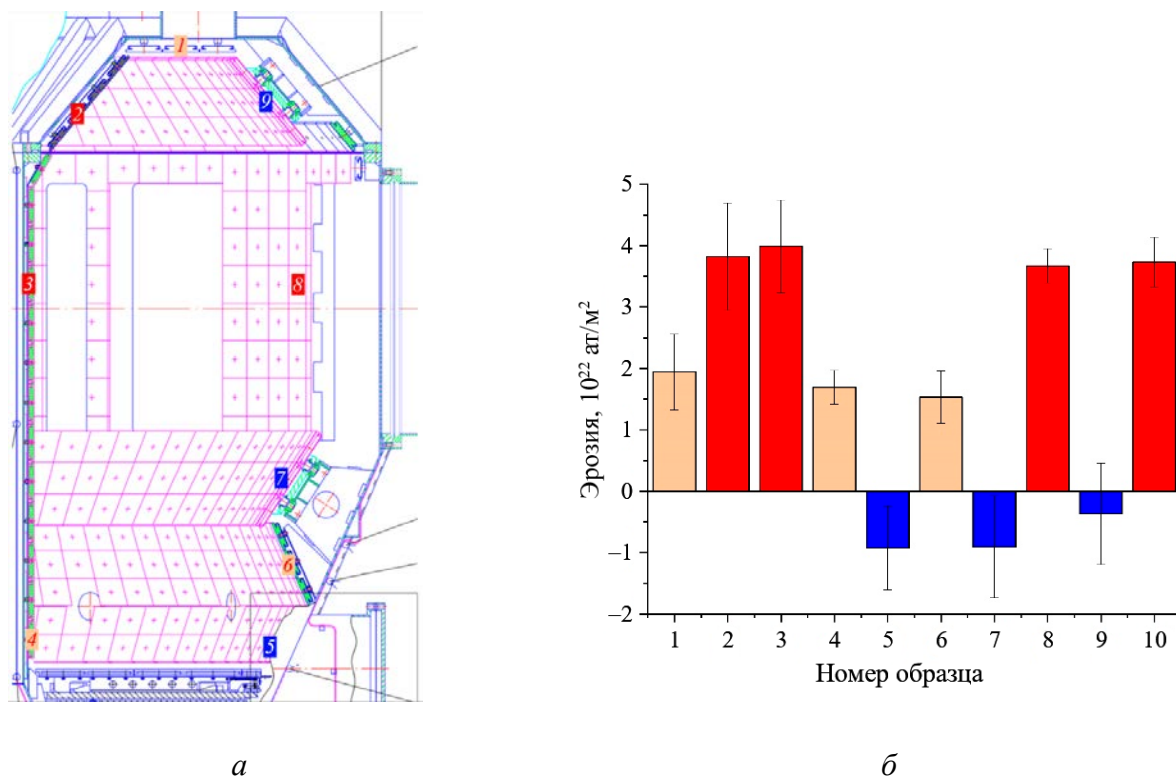


Рис. 9. Распределение эффективных эрозии и осаждения по полоидальному сечению токамака КТМ в период зимней кампании 2023 г. и весенней кампании 2024 г. (разряды с 5242-го по 5690-й): *а* — качественное распределение (2, 3, 8 — диагностические винты, с которых полностью удалено диагностическое углеродное покрытие и возможна только оценка эрозии снизу, 1, 4, 6 — винты, толщина диагностического покрытия на которых уменьшилась (зона эрозии), 5, 7, 9 — винты, толщина покрытия на которых увеличилась (зона осаждения)); *б* — гистограмма эрозии и осаждения по номерам диагностических винтов (см. рис. 7, 8, *а*); положительные величины — эрозия (—), отрицательные — осаждение (—); — на образце не осталось С

Внутренняя стенка токамака КТМ не оснащена лимитерами, и может происходить непосредственное соприкосновение плазмы с её поверхностью (см. рис. 7, 8, *а–в*). Это может приводить к очень высокой скорости эрозии в рабочих разрядах. Исходя из полученных данных мест и характера эрозии, можно предположить, что именно эрозия вследствие рабочего разряда является основным фактором. Об этом свидетельствует отсутствие эрозии на винтах (№ 7, 9) на рис. 9, установленных на витках пассивной стабилизации (ВПС). При этом из анализа экспериментов (видео и восстановление формы) можно видеть, что во всех разрядах практически отсутствует прямое касание плазмы с поверхностью тайлов, расположенных на ВПС, в отличие от винтов № 2, 3, 8 и в меньшей степени № 1, 4, где имело место касание плазмой стенки. В случае, если бы определяющим с точки зрения эрозии был кондиционирующий разряд, можно было бы ожидать её более равномерного распределения.

Наличие областей, в которых эрозия оказалась измеримой (образцы 1, 4 и 6 (см. рис. 9)), показывает, что разработанная диагностика полностью применима для токамака КТМ в уже существующем виде без существенных доработок.

В ЭДС-спектрах образцов после экспериментальной кампании не наблюдалось сигналов каких-либо материалов, кроме углерода, молибдена и кислорода, также присутствовавших на спектрах образцов до их установки в камеру КТМ (рис. 10), что говорит об отсутствии существенного распыления каких-либо внутривакуумных элементов токамака, кроме облицовочных тайлов.

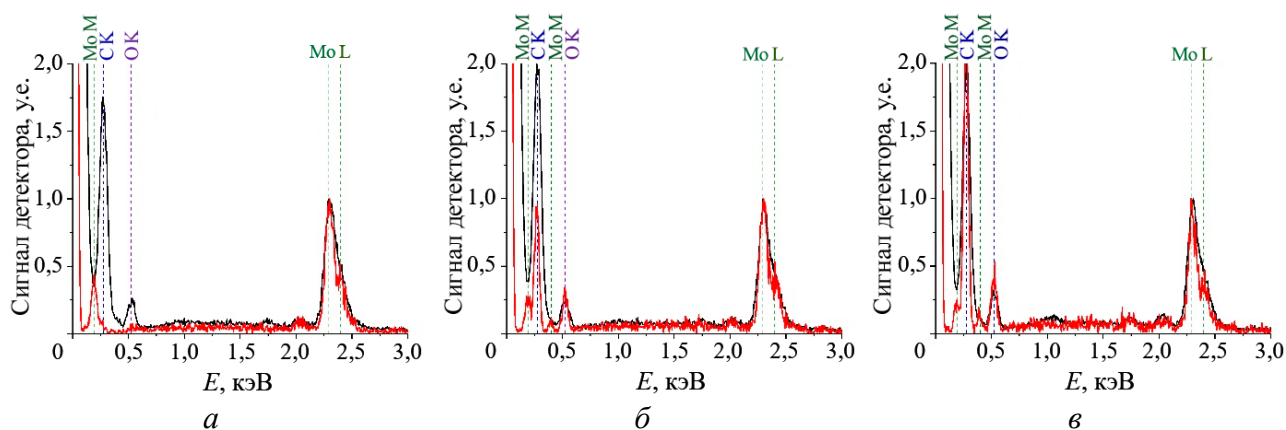


Рис. 10. ЭДС-спектры поверхности диагностических винтов до (—) и после (—) экспериментальных кампаний: *а* — образец № 3 (полная эрозия диагностического слоя); *б* — образец № 4 (неполная эрозия диагностического слоя); *в* — образец № 5 (преимущественное осаждение); энергия диагностического пучка электронов 9 кэВ; вертикальные пунктирные линии — энергия характеристического рентгеновского излучения: --- — молибден, ---- — углерод, ---- — кислород

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментальных кампаниях декабря 2023 г. и марта 2024 г. на токамаке КТМ продемонстрирована работоспособность масштабируемой системы измерения баланса эрозии и осаждения в токамаке на временах, сравнимых с временем экспериментальной кампании. Под масштабируемостью понимается возможность увеличения количества диагностических образцов для улучшения пространственного разрешения эрозии, находящихся вблизи средней плоскости на внутреннем обходе камеры, где происходит диагностика вплоть до их установки в каждый из тайлов стенки КТМ по 39 винтов в каждом полоидальном сечении для получения полной трёхмерной картины транспорта материала в установке.

Определены зоны максимального формирования плазмы в типичном разряде и её касание в лимитерной стадии разряда.

По полученным результатам для дальнейшего применения и масштабирования в методику внесены дополнения: принято решение об увеличении толщины начального углеродного покрытия на диагностических образцах до ~500 нм (максимальная начальная толщина, измеряемая методом ЕРМА), уменьшении времени экспозиции в плазме до одной экспериментальной кампании, проведении экспериментов по разделению влияния чистящего и основного разрядов на эрозию поверхности. Повторная установка диагностики в токамак с улучшенным пространственным разрешением (установки образцов в каждом тайле полоидального сечения) запланирована на конец 2024 г. — начало 2025 г.

Работа в части подготовки диагностических винтов выполнена при поддержке НИР «Исследования в области взаимодействия плазмы с обращёнными к плазме элементами на учебно-демонстрационной установке типа «токамак» в НИЯУ МИФИ с привлечением студентов и аспирантов» (дополнительное соглашение № 075-03-2023-097/4 от 17.04.2023 к соглашению № 075-03-2023-097 от 13.01.2023), выполняемого в рамках федерального проекта № 3 «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2024 года», а в части проведения экспериментов на токамаке КТМ — в рамках программы «Научно-техническое обеспечение экспериментальных исследований на Казахстанском материаловедческом токамаке КТМ» (ИРН BR23891779), финансируемой Министерством энергетики Республики Казахстан.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Roth J. et al.** Tritium inventory in ITER plasma-facing materials and tritium removal procedures. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2008, vol. 50, № 10, p. 103001.

2. **Widdowson A. et al.** Deposition of impurity metals during campaigns with the JET ITER-like Wall. — In: Nucl. Mater. Energy. Culham Centre for Fusion Energy, Culham Science Centre, Abingdon, OX14 3DB, United Kingdom: Elsevier Ltd, 2019, vol. 19, p. 218—224.
3. **Winter J.** Dust in fusion devices — a multi-faceted problem connecting high- and low-temperature plasma physics. — Plasma Phys. Control. Fusion, 2004, vol. 46, № 12B, p. B583—B592.
4. **Widdowson A. et al.** Evaluation of tritium retention in plasma facing components during JET tritium operations. — Phys. Scr., 2021, vol. 96, № 12, p. 124075.
5. **Krat S. et al.** Comparison of erosion and deposition in JET divertor during the first three ITER-like wall campaigns. — Phys. Scr., 2020, vol. T171, p. 014059.
6. **Krat S. et al.** Comparison of JET inner wall erosion in the first three ITER-like wall campaigns. — Nucl. Mater. Energy, 2021, vol. 29, p. 101072.
7. **Азизов Э.А. и др.** Казахстанский материаловедческий токамак КТМ и вопросы управляемого термоядерного синтеза. — Алматы: Glory K, 2006. 284 p.
8. **Chektybayev B. et al.** Overview of the first experiments at KTM tokamak to obtain plasma discharges. — Fusion Eng. Des., 2023, vol. 194, p. 113847.
9. **Chektybayev B. et al.** Improvement of plasma discharge performance at KTM tokamak. — Fusion Eng. Des., 2024, vol. 208, p. 114684.
10. **Batyrbekov E. et al.** Research in the field of controlled thermonuclear fusion synthesis in the Republic of Kazakhstan. — Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion, 2024, vol. 47, p. 15—22.
11. **Жеңіс К. et al.** Экспериментальное исследование газовой выделения графитовых тайлов токамака. — Вестник НЯЦ РК, 2024, т. 99, № 3, с. 129—136.
12. **Demers H. et al.** Three-dimensional electron microscopy simulation with the CASINO Monte Carlo software. — Scanning, 2011, vol. 33, № 3, p. 135—146.
13. **Pryds N. et al.** Thickness determination of large-area films of yttria-stabilized zirconia produced by pulsed laser deposition. — Appl. Surf. Sci., 2006, vol. 252, № 13, p. 4882—4885.
14. **Cockett G.H., Davis C.D.** Coating thickness measurement by electron probe microanalysis. — Br. J. Appl. Phys., 1963, vol. 14, № 11, p. 813—816.
15. **Sorokin I.A., Kolodko D.V.** On the possibility of indirect measurement of the thin carbon films thickness using energy-dispersive analysis. — Thin Solid Films, 2021, vol. 737, p. 138937.
16. **Krat S. et al.** Erosion at the inner wall of JET during the discharge campaign 2013—2014. — Nucl. Mater. Energy., 2017, vol. 11, p. 20—24.



Степан Андреевич Крат, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н., лауреат премии Правительства Москвы молодым учёным 2022 г. в категории Приборостроение, призёр конкурса человек года НИЯУ МИФИ 2023 г. в номинации «Огонь Прометеев»; НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31, Россия  
sakrat@mephi.ru



Бауржан Жамбулович Чектыбаев, начальник отдела, лауреат Государственной премии РК в области науки и техники имени аль-Фараби; Филиал ИАЭ НЯЦ Республики Казахстан, 180010, Курчатова, ул. Бейбіт атом, д. 10, область Абай, Республика Казахстан  
Chektybaev@nnc.kz



Эрлан Гадлетович Батырбеков, генеральный директор, д.ф.-м.н., профессор, академик КазНАЕН, академик НИА РК, лауреат Государственной премии Республики Казахстан в области науки и техники имени аль-Фараби; НЯЦ Республики Казахстан, 180010, Курчатова, ул. Бейбіт атом, 2Б, область Абай, Республика Казахстан  
batyrbekov@nnc.kz



Иван Александрович Сорокин, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, д. 1, Россия  
iasorokin@mail.ru



Валерий Альбертович Лузанов, руководитель лаборатории, к.ф.-м.н.; Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 141190, Фрязино, Московская обл., пл. Введенского, д. 1, Россия  
valery@ire216.msk.su



Теодора Соларевич, инженер, студентка 2-го года обучения магистратуры кафедры физики плазмы; НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31, Россия  
teodora.solarevic@gmail.com



Юрий Микаэлович Гаспарян, заведующий кафедрой, заведующий лабораторией, д.ф.-м.н.; НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31, Россия  
ymgasparyan@mephi.ru



Сергей Сергеевич Довганюк, заведующий лабораторией; НИЯУ МИФИ, 115409, Москва, Каширское ш., д. 31, Россия  
Ssdovganyuk@plasma.mephi.ru



Ирина Лашкаровна Тажибаева, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор, лауреат премии «Алтын Адам» — Человек года в Казахстане в номинации «Деятель науки», лауреат Государственной премии Республики Казахстан в области науки и техники имени аль-Фараби, заслуженный работник атомной отрасли РК (I ст.); Филиал ИАЭ НЯЦ, 180010, Курчатов, ул. Бейбіт атом, д. 10, область Абай, Республика Казахстан; исполнительный директор; Научно-технический центр безопасности ядерных технологий, 050020, Алматы, ул. Л. Чайкиной, д. 4, Республика Казахстан  
tazhibayeva@ntsc.kz



Ержан Айытбаевич Кашикбаев, начальник лаборатории; Филиал ИАЭ НЯЦ, 180010, Курчатов, ул. Бейбіт атом, д. 10, область Абай, Республика Казахстан  
kashikbaev@nnc.kz



Дмитрий Анатольевич Ольховик, начальник комплекса — главный инженер токамака КТМ; Филиал ИАЭ НЯЦ, 180010, Курчатов, ул. Бейбіт атом, д. 10, область Абай, Республика Казахстан  
Olkhovik@nnc.kz



Ерболат Тайтолеуович Коянбаев, заместитель директора, к.т.н., лауреат Государственной премии Республики Казахстан в области науки и техники имени аль-Фараби, заслуженный работник атомной отрасли РК (II и III ст.); Филиал ИАЭ НЯЦ, 180010, Курчатов, ул. Бейбіт атом, д. 10, область Абай, Республика Казахстан  
Erbol@nnc.kz



Виктор Владимирович Бакланов, первый заместитель директора, PhD, лауреат Государственной премии Республики Казахстан в области науки и техники имени аль-Фараби, заслуженный работник атомной отрасли РК (II и III ст.); Филиал ИАЭ НЯЦ, 180010 Курчатов, ул. Бейбіт атом, д. 10, область Абай, Республика Казахстан  
baklanov@nnc.kz

Статья поступила в редакцию 11 октября 2024 г.

После доработки 13 февраля 2025 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 88—98.



УДК 621.539.634:669-154

## ДИНАМИКА ЖИДКОМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КАПЕЛЬ ПРИ ИНЖЕКЦИИ В ПЛАЗМУ В УСТАНОВКЕ ПЛМ

*С.Д. Федорович<sup>1</sup>, А.В. Дедов<sup>1</sup>, А.И. Аристов<sup>2</sup>, В.П. Будаев<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>НИУ «МЭИ», Москва, Россия<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

Проведены эксперименты с жидкометаллической системой, формирующей капельный поток, инжектируемый в стационарный плазменный разряд в установке ПЛМ. Использовался металлический сплав галинстан в системе с вертикальной инжекцией в плазму каплей из микронатекателя. В эксперименте зарегистрировано отклонение траекторий каплей от вертикали в плазменном потоке, что с учётом направления электрического поля в разрядной камере установки ПЛМ указывает на отрицательный заряд каплей. Проведены моделирование и анализ экспериментальных результатов. Оценён заряд капли в замагниченной плазме путём анализа её траектории.

**Ключевые слова:** плазма, плазменная установка ПЛМ, токамак, жидкий металл, инжекция каплей, галинстан.

## THE DYNAMICS OF LIQUID METAL DROPLETS DURING THEIR INJECTION IN PLASMA OF PLM INSTALLATION

*S.D. Fedorovich<sup>1</sup>, A.V. Dedov<sup>1</sup>, A.I. Aristov<sup>2</sup>, V.P. Budaev<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>NRU «MPEI», Moscow, Russia<sup>2</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

Experiments were carried out with a liquid metal system that forms a droplet flow injected into a stationary plasma discharge in a PLM installation. The metal alloy Galinstan was used in a system with vertical injection of droplets from a microleak into the plasma. The experiment recorded the deviation of droplet trajectories from the vertical in the plasma flow, which, taking into account the direction of the electric field in the discharge chamber of the PLM installation, indicates a negative charge of the droplets. Simulation and analysis of experimental results were carried out. The charge of a drop in a magnetized plasma is estimated by analyzing its trajectory.

**Key words:** plasma, plasma installation, tokamak, liquid metal, droplet injection, Galinstan.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Использование жидких металлов (лития Li, олова Sn, галлия Ga и их сплавов) в качестве материалов внутрикамерных компонентов (ВК) термоядерных реакторов рассматривается как одно из перспективных решений проблемы взаимодействия плазма—стенка, когда возникает риск эрозии и разрушения конструкций и материалов под действием плазмы, в том числе вольфрама [1]. Основными преимуществами жидкометаллических компонентов, взаимодействующих с плазмой, по сравнению с твёрдыми материалами являются их устойчивость к деградации свойств поверхности под действием плазмы и возможность положительно влиять на приповерхностную плазму в термоядерном реакторе-токамаке. Жидкометаллические внутрикамерные компоненты в токамаках и других термоядерных установках предлагается использовать в виде капиллярно-пористых систем (КПС) [2, 3], систем с инжекцией капельного потока или струй жидкого металла в приповерхностную плазму [4] и плёнок жидкого металла (например, лития) на стенке [5].

Наиболее продвинутыми и апробированными в экспериментах на токамаках Т-11М [6], Т-10 [7], FTU [8], стеллараторах NSTX [9] и TJ-II [10], плазменных установках (ПЛМ [11] и др.) являются КПС с использованием лития. КПС могут устанавливаться на манипуляторе с регулируемым погружением в периферийную плазму, при этом возникают проблемы, связанные с необходимостью стабильного поддержания при мощной плазменно-тепловой нагрузке в крупноразмерных конструкциях температуры

КПС в узком диапазоне ( $\sim 220\text{—}450\text{ }^\circ\text{C}$ ), не допуская локального перегрева или отверждения жидкого металла с целью предотвращения потери работоспособности КПС. Предлагаемые схемы [3, 12—14] циркуляции лития (испарение из КПС в плазму и последующее осаждение на сборники лития) требуют высокой чистоты конструктивных элементов (с максимально пониженным содержанием кислорода и углерода), контактирующих с литием, чтобы ограничить образование композитных соединений карбонатов лития. Такие соединения, представляющие собой нерегулярные слоистые покрытия стенки, формируются при длительной (многочасовой) эксплуатации КПС. Пористая структура осажённых на стенках камеры литиевых соединений (как показал анализ соединений лития из токамака T-10 после экспериментов с литиевой КПС [15]), их физико-химические свойства (пониженная электро- и теплопроводность) в целом негативно влияют на взаимодействие плазма—стенка и режимы периферийной плазмы токамака.

Использование олова в КПС также рассматривается и анализируется в сравнении с литием (см. испытание КПС с оловом в плазменной установке ПЛМ [11]).

Применение схемы течения лития в виде плёнки по обращённой к плазме поверхности [5] имеет проблемы гидродинамической устойчивости такой токопроводящей плёнки в сильном магнитном поле токамака, риск контрагирования плёнки с оголением защищаемой поверхности. Описанный эффект образования карбонатов лития также неизбежно будет проявляться при многочасовой эксплуатации такой защитной системы.

Чтобы избежать негативного накопления на стенке литиевых соединений (оксидов, карбонатов лития и других), следует применять методы удаления таких осадков соединений либо принудительным способом со стенки, либо применять другой метод локальной инъекции жидкометаллического лития с удалением его через соответствующие сборники. Таким выгодным свойством обладает метод инъекции струи капель жидкого металла в плазму, локальность инъекции позволяет разработать и использовать сборник капель, пролетевших через плазму, для направления собранного потока на внешнюю регенерацию без условий активной реакции жидкого металла (лития и др.) с поверхностями и газами среды.

Инъекция жидкого металла в периферийную плазму в виде потока струй либо капель (например, падающего вертикально под действием гравитации) является также привлекательной схемой защиты стенки от экстремальных плазменных потоков и улучшения параметров взаимодействия плазма—стенка. Поток капель или струй через периферийную плазму в токамаке способен принять существенный уровень теплового потока и обеспечить его перенос в сборник с теплообменником.

При инъекции потока капель жидкого металла в плазму отсутствуют условия замыкания токов через капельный поток, что выгодно отличает данную схему от иных схем (например, плёнки на стенке), в которых сплошная жидкометаллическая поверхность в сильном магнитном поле токамака находится в неустойчивом состоянии с риском развития крупномасштабных неустойчивых движений (МГД-эффектов) с деформацией геометрии поверхности, разбрызгиванием и нарушением целостности покрытия жидким металлом стенки.

Впервые эксперименты с капельно-струйной схемой, ограничивающей взаимодействие плазмы со стенкой в токамаке, были проведены на токамаке T-3M [16]. Опыты на токамаке T-3M показали, что галлиевая капельная диафрагма может успешно функционировать в условиях граничной плазмы токамака в качестве рельсового лимитера.

Оценка применимости жидких металлов проводится на основе анализа их физических и химических свойств, режима взаимодействия с плазмой токамака, конструктивных и технологических особенностей их использования в токамаке. Обоснованный выбор жидкого металла должен базироваться на всестороннем анализе следующих аспектов их использования: обеспечение смачивания для реализации возможности самообновления и стабильности жидкометаллической поверхности при протекании в конструкциях и контакте с плазмой; коррозионная совместимость с материалами конструкции ВК; уровень возможного поступления атомов этих металлов в плазму и влияние на её параметры; технологические особенности использования этих металлов и безопасность; взаимодействие с плазмообразующими газами и наличие технологии их извлечения из жидкого металла после взаимодействия. Важным моментом является учёт конструктивных особенностей жидкометаллических ВК (габаритные размеры, свойства теплообмена и охлаждения и пр.) в токамаке.

Литий Li имеет заметное преимущество перед Ga и Sn по свойствам парообразования. Образование переизлучающего защитного слоя в этих условиях эффективно снижает падающий на поверхность тепловой поток. Применение Li позволяет радикально снизить рециклинг, но требует разработки методов извлечения изотопов водорода и очистки внутренних поверхностей камеры токамака. На токамаках T-11M, T-10, FTU и стеллараторе TJ-II проводились эксперименты и продемонстрированы технологические методы использования литиевых КПС и ВК.

Существенным преимуществом Ga и Sn является низкое давление насыщенных паров над поверхностью расплава (высокая температура кипения) по сравнению с Li. Для Li температурный предел применения, определяемый предельно допустимым потоком испаренных атомов в плазму, составляет ~550—600 °C. Для Ga и Sn, даже с учётом жёстких ограничений по поступлению атомов/ионов с большим зарядовым числом, он заметно выше, что и является основной мотивацией для их рассмотрения в качестве материалов жидкометаллических компонентов в токамаке.

Преимуществом Ga и Sn является то, что они не растворяют в себе и не взаимодействуют с водородом. Это свойство привлекательно для термоядерного реактора-токамака, где необходимо уменьшать накопление трития в камере. Несмотря на достоинство Ga и Sn и содержащих их сплавов (в том числе галинстана) по сравнению с Li, связанное с низким давлением пара над расплавом, их применение имеет ряд существенных недостатков, в том числе высокая коррозионная активность по отношению к конструкционным материалам. Критическим моментом является также необходимость обеспечения хорошего смачивания материалов. Совместимость широкого круга конструкционных материалов (нержавеющих сталей, тугоплавких металлов и сплавов на их основе) с Li достаточно хорошо изучена, экспериментальных данных о совместимости с Ga и Sn недостаточно. По имеющимся данным только Be, W, Ta, Re и их сплавы совместимы с Ga и Sn при температуре до 600 °C. Нержавеющие стали устойчивы к их воздействию только при температуре ниже 400 °C. Все рассматриваемые легкоплавкие металлы могут провоцировать охрупчивание конструкционных материалов ВК. Обоснованный выбор легкоплавкого металла для применения в стационарных токамаках-реакторах требует продолжения экспериментальных исследований, разработки конструкций и технологии применения внутрикамерных элементов на основе жидких металлов.

Для конструкций ВК с использованием Li, Ga, Sn верхний предел тепловых нагрузок на них в стационарном режиме работы близок к 18—20 МВт/м<sup>2</sup>. При возникновении ЭЛМов и срывов на поверхность ВК поступают мощные тепловые потоки, существенно превышающие величины для стационарного плазменного разряда, поэтому применение КПС неэффективно в зоне контакта с сепаратрисой и в зонах, где формируется критически большая тепловая нагрузка. В этом случае более эффективным методом защиты поверхности может быть капельный поток (завеса) или струйный поток, инжектируемый в плазму и принимающий на себя тепловую нагрузку плазменного потока, защищая таким образом материальную стенку реактора от перегрева. Эксперименты с использованием капельной завесы позволят определить уровень максимальных нагрузок на стенку и требования для разработки систем интенсивного охлаждения стенки и жидкометаллических ВК и выбора методов охлаждения конструкций [17—19], включая сборники жидкого металла.

Эксперименты с использованием капельной завесы позволят оценить эффекты, критически влияющие на гидродинамическую устойчивость струйно-капельного потока в плазме (в том числе размеры капель и начальная скорость потока при инъекции в плазму), чтобы определить задачи дальнейшей разработки метода и конструкций инжекторов, которые будут способствовать ограничению возможных недостатков концепции струйно-капельного потока по сравнению с остальными технологическими предложениями использования жидкометаллических компонентов в задачах.

Целями настоящей работы являются экспериментальное исследование и демонстрация реализуемости схемы капельного потока из жидкого металла, инжектируемого в стационарную замагниченную плазму, определение электрического заряда капель жидкого металла при их движении в плазме с магнитным полем. Эксперимент с жидким металлом галинстаном, инжектированным в виде капель в стационарный плазменный разряд, проведён на установке ПЛМ в НИУ «МЭИ».

## 2. УСТАНОВКА ПЛМ

Плазменная установка ПЛМ [20] предназначена для исследования взаимодействия плазма—стенка и испытаний материальных образцов потоками стационарной плазмы, моделирующими пристеночную и диверторную плазму токамака. На рис. 1 показана схема установки ПЛМ (вид сверху).

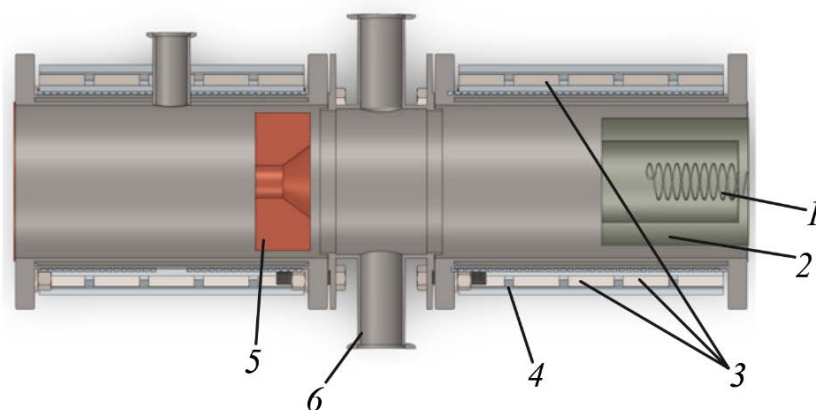


Рис. 1. Разрядная камера и магнитная система установки ПЛМ: 1 — катод; 2 — экран катода; 3 — постоянные неодимовые магниты; 4 — соленоид продольного магнитного поля; 5 — медный анод с диаметром отверстия 3,5 см; 6 — вертикальное диагностическое окно

Магнитная система ПЛМ имеет линейную геометрию с продольным магнитным полем, создаваемым соленоидом, и системой радиальных магнитных полей, которые формируются постоянными неодимовыми магнитами, закреплёнными в виде восьми сборок вдоль разрядной камеры поверх обмотки соленоида по азимутальному обходу на равном расстоянии друг от друга с чередованием магнитных полюсов. В результате формируется мультикасповая конфигурация магнитного поля — 8-полюсный мультикасп (октуполь). Каспы — области, в которых ра-

диальная составляющая напряжённости магнитного поля превышает продольную составляющую, величина индукции магнитного поля в каспах достигает 0,2 Тл, что обеспечивает магнитный барьер на периферии цилиндрической магнитной ловушки.

В водоохлаждаемой разрядной камере расположены катодный и анодный узлы. Рабочий плазмообразующий газ гелий поступал из системы регулируемого напуска в зону катодного узла. Плазма генерировалась за счёт ионизации гелия электронным ударом при подаче отрицательного потенциала (–(180—300) В) на разогретый до высоких температур (2000—2500 К) прямонакальный танталовый катод.

Параметры установки ПЛМ и гелиевой плазмы, в которой проведён эксперимент:

Диаметр/длина разрядной камеры, см ...	16/80
Диаметр горячей зоны плазменного разряда, см ...	4
Магнитное поле на оси разряда/в каспах, Тл ...	0,01/0,2
Концентрация электронов плазмы, $\text{м}^{-3}$ ...	$5 \cdot 10^{18}$ — $1 \cdot 10^{19}$
Температура электронов, эВ ...	1—7
Фракция «горячих» электронов, эВ ...	До 50
Плотность мощности плазменно-тепловой нагрузки на обращённые к плазме материальные поверхности, $\text{МВт}/\text{м}^2$ ...	От 0,1 до 1,9
Поток ионов плазмы на поверхность, частиц $/\text{м}^2$ ...	До $5 \cdot 10^{25}$

Видеосъёмка падения капель выполнялась с помощью видеокамеры, обеспечивающей частоту регистрации кадров  $120 \text{ с}^{-1}$ , время экспозиции  $1/400 \text{ с}$ .

Для экспериментов с капельной завесой был выбран сплав галинстан с элементным составом 68,5% галлия, 21,5% индия и 10% олова. Этот материал обладает температурой плавления  $-19 \text{ }^\circ\text{C}$ , низким давлением насыщенных паров ( $10^{-6} \text{ Па}$  при  $500 \text{ }^\circ\text{C}$ ), вязкостью  $0,0024 \text{ Па}\cdot\text{с}$  [21]. Такой материал используется в жидкометаллических технологиях [21—23], ранее он использовался в плазменных экспериментах [24]. Физико-химические свойства галинстана позволяют использовать его в экспериментах для выявления наиболее существенных свойств динамики жидкого металла в плазме.

Для наблюдения движения падающих капель галинстана в разрядной камере установки ПЛМ между катодом и анодом была установлена дополнительная секция-вставка из нержавеющей немагнитной

стали с расположенными на ней инжектором-микронатекателем, цилиндрическим контейнером для сбора падающих через плазму капель и диагностическим окном (рис. 2). Инжекция галинстана из открытого баллона в разрядную камеру с давлением гелия до 10 Па осуществлялась сверху в вертикальном направлении под действием атмосферного давления через сопло регулируемого микронатекателя диаметром 0,8 мм.

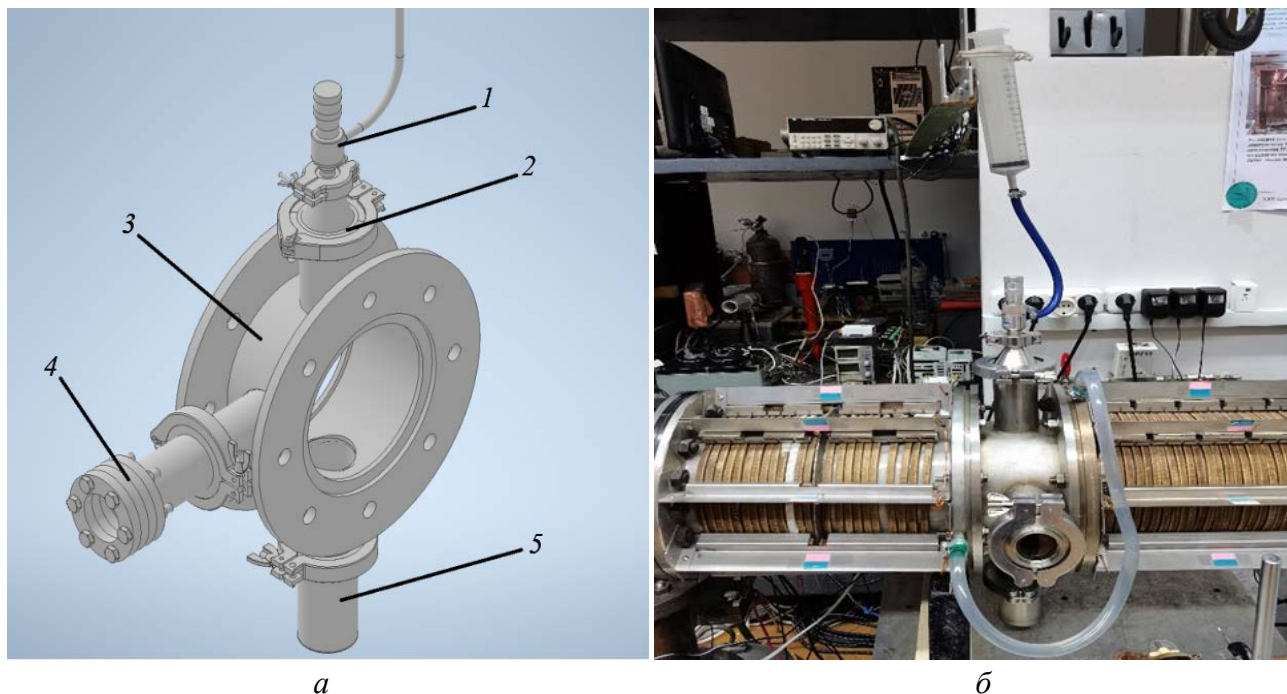


Рис. 2. 3D-модель секции разрядной камеры ПЛМ с инжектором жидкометаллических капель: 1 — инжектор жидкометаллических капель, 2 — фланец, 3 — секция камеры, 4 — диагностическое окно диаметром 45 мм, 5 — контейнер для сбора капель (а); фотография установки ПЛМ с секцией разрядной камеры для инжекции жидкометаллических капель в плазменный разряд (б)

Под действием силы тяжести и атмосферного давления инжектированные капли падали в поток гелиевой плазмы. Снос капли, вызванный потоком плазмы под действием откачки, не учитывался в расчёте в связи с малой скоростью потока ( $<0,2$  м/с) и его разреженностью. Капли при движении через плазменный поток принимали вытянутую цилиндрическую или сферическую форму в зависимости от тока разряда. Диаметр/объём каждой капли на выходе из сопла инжектора был 4 мм/50 мм<sup>3</sup>. В эксперименте каждая капля падает вертикально без начальной скорости из инжектора-микронатекателя с высоты 70 мм относительно входа в разрядную камеру (см. рис. 2). Усреднённый радиус капли определялся по результатам измерения массы десяти упавших в контейнер капель. При плотности галинстана, равной  $\rho = 6440$  кг/м<sup>3</sup> [25], получено значение радиуса истекающей из микронатекателя капли 1,92 мм. При истечении из инжектора-микронатекателя капля попадает в верхнюю часть разрядной камеры через 0,12 с после начала падения, достигнув скорости 1,17 м/с. Количество капель потока определялось в эксперименте визуальным счётом во время падения. Суммарная масса капель, попавших в контейнер для сбора капель в нижней части камеры, взвешивалась.

### 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ДВИЖЕНИЯ КАПЕЛЬ В РАЗРЯДНОЙ КАМЕРЕ

Для прогноза динамики инжектированных капель в плазме и выбора параметров экспериментального наблюдения проведено моделирование траектории движения падающей в плазму капли в зависимости от её заряда. Результаты моделирования использовались для анализа результатов эксперимента.

Суммарная сила, действующая на каплю в плазме, может быть обусловлена несколькими физическими процессами. Сила сопротивления нейтральному газу при движении капли обычно пренебрежимо

мала из-за малой кинетической энергии атомов газа. Поэтому доминирующими силами, действующими на каплю в плазме, являются сила тяжести, сила сопротивления из-за столкновения капли с ионами плазмы [26], реактивная сила при асимметричной абляции (испарении) крупных капель [27], сила Лоренца в магнитном и электрическом полях.

Далее представлены результаты моделирования динамики капель в предположении, что отсутствует испарение материала с поверхности капли при её движении в плазме, что соответствует условиям невысокой тепловой нагрузки на каплю в экспериментах на ПЛМ. В проведённом моделировании также не учитывалась сила сопротивления ионов, поскольку диаметр капель больше дебаевского радиуса (его значение  $\sim 1\text{—}10$  мкм). Согласно теоретическим представлениям [26] передачей импульса, возникающей в результате орбитальных кулоновских столкновений ионов с каплей, можно пренебречь по отношению к передаче импульса от ансамбля ионов.

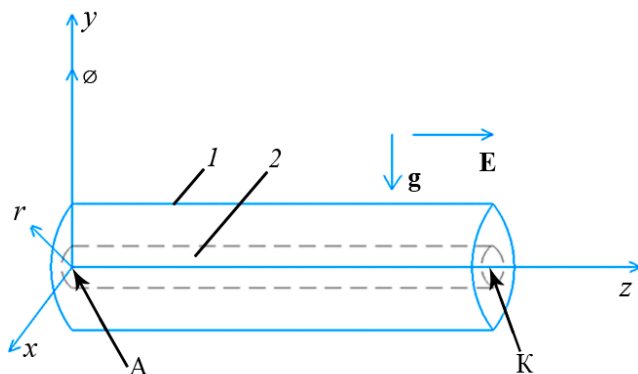


Рис. 3. Геометрия задачи о движении заряженной капли в цилиндрической камере ПЛМ: К — катод; А — анод; 1 — цилиндрическая стенка разрядной камеры длиной 860 мм и внутренним диаметром 160 мм; 2 — плазменный пучок диаметром 60 мм

После инжекции (истечения с нулевой начальной скоростью) из микронатекателя капля при входе в плазму (значение  $r = 0,08$  м от оси разрядной камеры) приобретает электрический заряд в результате взаимодействия её поверхности с плазмой (известное свойство, обеспечивающее баланс ионного и электронного токов на поверхности изолированного материального объекта в плазме).

Описание динамики капли проводилось в цилиндрических координатах (рис. 3).

Уравнение движения капли массой  $m$  с зарядом  $q$  в магнитном и электрическом полях под действием гравитационной силы

$$m\mathbf{a} = q[\mathbf{V}\mathbf{B}] + q\mathbf{E} + m\mathbf{g}, \quad (1)$$

где  $\mathbf{B}$  — индукция магнитного поля;  $\mathbf{E}$  — напряжённость электрического поля;  $\mathbf{g}$  — ускорение свободного падения;  $\mathbf{a}$  — ускорение.

Уравнения движения (1) в цилиндрических координатах  $r, \phi, z$  с заменой переменных

$$\dot{z} = w, \quad \dot{r} = k, \quad \dot{\phi} = p$$

преобразуются к виду

$$\begin{cases} \dot{z} = w; \\ \dot{r} = k; \\ \dot{\phi} = p; \\ \dot{w} = -\frac{qprB_r(z, r)}{m} - qE; \\ \dot{k} = \frac{qprB_z(z, r)}{m} + rp^2 - g_r; \\ \dot{p} = \frac{qprB_z(z, r)}{m} + rp^2 - g_r. \end{cases} \quad (2)$$

Начальные условия в рассматриваемой задаче:

$$z_{t=0} = 0,3591, \quad r_{t=0} = 0,08, \quad \phi_{t=0} = 0, \quad w_{t=0} = 0, \quad k_{t=0} = -1,1719, \quad p_{t=0} = 0,$$

положение анода  $z = 0,46$  м.

Численное решение системы (2) для капли с зарядом  $q$  даёт возможность построить траектории движения, которые отклоняются в направлении малых  $z$ . На рис. 4 показаны траектории движения капли с зарядом от 1 до 10 мкКл. Расчётное время движения капли с зарядом 1 мкКл при пересечении разрядной

камеры 0,14 с. При расчёте траектории движения капли в плазме магнитное поле в каждой пространственной точке определялось по принципу суперпозиции от магнитного поля каждого витка соленоида с учётом реальной геометрии соленоида и токов в нём.

При заряде капли примерно 7 мкКл из-за значительного отклонения её траектории от вертикали каплю невозможно наблюдать в диагностическом окне.

Геометрия расчётных траекторий (см. рис. 4) может быть скорректирована в случае необходимости учёта эффектов испарения материала под действием плазмы на поверхность и возникающей при этом реактивной силы при асимметричной абляции, а также силы сопротивления при движении в плазме, действующих на каплю (см. обсуждение этого эффекта, например, в [28, 29]). Поэтому корректность сделанного предположения об отсутствии силы сопротивления и реактивной силы при асимметричном испарении материала с поверхности капли следует проверить в будущих экспериментах на ПЛМ.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Первая серия наблюдения движения капель в гелиевой плазме была проведена при следующих параметрах разряда в установке ПЛМ: потенциал катода  $\varphi_{\text{кат}} = 182$  В, температура катода  $T_{\text{кат}} = 2600$  К, ток разряда  $I_p = 3,5$  А. Проведено сравнение траекторий капель в вакууме (без плазмы) и в плазме ПЛМ. Полученные изображения регистрации падения капель в этой серии экспериментов представлены на рис. 5. Диагностическое окно было размещено посередине вакуумной камеры, и в поле наблюдения вошла только центральная часть плазменного столба.

При падении в вакууме (без плазмы) капли имели вытянутую форму в виде цилиндра (см. рис. 5, а), причём из-за постоянной выдержки видеосъёмки во всех экспериментах зарегистрированную на отдельных кадрах вытянутую форму капли нельзя объяснить «смазыванием» изображения при съёмке. За счёт времени экспозиции «смазывание» не превышает 1 мм.

Начальная цилиндрическая форма капель формировалась в результате разрыва непрерывно падающей струи металла на цилиндрические участки. При движении в плазме зарегистрированы изменение цилиндрической формы капель на шарообразную и отклонение траектории их падения от вертикали (см. рис. 5, б) под действием электрического поля в плазме между катодом и анодом, что указывает на приобретение каплями электрического заряда. Помимо этого, в плазме зарегистрировано изменение формы капель: капли принимали шарообразную форму (см. рис. 5, б).

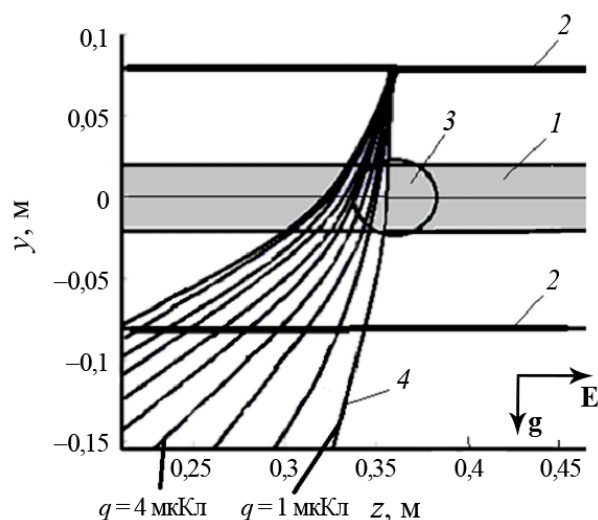


Рис. 4. Траектории движения в плазменном разряде ПЛМ капли с зарядом от 1 до 10 мкКл, траектории построены с шагом 1 мкКл: 1 — плазменный цилиндрический разряд; 2 — стенка разрядной камеры; 3 — диагностическое окно; 4 — рассчитанные траектории (линии) капель. Указаны векторы электрического поля  $E$  и ускорения свободного падения  $g$ ,  $y$  — вертикальная координата,  $z$  — горизонтальная координата

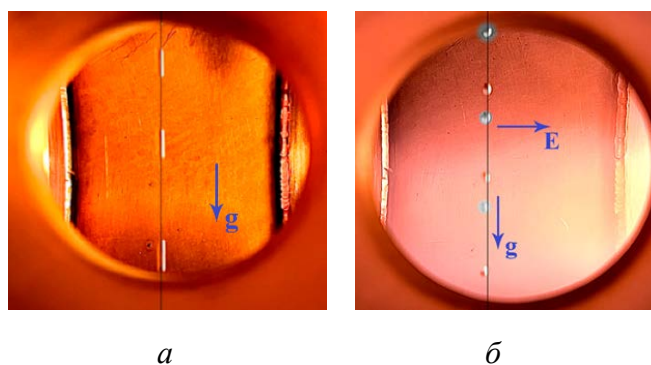


Рис. 5. Фотография (оптическое изображение) потока капель в камере ПЛМ, наблюдение через горизонтальное диагностическое окно: а — без плазмы в вакууме; б — в плазме в первой серии опытов. Вертикаль нанесена в виде тёмной линии вдоль вектора ускорения свободного падения  $g$ ,  $E$  — вектор напряжённости электрического поля в плазме

Параметры разряда во второй серии экспериментов представлены в табл. 1, фотографии, полученные в ходе съёмки эксперимента, — на рис. 6. Во второй серии экспериментов также наблюдалось отклонение траектории каплей от вертикали вдоль оси  $z$ . При движении в плазме также наблюдался эффект изменения формы каплей. При этом с увеличением тока разряда, т.е. с увеличением концентрации плазмы, цилиндрическая форма капли при влёте в плазму изменяется — уменьшается длина цилиндра, принимая форму, близкую к шарообразной, в нижней части разряда (табл. 2).

Таблица 1. Параметры экспериментов второй серии

$T_{\text{кат}}, \text{К}$	$W_{\text{кат}}, \text{Вт}$	$p_1, \text{Торр}$	$p_2, \text{Торр}$	$\varphi_{\text{кат}}, \text{В}$	$I_p, \text{А}$	$I_p/S, \text{А/см}^2$
2581	1224,8	$3,22 \cdot 10^{-2}$	$3,20 \cdot 10^{-2}$	182	1,85	0,19
2261	1196,4	$1,25 \cdot 10^{-1}$	$1,33 \cdot 10^{-1}$	182	2,00	0,21
2681	1189,3	$8,80 \cdot 10^{-2}$	$8,90 \cdot 10^{-2}$	182	13,90	1,46

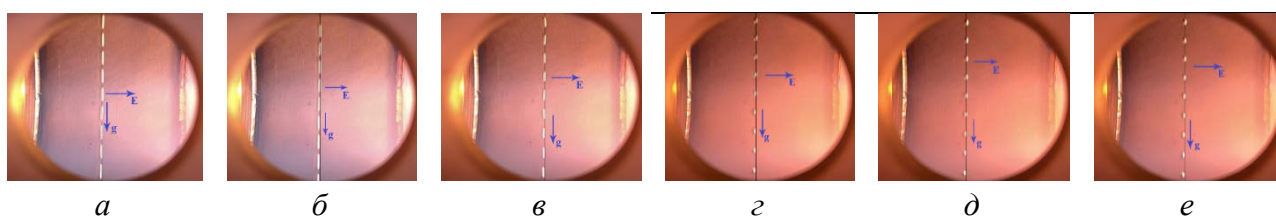


Рис. 6. Фотографии (оптическое изображение) потока каплей в плазме ПЛИМ, наблюдение через горизонтальное диагностическое окно, ток разряда:  $I_p = 1 \text{ А}$  (а);  $I_p = 2 \text{ А}$  (б);  $I_p = 3 \text{ А}$  (в);  $I_p = 5 \text{ А}$  (г);  $I_p = 10 \text{ А}$  (д);  $I_p = 13,9 \text{ А}$  (е). Вертикаль нанесена в виде тёмной линии вдоль вектора ускорения свободного падения  $g$ ,  $E$  — вектор напряжённости электрического поля в плазме

Таблица 2. Длина и диаметр цилиндрических каплей при различных токах плазмы

№ эксперимента	Ток плазмы $I_p, \text{А}$	Длина цилиндрической капли $h_{\text{кап}}, \text{мм}$	Диаметр цилиндрической капли $d_{\text{кап}}, \text{мм}$	Погрешность определения длины капли, мм
1	1,0	3,6	1,22	0,05
2	2,0	3,5	1,26	0,05
3	3,0	2,9	1,38	0,05
4	5,0	1,8	1,51	0,05
5	10,0	1,7	1,55	0,05
6	13,9	1,6	1,6	0,05

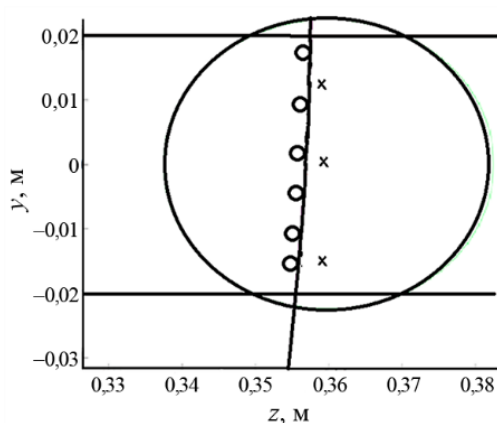


Рис. 7. Проекция траектории заряженной капли с зарядом  $0,6 \text{ мкКл}$  в первой серии экспериментов:  $x$  — положение каплей в отсутствие плазмы;  $o$  — положение каплей при инъекции в плазму

Результаты первой серии экспериментов наиболее точно описываются расчётной геометрией траектории капли с зарядом  $0,6 \text{ мкКл}$ , сумма относительных погрешностей расчёта составляла  $\sim 11\%$  (рис. 7).

По полученным фотографиям движения капли во второй серии экспериментов были определены её координаты в фиксированных точках траектории и занесены в расчётную программу. Для каждого эксперимента (с фиксированным током плазмы, см. табл. 1) выбирался заряд капли с расчётной траекторией, наиболее близкой к экспериментально измеренной траектории. Поскольку анализ сравнения экспериментальной и расчётных траекторий был проведён для серии расчётов с шагом заряда  $10^{-7} \text{ Кл}$ , то погрешность определяемого заряда в такой процедуре была  $0,5 \cdot 10^{-7} \text{ Кл}$ .

Вторым методом оценки был анализ формы и размера капли. Для этой цели были оцифрованы крайние точки фотографий каплей и оценены размеры жидкометаллических каплей в форме цилиндров.

Полученные значения зарядов капель, а также заряды капель, определённые из анализа их траектории, представлены в табл. 3.

Согласно определению поверхностного натяжения

$$W = \gamma \Delta S, \quad (3)$$

где  $W$  — работа по уменьшению площади поверхности капли;  $\gamma$  — коэффициент поверхностного натяжения капли, который принимался постоянным и равным  $\gamma = 521$  нН/м;  $\Delta S$  — изменение площади поверхности капли относительно капли в вакууме.

Затем из формулы для энергии заряженного тела

$$W = \frac{1}{2} \int_V \varphi dq, \quad (4)$$

где  $\varphi$  — потенциал в точке, где находится заряд  $dq$ , потенциал заряженной сферы находится как

$$\varphi = \begin{cases} k \frac{Q}{R}, & r < R; \\ k \frac{Q}{r}, & r \geq R, \end{cases} \quad (5)$$

где  $k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}$ ,  $\epsilon_0$  — электрическая постоянная,  $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12}$  Ф/м;  $q$  — заряд сферы;  $R$  — радиус сферы,

$r$  — радиальная координата.

С учётом того, что

$$dq = \rho dV, \quad (6)$$

где  $\rho$  — объёмная плотность заряда, для заряженной сферы  $\rho = \sigma \delta(r - R)$ , где  $\delta$  — дельта-функция Дирака,

$$\sigma = \frac{Q}{S_{\text{сферы}}} = \frac{Q}{4\pi R^2}.$$

Подставляя формулы (5) и (6) в (4), получим формулу для энергии заряженной сферы

$$W = k \frac{Q^2}{2R}. \quad (7)$$

Приравнявая выражения (3) и (7) и выражая оттуда заряд  $Q$ , получим

$$\begin{aligned} \gamma \Delta S &= k \frac{Q^2}{2R}, \\ Q &= \sqrt{\frac{2R\sigma \Delta S}{k}}. \end{aligned} \quad (8)$$

Различие в значениях зарядов, полученных методом анализа формы капель и методом анализа траектории капель, может быть объяснено отсутствием учёта влияния реактивных сил, вызванных неравномерным испарением капли в плазменном потоке, и температурной зависимости коэффициента поверхностного натяжения галинстана.

Полученные данные могут использоваться для оценки динамики движения капель при реализации инжекции капельного потока в пристеночной области токамака со следующими параметрами плазмы:

Таблица 3. Расчётные значения зарядов капель при различных токах разряда плазмы в ПЛМ

Ток плазмы, А	Заряд, определённый из анализа формы капель, $10^{-7}$ Кл	Заряд, определённый из анализа траектории, $10^{-7}$ Кл
1,0	1,5	1,5
2,0	1,5	2,0
3,0	2,3	2,0
5,0	3,1	3,0
10,0	3,1	5,0
13,9	3,2	5,0

концентрация электронов  $10^{18} \text{ см}^{-3}$  и температура электронов 1—10 эВ, что соответствует зоне дальнего СОЛ (пристеночной плазмы) или дальней зоне дивертора.

При использовании конструкции инжектора, аналогичной описанной в настоящей работе, и жидкого металла со свойствами, близкими к галинстану (например, олово), отклонение капельного потока от вертикали при пролёте через зону дальнего СОЛ в токамаке масштаба Т-15МД, ТИН-1 и ТРТ может быть от 1—2 до 5—7 мм. Такие результаты можно использовать для разработки схемы инжектора и режимов эксплуатации.

В термоядерной плазме реактора-токамака на динамику жидкометаллической капли будут также влиять эффекты неоднородного электрического поля вблизи стенки, связанные с профилем электрического потенциала. Например, трёхмерный неоднородный профиль потенциального электрического поля над облицовкой дивертора и стенки с наличием выступов, острых вершин и негладкой поверхности (шероховатости) будет формировать специфические условия для движения заряженных капель в таких электрических полях с криволинейной траекторией [30].

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены эксперименты с жидкометаллической системой, формирующей капельный поток, инжектируемый в стационарный плазменный разряд в установке ПЛИМ. Использовался металлический сплав галинстан в системе с инъекцией капель в плазму. В эксперименте зарегистрировано отклонение траекторий капель от вертикали в плазменном потоке, что указывает на отрицательный заряд капель с учётом направления электрического поля в разрядной камере установки ПЛИМ. При движении капли в плазме наблюдалось изменение формы капли от цилиндрической (при входе в плазму) к шарообразной при достаточно больших значениях тока разряда. Проведены моделирование и анализ экспериментальных результатов в предположении отсутствия испарения материала с поверхности капли и малости силы сопротивления движению капли при пролёте через плазму. Заряд капли, определённый из анализа отклонения траектории от вертикали, лежал в диапазоне от  $1,5 \cdot 10^{-7}$  до  $5 \cdot 10^{-7}$  Кл.

В последующих экспериментах на ПЛИМ с инъекцией потока жидкометаллических капель в плазму планируется провести измерение характеристик испаренного с поверхности капель материала для оценки вклада реактивной силы в динамику капли в условиях возможной асимметрии испарения (абляции) материала с поверхности под действием плазменно-тепловой нагрузки.

Полученные данные могут использоваться для оценки динамики движения капель при реализации инъекции капельного потока в пристеночной области токамака с целью защиты стенки от перегрева.

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания № FSWF-2023-0016 и частично № FSWF-2025-0001.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Будаев В.П.** Результаты испытаний вольфрамовых мишеней дивертора при мощных плазменно-тепловых нагрузках, ожидаемых в ИТЭР и токамаках реакторного масштаба (обзор). — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 4, с. 5.
2. **Люблинский И.Е., Вертков А.В., Семенов В.В.** Сравнительный анализ возможности применения легкоплавких металлов с капиллярно-пористой системой в условиях токамака. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2015, т. 38, вып. 1, с. 7—14.
3. **Lyublinski I., Vertkov A., Mirnov S., Lazarev V.** Protection of tokamak plasma facing components by a capillary porous system with lithium. — J. Nucl. Mater., 2015, vol. 463, p. 1156—1159.
4. **Муравьев Е.В.** Концептуальные разработки и исследования жидкометаллических систем для термоядерного реактора-токамака. Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук. Ордена Ленина и ордена Октябрьской Революции Институт атомной энергии им. И.В. Курчатова. Москва, 1990. 239 с.
5. **Писарев А.А., Вертков А.В., Жарков М.Ю. и др.** Текущий жидкий литий как материал, обращенный к плазме. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2024, т. 47, вып. 1, с. 15—28.

6. **Mirnov S.V., Belov A.M., Djigailo N.T. et al.** Recent lithium experiments in tokamak T-11M. — *J. Nucl. Mater.*, 2013, vol. 438, p. 224—228.
7. **Vershkov V.A., Mirnov S.V., Lyublinski I.E. et al.** Experiments with lithium gettering of the T-10 tokamak. — *Fusion Energy*, 2008 (Proc. 22th Intern. Conf. Geneva, 2008). — Vienna: IAEA, 2008, CD-ROM file EX/P4-14.
8. **Apicella M.L., Mazzitelli G., Percoli Ridolfini V. et al.** Review of FTU results with the liquid lithium limiter. — *Fusion Eng. Des.*, 2010, vol. 85, p. 896—901.
9. **Kaita R., Kugel H., Dell M.G. et al.** Plasma performance improvement with lithium-coated plasma-facing components in NSTX. — *Fusion Energy*, 2008 (Proc. 22th Intern. Conf. Geneva, 2008). — Vienna: IAEA, 2008, CD-ROM file EX/P4-9.
10. **Tabàres F., Tafalla D., Ferreira J. et al.** Lithium wall stellarator experiment in TJ-II. — *Plasma and Fusion Research*, 2010, vol. 5, S1012 (6 p.).
11. **Budaev V.P. et al.** Impact of liquid metal surface on plasma-surface interaction in experiments with lithium and tin capillary porous systems. — *Nuclear Materials and Energy*, 2020, vol. 25, 100834 (6 p.).
12. **Evtikhin V.A., Lyublinski I.E., Vertkov A.V. et al.** Lithium divertor concept and results of supporting experiments. — *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2002, vol. 44, № 6, p. 955—977.
13. **Люблинский И.Е., Вертков А.В., Евтихин В.А.** Физико-химические основы использования лития в жидкометаллических системах термоядерного реактора. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2007, вып. 4, с. 13—44.
14. **Mirnov S.V., Dem'yanenko V.N., Murav'ev E.V.** Liquid-metal tokamak divertors. — *J. Nucl. Mater.*, 1992, vol. 196—198, p. 45—49.
15. **Budaev V.P. et al.** Spectroscopic characterization of composite lithium materials irradiated with high-temperature plasma. — *Heliyon*, 2020, vol. 6, № 11, e05510.
16. **Мирнов С.В., Евтихин В.А.** Применение Ga и Li как материала лимитеров в токамаках Т-3М и Т-11М. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2005, вып. 4, с. 3—18.
17. **Дедов А.В.** Особенности кипения в недогретом потоке. — *Теплоэнергетика*, 2009, № 8, с. 62—69.
18. **Ван Оост Г., Дедов А.В., Будаев В.П.** Материалы обращенных к плазме компонентов термоядерных реакторов-токамаков: требования, термостабилизация, испытания (обзор). — *Теплоэнергетика*, 2021, № 3, с. 18—35.
19. **Дедов А.В.** Критические тепловые нагрузки при кипении в недогретом потоке. — *Теплоэнергетика*, 2010, № 3, с. 2—8.
20. **Будаев В.П., Федорович С.Д., Лукашевский М.В., Мартыненко Ю.В., Губкин М.К., Карпов А.В., Лазукин А.В., Шестаков Е.А.** Плазменная установка НИУ «МЭИ» для испытаний тугоплавких металлов и создания высокопористых материалов нового поколения. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2017, т. 40, вып. 3, с. 23—36.
21. **Мусаева Д.А., Ильин В.К., Гежа В., Бааке Э.** Экспериментальное исследование влияния низкочастотной импульсной силы Лоренца на движение расплава Галинстана. — *Научно-технические ведомости СПбГПУ. Физико-математические науки*, 2016, вып. 3, с. 39—51.
22. **Zhongkai Zhang, Jiaming Lei, Fajing Li, Le Li.** Investigation of the heat transfer characteristics of Galinstan liquid metal driven by electromagnetism. — *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 230, 120776.
23. **Federico Scarpa, Sawssen Slimani.** Galinstan liquid metal as the heat transfer fluid in magnetic refrigeration. — *Applied Thermal Engineering*, 2023, vol. 232, 120971 (15 p.).
24. **Kolemena E., Hvastaa M., Majeskib R., Maingib R.** Design of the Flowing Liquid Torus. — *Nuclear Materials and Energy*, 2019, vol. 19, p. 524—530.
25. **Ohgo T., Goto T., Takimoto T.** Plasma irradiation experiment on the metal pebble flow in the TPDsheet-U. — *Fusion Engineering and Design*, 2021, vol. 165, p. 163—169.
26. **Krashenninnikov S.I., Smirnov R.D., Rudakov D.L.** Dust in magnetic fusion devices. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2011, vol. 53, 083001 (54 p.).
27. **Krashenninnikov S.I., Pigarov A.Y., Smirnov R.D., Soboleva T.K.** Theoretical Aspects of Dust in Fusion Devices. — *Contrib. Plasma Phys.*, 2010, vol. 50, p. 410—425.
28. **Фортон В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф.** Пылевая плазма. — *УФН*, 2004, № 174, с. 495—544.
29. **Ratynskaia S. et al.** Modelling of dust generation, transport and remobilization in full-metal fusion reactors. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 2022, vol. 64, 044004 (11 p.).
30. **Budaev V.** On Fractal Properties of Equipotentials over a Real Rough Surface Faced to Plasma in Fusion Devices. — *Plasma and Fusion Research: Rapid Communications*, 2008, vol. 3, 001 (3 p.).



Сергей Дмитриевич Федорович, доцент, д.т.н., награждён медалью «В память 850-летия Москвы»; НИУ «МЭИ», 111250, Москва, ул. Красногвардейская, д. 14, Россия  
fedorovichsd@mail.ru



Алексей Викторович Дедов, заведующий кафедрой, д.т.н., член-корреспондент РАН; директор Института тепловой и атомной энергетики, НИУ «МЭИ», 111250, Москва, ул. Красногвардейская, д. 14, Россия  
dedovav@mpei.ru



Артемий Иванович Аристов, лаборант-исследователь; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
artemijaristov@gmail.com



Вячеслав Петрович Будаев, профессор, д.ф.-м.н.; НИУ «МЭИ», 111250, Москва, ул. Красногвардейская, д. 14, Россия; ведущий научный сотрудник, ветеран атомной энергетики и промышленности, лауреат премии им. И.В. Курчатова; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
Budaev@mail.ru

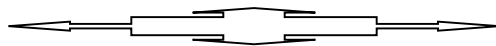
Статья поступила в редакцию 30 октября 2024 г.

После доработки 15 ноября 2024 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 99—110.



УДК 533.95

**АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ, СБОРА И АРХИВАЦИИ  
ДАНЫХ, ОБЕСПЕЧИВАЮЩАЯ ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ  
КВАЗИСТАЦИОНАРНОГО СИЛЬНОТОЧНОГО ПЛАЗМЕННОГО  
УСКОРИТЕЛЯ В ИМПУЛЬСНО-ПЕРИОДИЧЕСКОМ РЕЖИМЕ***А.А. Мамонов, К.М. Гуторов, А.В. Лазукин, Н.С. Климов**АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», Москва, Троицк, Россия*

В АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» в рамках федерального проекта «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» ведутся работы по созданию прототипа плазменного ракетного двигателя на основе квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя (КСПУ). Одной из ключевых задач является запуск КСПУ в импульсно-периодическом режиме. Переход от однократного режима запуска, в котором КСПУ эксплуатировался до настоящего времени, к импульсно-периодическому режиму работы требует существенного изменения системы управления. В статье сформулированы требования к системе управления, сбора и архивации данных, обеспечивающей работу КСПУ в импульсно-периодическом режиме. Предложенная архитектура системы управления основана на принципах распределённого управления и минимальной связности. Также в статье описаны испытания ключевой задачи системы управления, а именно выполнения последовательности сбора и анализа данных диагностик. Результаты испытаний демонстрируют возможность обеспечить работу КСПУ в импульсно-периодическом режиме с частотой до 10 Гц на протяжении до 20 мин в разработанной архитектуре системы управления с типовым аппаратным обеспечением.

**Ключевые слова:** квазистационарный плазменный ускоритель, система управления, подсистемы, диагностическое оборудование, импульсно-периодический режим, объём данных, безопасность.

**CONTROL, ACQUISITION AND ARCHIVING SYSTEM ARCHITECTURE  
FOR THE OPERATION OF QUASI-STATIONARY HIGH-CURRENT PLASMA  
ACCELERATOR IN PULSE-PERIODIC MODE***A.A. Mamonov, K.M. Gutorov, A.V. Lazukin, N.S. Klimov**SRC «TRINITI», Moscow, Troitsk, Russia*

One of the key tasks in the framework of creating a prototype plasma rocket thruster based on a quasi-stationary high-current plasma accelerator (QSPA) is the operation of the QSPA in a pulse-periodic mode. The transition from a single-pulse mode, in which the QSPA has been operated until now, to a pulse-periodic mode requires the significant change of a control system. This paper presents the requirements on the control, acquisition and archiving system, which ensures the operation of the QSPA in a pulse-periodic mode. The proposed control system architecture is based on the principles of distributed control and minimal connectivity. Also, the paper describes the testing of a control system key task, namely, the execution a sequence of acquisition and analysis of diagnostic data. Test results demonstrate, that the control system architecture developed using standard hardware is able to ensure the operation of the QSPA in a pulse-periodic mode with a frequency of up to 10 Hz for up to 20 minutes.

**Key words:** quasi-stationary plasma accelerator, control system, subsystems, diagnostic equipment, pulse-periodic mode, amount of data, safety.

**1. ВВЕДЕНИЕ**

В АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ» в рамках реализации федерального проекта ФП-3 «Разработка технологий управляемого термоядерного синтеза и инновационных плазменных технологий» комплексной программы «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной

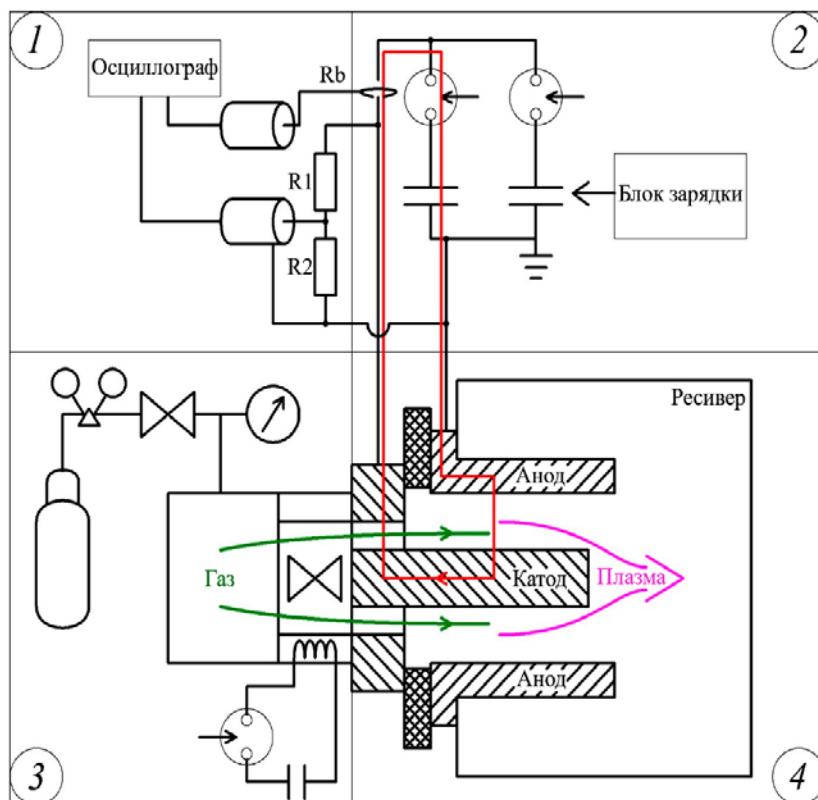


Рис. 1. Схема КСПУ: 1 — диагностическое оборудование; 2 — энергетическая подсистема; 3 — газовая подсистема; 4 — ускоритель, установленный в вакуумной камере — ресивере

рительный канал, и системы подачи плазмообразующего газа на вход этого канала (рис. 1). При приложении напряжения к электродам ускорителя в канале формируется разряд. В данной конфигурации ток по плазме протекает преимущественно радиально между катодом и анодом. Ток, протекающий по электродам, приводит к формированию азимутального магнитного поля в ускорительном канале. Сила Ампера (взаимодействие азимутального магнитного поля с радиальным током) ускоряет плазму, формируя поток, истекающий из ускорительного канала в вакуумную камеру. Отличительной особенностью КСПУ является работа в режиме с импульсами разряда, длительность которых много больше времени пролёта ионами ускорительного канала, в результате чего практически на всей протяжённости импульса устанавливается стационарное магнитогидродинамическое истечение плазмы.

В данной статье в качестве объекта управления рассматривается электрофизическая установка КСПУ в целом — испытательный стенд с входящим в его состав ускорителем. Типичные значения напряжения на электродах — до нескольких кВ, тока разряда — до 200 кА. Мгновенная мощность может достигать несколько сотен МВт. Электропитание разряда осуществляется от обострителя мощности — конденсаторной батареи, состоящей из шести секций по 16 мФ с максимальным напряжением 5 кВ. Ёмкость батареи позволяет реализовывать разряды длительностью порядка 1 мс. В текущей конфигурации установки [3] частота следования импульсов ограничена скоростью зарядки конденсаторной батареи и скоростью откачки вакуумной камеры (ресивера потока) после пуска ускорителя и обычно не превышает 10 пусков в час.

На основе КСПУ возможно создание электрореактивного двигателя со средней мощностью порядка нескольких сотен кВт при реализации импульсно-периодического режима работы ускорителя с частотой следования пусков около 10 Гц и энергосодержанием каждого пуска несколько десятков кДж. Экспериментальная реализация такого режима требует создания нового испытательного стенда с высокой скоростью откачки, мощным зарядным устройством и системой активного охлаждения.

энергии в Российской Федерации на период до 2024 года» (РТТН) [1] ведутся работы по созданию прототипа плазменного ракетного двигателя на основе квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя (КСПУ). Плазменный ускоритель является устройством для формирования высокоскоростного (скорость направленного движения существенно превышает скорость теплового движения ионов) плазменного потока, создаваемого из подаваемого рабочего тела. Идея создания квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя и теоретические основы его функционирования были сформулированы А.И. Морозовым [2]. Непосредственно ускоритель состоит из коаксиальных протяжённых электродов, формирующих уско-

Данная работа направлена на создание системы управления, сбора и архивации данных, обеспечивающей проведение экспериментов на КСПУ в импульсно-периодическом режиме. Основная задача управления — обеспечение серии пусков ускорителя плазмы с заданными характеристиками (напряжение, ток, длительность разряда — для реализации плазменного потока с требуемой скоростью на выходе ускорителя) в течение заданного времени (до 20 мин непрерывной работы).

## 2. СТРУКТУРА ОБОРУДОВАНИЯ КСПУ

На рис. 1 показана блочная структура КСПУ с точки зрения разделения установки на отдельные исполнительные подсистемы. Ускоритель плазмы (1) выступает потребителем электрической мощности и с точки зрения представления в виде динамической нагрузки источника питания может быть описан вольт-амперной характеристикой. Также ускоритель является источником электромагнитных помех.

Электропитание ускорителя осуществляется энергетической исполнительной подсистемой (2), которая представляет собой ёмкостной накопитель энергии, состоящий из шести секций по 16 мФ каждая с максимальным напряжением 5 кВ, зарядного устройства и шести коммутаторов (управляемые вакуумные разрядники (РВУ) по одному на каждую конденсаторную секцию). Регулирование мощности осуществляется установкой величины напряжения зарядки ёмкостного накопителя энергии. Подстройка формы импульса осуществляется установкой времени срабатывания коммутаторов. Также коммутаторы являются источниками электромагнитных помех.

Подача рабочего тела в ускоритель осуществляется газовой исполнительной подсистемой (3), которая состоит из импульсного клапана, системы его питания и оборудования для регулирования давления газа. Интегральный массовый расход газа за импульс определяется в каждом пуске, исходя из перепада давления до и после пуска в отсекаемом от подающей линии буферном объёме перед клапаном (подклапанном объёме). Регулирование расхода газа осуществляется установкой величины давления газа и величины подаваемого на клапан напряжения.

В ресивере необходимо поддерживать остаточное давление на уровне  $10^{-5}$  мбар, что обеспечивается вакуумной исполнительной подсистемой. В данной подсистеме не предполагается регулирование.

Работа коммутирующих устройств во время пуска должна быть синхронизована. Моменты коммутации определяют количество газа в межэлектродном промежутке, время инициации пробоя, длительность импульса тока и пульсации тока в ускорительном канале.

Ускоритель и коммутирующие устройства являются источниками электромагнитных и кондуктивных помех, для защиты оборудования от которых используются следующие меры: во время эксперимента диагностическое оборудование переводится на батарейное питание, передача информации и сигналов синхронизации ведётся по оптическому волокну, чувствительные к помехам устройства размещаются в отдельном экранированном помещении.

Анализ режима работы ускорителя осуществляется с помощью диагностического оборудования. Можно выделить характерные типы источников данных: «осциллографические сигналы» — регистрация быстро изменяющихся параметров на протяжении импульса, «кадры/наборы данных» — передаваемые по цифровым линиям связи различные наборы диагностических данных (цифровые камеры). Минимальный набор диагностик — «осциллографические сигналы» тока и напряжения разряда (пояс Роговского Rb и делитель R1/R2 на рис. 1) и давления газа в подклапанном объёме для определения расхода. Характерный пример источника «кадры/наборы данных» — высокоскоростные камеры (определение скорости потока методом доплеровской спектроскопии, определение концентрации по уширению линии, видеорегистрация потока, обзорная спектроскопия).

## 3. ТРЕБОВАНИЯ К СИСТЕМЕ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

В импульсно-периодическом режиме ускоритель плазмы должен работать с частотой 10 Гц в течение 20 мин. Ограничения по длительности работы создаются конечной производительностью системы вакуумной откачки.

Система автоматического управления (САУ) выполняет следующие задачи:

— обеспечение безопасности (блокировка дверей во избежание несанкционированного входа персонала при пуске, автоматическое заземление токоведущих частей в аварийных ситуациях, контроль температуры агрегатов, контроль электропотребления подсистем, контроль отказов исполнения от подсистем);

— управление установкой (контроль стартовых условий по подсистемам и диагностикам, регулировка уставок);

— сбор данных об эксперименте (запись условий эксперимента, опрос диагностического оборудования, архивирование, вывод оперативных отчётов о текущем состоянии).

Для выполнения задач безопасности внутри САУ должна быть независимая подсистема безопасности, выполненная на отдельных аппаратных ресурсах [4].

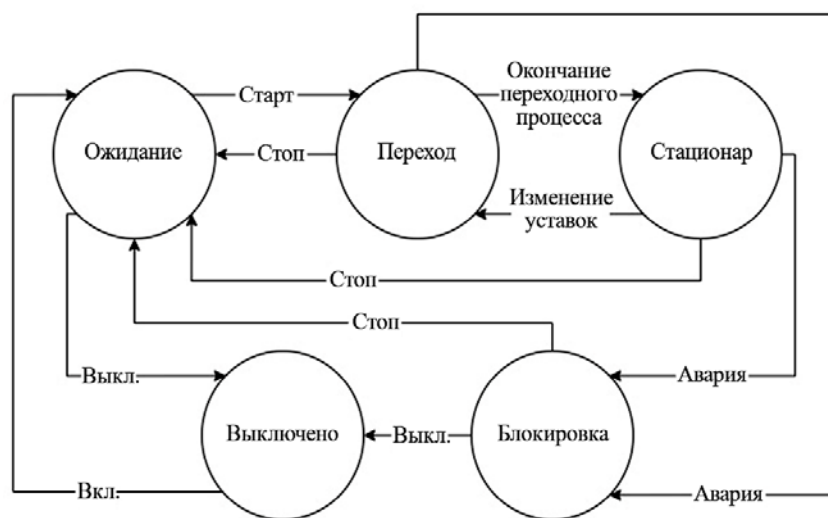


Рис. 2. Конечный автомат системы автоматического управления

Алгоритм работы САУ может быть описан как конечный автомат с набором состояний и переходов между ними (рис. 2). В представленной последовательности состояние «Выключено» является исходным. Исполнительные подсистемы находятся в режиме ожидания или отключены. Переход к другим состояниям возможен только при отсутствии персонала на установке, что обеспечивается подсистемой безопасности. По команде оператора происходит переход в состояние «Ожидание», в котором

выполняется самодиагностика исполнительных и диагностических подсистем. По команде оператора выполняется переход в состояние «Переход», в котором происходят пуски ускорителя и его выход на рабочий режим. Когда показания диагностических подсистем входят в заранее заданные диапазоны, САУ делает вывод об окончании переходного процесса и переходит в состояние «Стационар». В этом состоянии происходят пуски ускорителя в установившемся режиме, а САУ следит за тем, чтобы показания диагностических подсистем укладывались в заранее заданные диапазоны. В противном случае подаётся сигнал об аварии. Аналогичный сигнал подаётся при выходе какого-либо параметра в зоне контроля подсистемы безопасности за пределы допустимого диапазона. По сигналу аварии происходит переход в состояние «Блокировка». В этом состоянии снимается питание с силовых аппаратов исполнительного оборудования. Помимо этого, происходит сбор данных о причинах аварии. По команде оператора происходит переход в состояние «Выключено» или «Ожидание». В состояниях «Переход» и «Стационар» производятся пуски ускорителя в импульсно-периодическом режиме, при этом САУ отработывает заданную последовательность действий, определённую периодом пусков разряда: пуск — сбор данных — анализ данных — подготовка пуска — проверка готовности, как представлено на рис. 3. Данные задачи выполняются в режиме реального времени.

Если необходимо изменение уставок исполнительного оборудования, то оно должно произойти перед началом очередного цикла подготовки пуска. Поскольку сбор и проверка диагностических данных могут происходить независимо от подготовки исполнительного оборудования, то целесообразно решать эти задачи параллельно. Такой подход позволяет использовать существенную часть периода (<70 мс) на сбор и архивацию диагностических данных одновременно с выделением длительного времени на подготовку к пуску (<90 мс), что уменьшает необходимую мощность исполнительных подсистем.

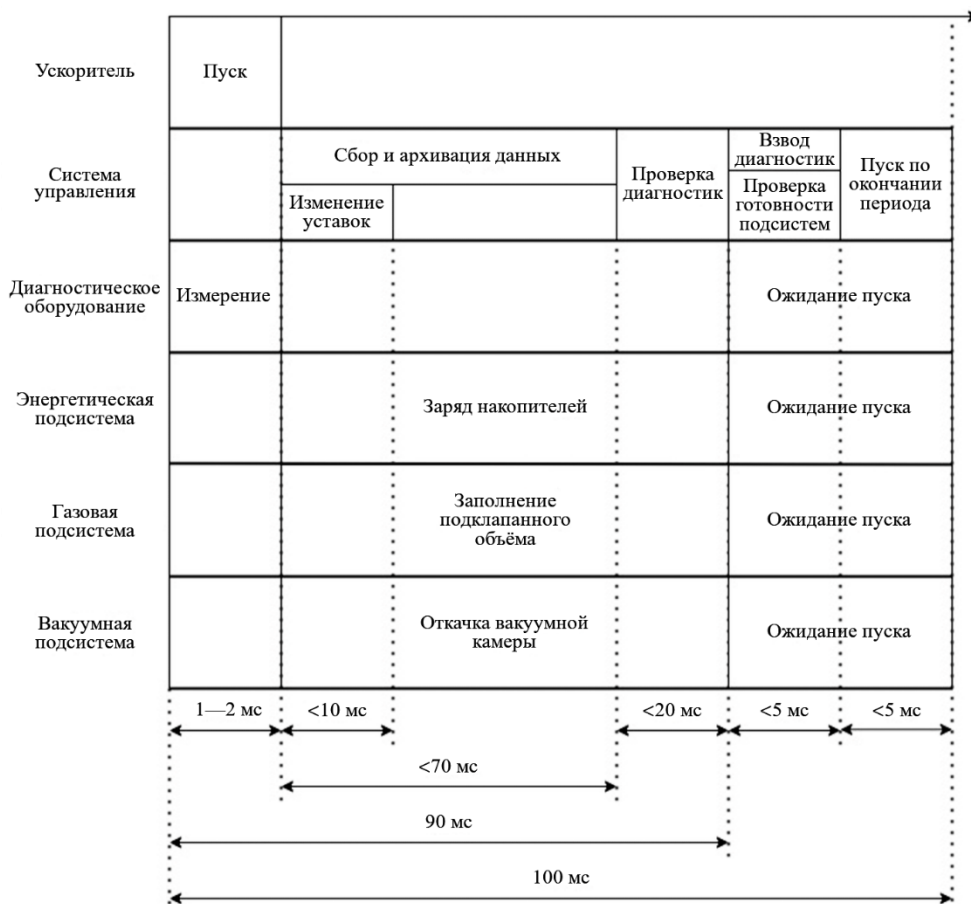


Рис. 3. Диаграмма задач системы автоматического управления между пусками ускорителя

За 10 мс до пуска необходимо проверить готовность исполнительных подсистем и взвести диагностическое оборудование. После выполнения этих операций САУ ожидает сигнала «Пуск», который поступает по окончании периода 100 мс.

#### 4. АРХИТЕКТУРА СИСТЕМЫ АВТОМАТИЧЕСКОГО УПРАВЛЕНИЯ

С учётом количества подсистем и наличия сложной диагностики при условии значительного потока данных для САУ КСПУ разработана архитектура, изображённая на рис. 4. В САУ выделены следующие элементы: ведущее устройство управления (ВУУ), подсистема безопасности, исполнительные подсистемы с собственными ведомыми устройствами управления — газовая, энергетическая и вакуумная, коммуникационная сеть с диагностическим оборудованием и архивами, а также рабочее место оператора. Она опирается на два принципа: распределённое управление и минимальная связность.

Распределённое управление заключается в том, что каждая исполнительная подсистема имеет собственное (локальное) устройство управления. В таком случае все операции регулирования и проверки состояния аппаратуры выполняются локальными устройствами управления. Это снижает уровень трафика и обеспечивает локализацию отказов отдельных элементов в рамках исполнительных подсистем.

Минимальная связность заключается в наличии единственного канала связи между каждой исполнительной или диагностической подсистемой и САУ. Время передачи сообщения от одного узла к другому становится более детерминированным, что реализуется при использовании сетевого оборудования, исключающего возможность коллизий. Отступление от принципа минимальной связности присутствует только в части подсистемы безопасности для обеспечения минимального времени отклика на аварию.

**Исполнительные подсистемы.** Однотипность структуры и возможность изоляции исполнительных подсистем позволяют САУ работать со всеми подсистемами одинаково, обмениваясь данными только с локальным ведомым устройством управления соответствующей подсистемы.

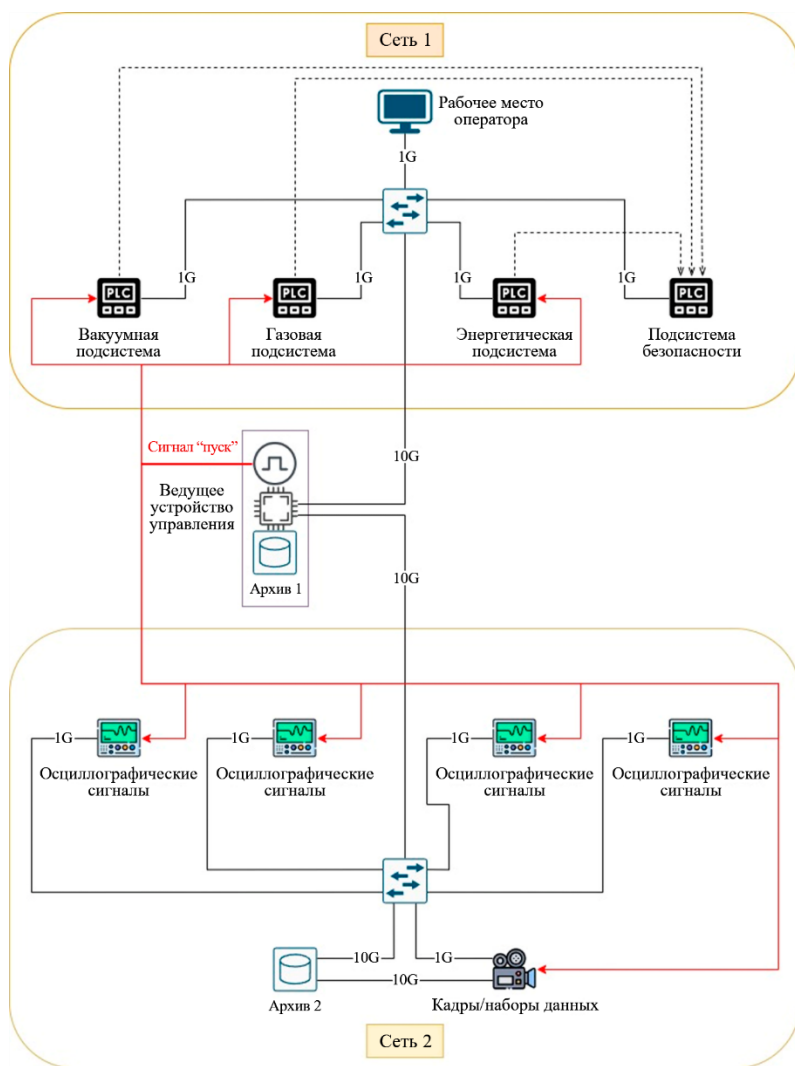


Рис. 4. Архитектура системы автоматического управления

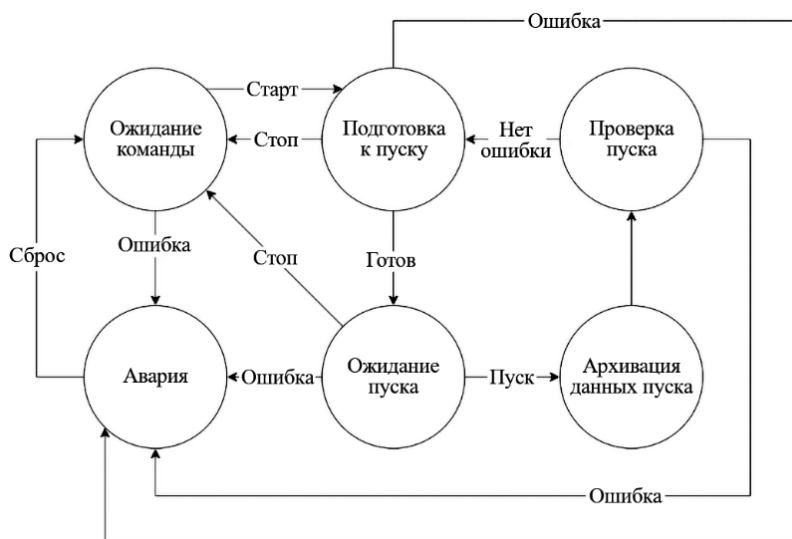


Рис. 5. Общий алгоритм работы подсистем

Общий алгоритм работы подсистем показан на рис. 5. Состояние «Ожидание команды» является исходным. В нём проводится проверка исправности оборудования подсистемы. В случае успеха на ВУУ по запросу передаётся статус об исправности. В противном случае происходит переход в состояние «Авария». Выход из аварийного состояния возможен по команде «Сброс» от ВУУ. По сигналу «Старт» от ВУУ подсистема переходит в состояние «Подготовка к пуску». Независимо от вида подсистемы в этом состоянии выполняется одинаковый процесс — воздействие на объект управления, пока не установится определённое его состояние с заданной точностью и за заданное время (например, для энергетической исполнительной подсистемы выполняется зарядка ёмкостного накопителя до установленного напряжения, что контролируется измерительными делителями напряжения накопителя). При невыполнении хотя бы одного условия происходит переход в состояние «Авария». Если подготовка к пуску завершилась успешно, то система переходит в состояние «Ожидание пуска», ведущему устройству управления отправляется статус «Готов». В состоянии ожидания подсистема поддерживает стационарное состояние объекта. Если оно начинает неконтролируемо изменяться, то система переходит в состояние «Авария». В состоянии «Авария» система формирует аварийный сигнал для подсистемы безопасности и возвращает САУ код ошибки, по которой произошла авария.

Общая синхронизация всех подсистем и исполнительных устройств производится командой

«Пуск», инициализирующий зажигание разряда в ускорителе. По этой команде подсистема переходит в состояние «Архивация данных пуска», потом в состояние «Проверка пуска». При успешном завершении

проверки пуска подсистема снова переходит в состояние «Подготовка к пуску». Если очередной пуск не нужен, то по сигналу «Стоп» от ВУУ подсистема переходит в состояние «Ожидание команды».

**Коммуникационная сеть.** Связь между элементами САУ организуется через коммуникационную сеть. В рамках распределённой архитектуры целесообразно создание двух подсетей на основе протокола Ethernet. В «Сеть 1» объединены исполнительные подсистемы, в «Сеть 2» объединены диагностические устройства и специализированный для сбора данных с камер «Архив 2», а общим узлом является ведущее устройство управления (см. рис. 4). Такой подход позволяет изолировать трафик диагностического оборудования, генерирующего большие объёмы данных. В подсети связи с исполнительными подсистемами (Сеть 1) передаётся малый объём данных. Это формируемые перед пуском данные — набор уставок, передаваемых к исполнительному оборудованию и определяющих условия пуска (менее 1 кБ), а также ответы от подсистем с их состоянием. Специальных требований к протоколу их передачи не предъявляется, а выбор сети Ethernet обусловлен возможностью использования оптоволоконных линий, не подверженных электромагнитным помехам.

В подсети с диагностическим оборудованием (Сеть 2) передаются данные, собираемые в каждом пуске ускорителя. Их объём можно оценить:

— для «осциллографических сигналов» по формуле

$$S_{\text{data}} = tFS_{\text{point}}; \quad (1)$$

— для «кадров/наборов данных» по формуле

$$S_{\text{data}} = tFRS_{\text{point}}, \quad (2)$$

где  $S_{\text{data}}$  — объём данных с одного канала, байт;  $t$  — длительность записи, с;  $F$  — частота дискретизации, Гц;  $R$  — размер кадра, пиксель;  $S_{\text{point}}$  — размер точки, байт.

Для расчёта использованы следующие значения:

— для осциллографа:  $t = 1$  мс,  $F = 10$  МГц,  $S_{\text{point}} = 8$  байт;

— для высокоскоростной камеры:  $t = 1$  мс,  $F = 0,1$  МГц,  $R = 480 \times 320$ ,  $S_{\text{point}} = 4$  байт.

Протокол передачи данных определяется используемым диагностическим оборудованием. Для оборудования типа «осциллографические сигналы» — это Ethernet 1G, для «кадры/наборы данных» — Ethernet 10G. Поток данных можно оценить по формуле

$$\text{DataFlow} = 8S_{\text{data}}F_{\text{shot}}, \quad (3)$$

где  $\text{DataFlow}$  — поток данных, бит/с;  $S_{\text{data}}$  — объём данных за один пуск, байт;  $F_{\text{shot}}$  — частота пусков, Гц.

Расчёт требуемого объёма памяти проводится по формуле

$$\text{MemorySize} = \frac{\text{DataFlow}_{\text{diag}}T}{8}, \quad (4)$$

где  $\text{MemorySize}$  — необходимый объём памяти для диагностики, байт;  $\text{DataFlow}_{\text{diag}}$  — поток диагностических данных, бит/с;  $T$  — время непрерывной работы, с.

Частота опроса принимается равной частоте пусков ускорителя. Размер сообщения  $i$ -й диагностики равен количеству данных, генерируемых этой диагностикой за один пуск. Общий поток данных и общий объём требуемой для их архивирования памяти приведены в таблице.

Необходимо гарантировать, что коммуникационная сеть справляется с задачей сбора данных за отведённое между пусками время. С помощью программы WireShark было измерено время передачи диагностических данных по пути «осциллограф—коммутатор—ЭВМ». Использовались следующие аппаратные средства: осциллограф — TiePie WS6-1000XM, который традиционно используется на КСПУ; коммутатор — TL-SG3428X; ЭВМ — ноутбук, оснащённый сетевой картой Realtek PCIe GbE Family Controller, процессором AMD Ryzen 7 5800U и оперативной памятью типа DDR4. Запись производилась без использования функции прямого доступа к памяти. Результаты измерений показывают, что для передачи данных одного «осциллографического сигнала» необходимо 2,2 мс. Библиотечное программное

обеспечение TiePie поддерживает только последовательный опрос, поэтому суммарное время сбора данных «осциллографических сигналов» для пяти каналов составляет 11,0 мс. Максимально за 70 мс можно собрать данные с 30 осциллографических каналов (требование проиллюстрировано на рис. 3).

**Потоки данных и требуемый объём памяти**

Диагностика	Тип протокола	Объём данных за пуск	Поток данных	Объём памяти, ГБайт
«Осциллографический сигнал» расхода газа	Ethernet 1G	80 кБ	6,4 Мбит/с	1,0
«Осциллографические сигналы» электрических параметров разряда	Ethernet 1G	160 кБ	12,8 Мбит/с	2,0
«Осциллографические сигналы» скорости плазменного потока по времяпролётной методике	Ethernet 1G	160 кБ	12,8 Мбит/с	2,0
«Кадры/наборы данных» скорости плазменного потока по эффекту Доплера	Ethernet 10G	59 МБ	4,6 Гбит/с	691,5
Итого		59,4 МБ	4,7 Гбит/с	697,0

Для диагностики типа «кадры/наборы данных» время передачи диагностических данных по протоколу Ethernet может быть рассчитано по формуле

$$t_3 = \frac{S_{\text{data}}}{k\text{Band}}, \quad (5)$$

где  $t_3$  — задержка передачи сообщения по протоколу Ethernet, с;  $S_{\text{data}}$  — количество данных за один пуск, байт;  $\text{Band}$  — номинальная скорость передачи протокола, байт/с;  $k$  — коэффициент, учитывающий количество служебной информации в протоколе, и составляет 67,4 мс при  $k = 0,7$ .

Оценка необходимой производительности коммутатора Сети 2 проводится по двум параметрам:  
— требуемая производительность каждого порта

$$C_k = \sum_i^n P_{ik} + \sum_j^n P_{kj}, \quad (6)$$

где  $C_k$  — производительность порта, бит/с;  $P_{ik}$  — трафик из  $i$ -го порта в  $k$ -й, бит/с;  $P_{kj}$  — трафик из  $k$ -го порта в  $j$ -й, бит/с;

— требуемая общая производительность коммутатора

$$B = \sum_{i,j}^n P_{ij}, \quad (7)$$

где  $B$  — общая производительность коммутатора, бит/с;  $P_{ij}$  — трафик из  $i$ -го порта в  $j$ -й, бит/с.

По результатам расчёта самым загруженным является порт 1, подключённый к ВУУ,  $C_1 = 36,1$  Мбит/с. Общая производительность коммутатора  $B = 36,1$  Мбит/с. Это невысокий уровень загрузки для современного сетевого оборудования.

Поскольку объём данных от «кадр/набор данных» на несколько порядков больше, чем у остального диагностического оборудования, то для него выделен отдельный Архив 2. Он представляет собой компьютер, оснащённый сетевой картой Ethernet 10G и набором жёстких дисков. Запись данных в архив происходит по пути сетевая карта—процессор—диск. Скорость записи на диск и шины сетевой карты значительно превышает скорость протокола Ethernet 10G, чтобы устранить её влияние на общую пропускную способность. Это обеспечивается за счёт использования дисков с интерфейсом NVMe (скорость записи до 7 Гбайт/с) и сетевой карты с шиной PCI-express 3,0×8 (пропускная способность до 8 Гбайт/с).

**Подсистема безопасности.** Аппаратно подсистема безопасности реализуется отдельно от остальной системы, что минимизирует время реакции на аварию и обеспечивает её наивысший приоритет в САУ. Устройством управления подсистемы является специальный программируемый логический контроллер безопасности (например, SAFETY PLC CPU SIEMENS 6ES7214-1AF40-0XB0), который обладает повышенной надёжностью за счёт самодиагностики и аппаратной избыточности [5]. При обнаружении аварийной ситуации контроллер отключает зарядное устройство энергетической подсистемы от источника питания и генерирует код ошибки о причине аварии. Вся САУ переводится в состояние «Блокировка», выход из которого возможен только по команде оператора.

Могут быть выявлены следующие аварийные ситуации. Во-первых, контроллер подключён к конечным выключателям, состояние которых показывает положение дверей и механических землителей. Если хотя бы один конечный выключатель находится в неправильном положении, на входе контроллера появляется аварийный сигнал.

Во-вторых, ведомое устройство управления каждой подсистемы имеет дискретный выходной аварийный сигнал. С помощью этого сигнала ведомое устройство управления оперативно оповещает подсистему безопасности об аварии.

В-третьих, подсистема безопасности оснащена модулями сбора данных с термодатчиков и измерителей энергопотребления. Модуль сбора данных архивирует измерения. Если измеренные значения превысят допустимый порог, модуль отправляет на вход контроллера сигнал об аварии.

В-четвёртых, ведущее устройство управления должно периодически оповещать контроллер подсистемы безопасности о том, что работа происходит в штатном режиме, иначе по переполнению таймера делается вывод об аварии по причине неисправности ВУУ.

**Ведущее устройство управления.** ВУУ координирует работу всей САУ. Это промышленный компьютер, оснащённый слотами PCI и PCI-Express (рис. 6).

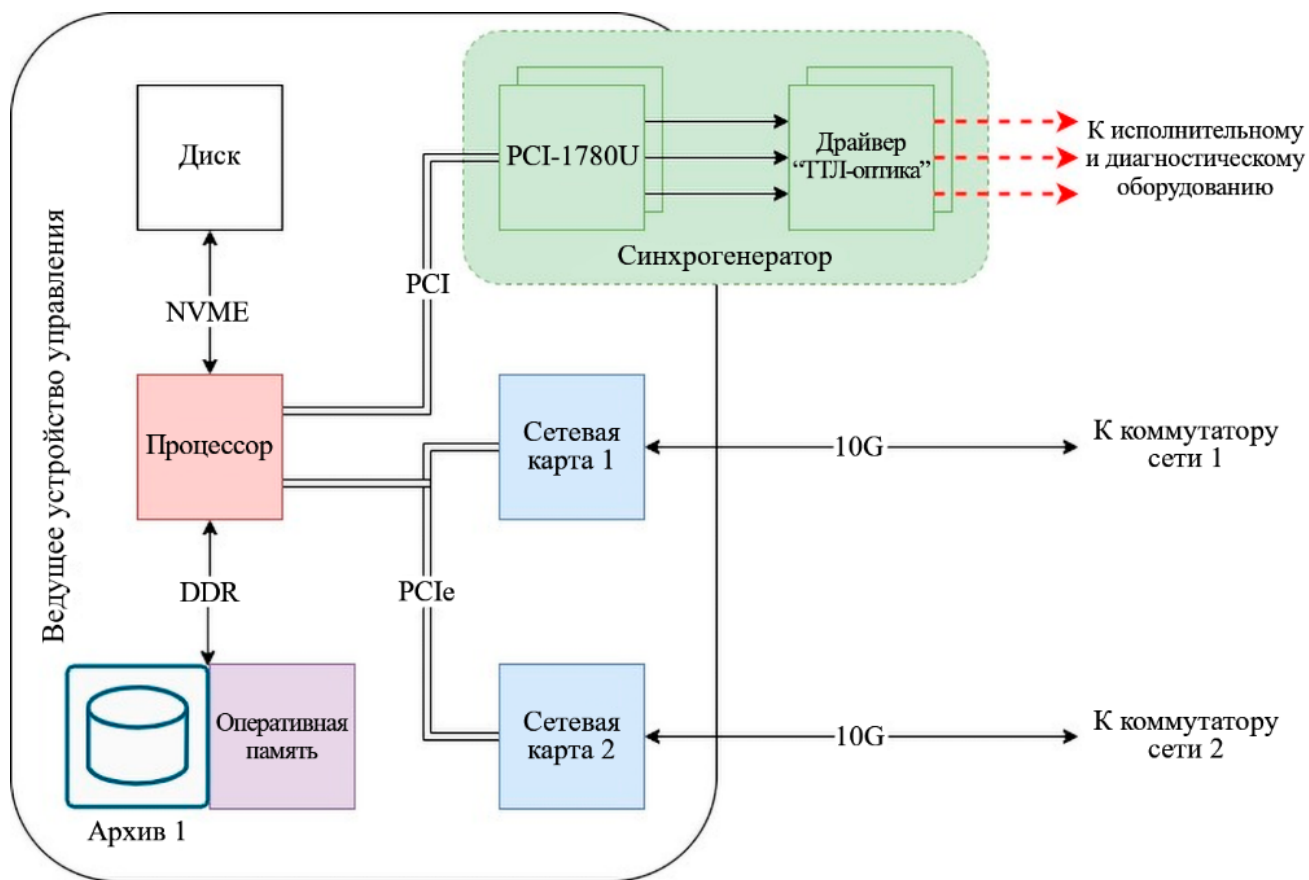


Рис. 6. Аппаратная реализация ведущего устройства управления

Одним из ключевых элементов является синхροгенератор, задача которого — выдавать сигналы «пуск» к подсистемам, исполнительному и диагностическому оборудованию, обеспечивая общую синхронность работы САУ. Синхροгенератор построен на базе плат таймеров-счётчиков PCI-1780U, установленных в слоты PCI ВУУ и способных генерировать ТТЛ-импульсы (импульсы транзисторно-транзисторной логики) с регулируемыми задержками. Для запуска синхροгенератора с нужной частотой (10 Гц) на процессоре настраивается таймер, по переполнению которого по шине PCI отправляется команда запуска. ТТЛ-импульсы преобразуются в оптические сигналы необходимой длительности, направляемые по оптоволокну к отдельным подсистемам и устройствам регистрации (см. рис. 4). На принимающей стороне выполняется обратное преобразование оптических сигналов в электрические с необходимыми для конкретных устройств характеристиками. Используются передатчики SFH757V и HFBR-1521Z и приёмники SFH250V и HFBR-2521Z, среда передачи — пластиковое оптическое волокно.

Сбор данных «осциллографических сигналов» производится в Архив 1, реализованный в оперативной памяти, поскольку в современном оборудовании запись в оперативную память происходит на порядок быстрее, чем на диск. Используемые версии DDR (до 70 Гбайт/с) и PCI-express (Gen 3,0×88 Гбайт/с) имеют большее быстродействие, чем Ethernet 10G, и не оказывают заметного влияния на скорость считывания диагностических данных. Данные из Архива 1 переносятся на диск только после завершения полного цикла эксперимента, длящегося около 20 мин.

Основная загруженность ВУУ происходит в состояниях «Переход» и «Стационар» для реализации импульсно-периодического режима. В соответствии с диаграммой задач САУ в режиме реального времени обеспечиваются взаимодействие с диагностическим и исполнительным оборудованием, управление синхροгенератором и проверка диагностических данных (рис. 7).

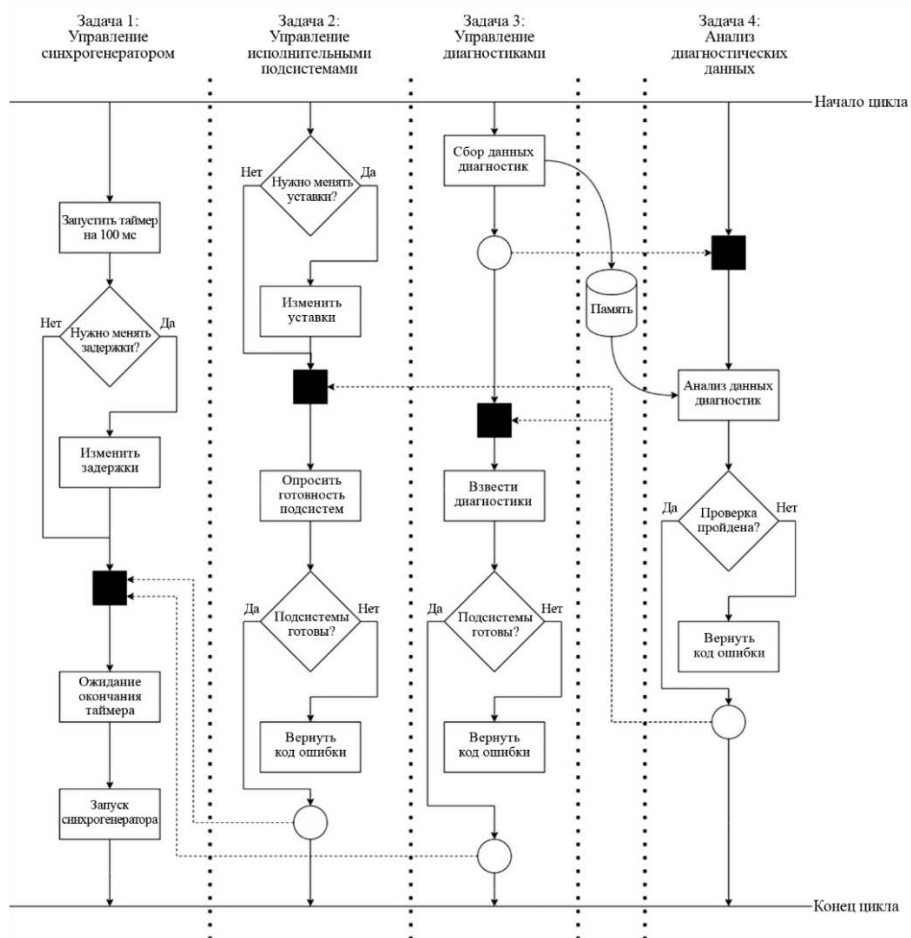


Рис. 7. Блок-схема выполнения периодических задач

Рассмотрим цикл, который начинается с выдачи сигнала «Пуск» и инициации разряда в ускорителе. В начале цикла взводится таймер для следующего сигнала «Пуск» (на 100 мс при частоте 10 Гц). Далее происходит «сбор данных диагностики» и «изменение уставок» исполнительных подсистем, если это необходимо. После загрузки диагностических данных в оперативную память задачи «управления диагностикой» и «управления исполнительными подсистемами» оказываются в заблокированном состоянии. Снимается блокировка с задачи «анализ диагностических данных». По результатам проверки принимается решение о следующем пуске. Если проверка завершилась без ошибки, то снимается блокировка с задач управления исполнительным и диагностическим оборудованием и проводится проверка готовности. Если всё оборудование готово, то снимается блокировка с задачи «управления синхрогенератором». По переполнению таймера происходит запуск синхрогенератора — выдаётся команда «Пуск» для инициации разряда и запуска нового цикла. Если какая-либо задача возвращает код ошибки (подсистемы не готовы или сообщают об аварии, диагностические данные некорректны), то происходит остановка работы цикла и вызывается обработчик прерываний, который отправляет всем подсистемам сигнал «стоп» и оповещает подсистему безопасности об аварии.

Задача взаимодействия с оператором выполняется в свободном режиме и заключается в том, чтобы передать оператору данные о состоянии эксперимента и интегральные параметры произведённых пусков. Обмен осуществляется по типу клиент-серверного приложения, при этом в качестве сервера выступает ВУУ, которое хранит в Архиве 1 интегральные параметры о всех произведённых пусках. На компьютере оператора (клиенте) выполняется приложение с графическим интерфейсом, которое позволяет отображать данные о пусках и общем состоянии системы и задавать параметры пусков (уставки подсистем).

**Анализ диагностических данных.** Важнейшей задачей работы в импульсно-периодическом режиме является контроль корректности произведённого пуска до старта следующего. Проверка заключается в сравнении формы сигналов тока и напряжения с образцом, задающим коридор допустимых значений (рис. 8), и вычислении интегральных параметров разряда. Выход осциллограммы за допустимые границы инициирует формирование сигнала ошибки и переход САУ в аварийный режим. Интегральные параметры импульса (рис. 9) необходимо определить для введения поправок в уставки исполнительного оборудования, прогнозирования поведения оборудования и передачи оператору. Длительность фронта импульса  $T_{front}$  и длительность импульса на

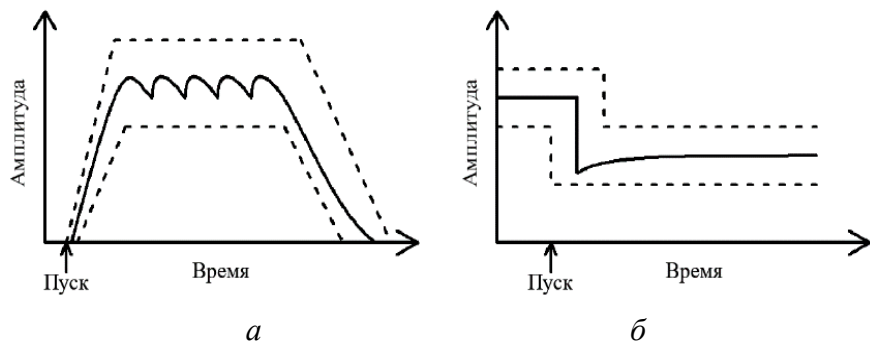


Рис. 8. Проверка формы импульса: *a* — для тока или напряжения; *б* — для расхода газа; — — анализируемая осциллограмма; - - - — образец

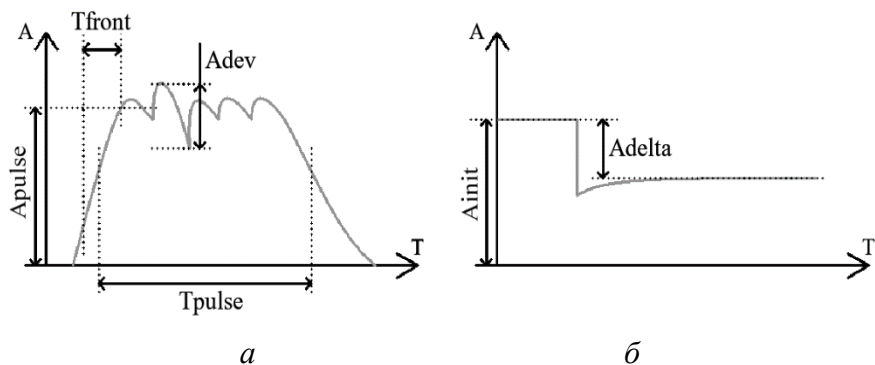


Рис. 9. Интегральные параметры импульса: *a* — для тока или напряжения; *б* — для расхода газа;  $A_{pulse}$  — усреднённая амплитуда импульса;  $A_{dev}$  — пульсации на вершине импульса;  $T_{front}$  — длительность фронта импульса;  $T_{pulse}$  — длительность импульса на половине амплитуды;  $A_{init}$  — давление газа в подклапанном объёме перед пуском;  $\Delta A$  — падение давления в подклапанном объёме после пуска (расход)

половине амплитуды  $T_{pulse}$  требуются для контроля срабатывания коммутаторов. Усреднённая амплитуда импульса  $A_{pulse}$  и пульсации на вершине импульса  $A_{dev}$  необходимы для контроля вкладываемой в разряд мощности. Давление газа в подклапанном объёме перед пуском  $A_{init}$  и падение давления после пуска  $A_{delta}$  требуются для измерения и поддержания заданного расхода газа. Необходимо гарантировать, что ВУУ справляется с задачей анализа данных за отведённое между пусками время. С использованием библиотеки «chrono» языка C++ измерено время выполнения прототипа функции проверки попадания осциллограммы внутрь коридора допустимых значений. Функция заключается в поэлементном сравнении значений точек измеренной осциллограммы с верхней и нижней границами образца. При частоте дискретизации 10 МГц и развёртке 1 мс одним «осциллографическим каналом» генерируется 10 000 точек. Экспериментальные измерения на ЭВМ, оснащённой процессором Intel-Core i7-875K и оперативной памятью DDR4 Kingston HyperX FURY Black, показали, что для массива из 10 000 элементов проверка занимает не более 30 мкс. Поскольку контроль пуска осуществляется по трём осциллограммам — ток разряда, напряжение разряда и расход газа, то для их последовательной проверки необходимо около 90 мкс. Это укладывается в требования к быстродействию.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана архитектура системы управления, сбора и архивации данных, обеспечивающая функционирование КСПУ в импульсно-периодическом режиме. Эксплуатация стенда КСПУ в импульсно-периодическом режиме требует контроля по результатам каждого пуска, поскольку в разряд вкладывается высокая мощность, и в случае нештатной ситуации есть риск выхода оборудования из строя. Также собираемые в пуске данные требуют комплексной обработки. Исходя из этого, САУ выполняет следующие ключевые задачи: контроль безопасности, сбор и архивация данных, принятие решения о следующем пуске.

В САУ выделены следующие элементы: ведущее устройство управления, подсистема безопасности, исполнительные подсистемы с собственными ведомыми устройствами управления — газовая, энергетическая и вакуумная, коммуникационная сеть с диагностическим оборудованием и архивами, а также рабочее место оператора. В основу архитектуры заложены два принципа: распределённое управление и минимальная связность. Исполнительные подсистемы установки — газовая, энергетическая и вакуумная могут быть изолированы, а их оборудование и датчики могут контролироваться локальным ведомым устройством управления. При этом ведомые устройства управления взаимодействуют с ведущим устройством управления по единому типовому алгоритму. Таким образом, распределённое управление позволяет отстранить ведущее устройство управления от рутинных операций и направить его вычислительную мощность на задачи более высокого уровня: проверка диагностических данных, подстройка уставок. Также распределённое управление позволяет сократить количество линий связи.

Минимальная связность архитектуры заключается в том, что все элементы САУ имеют единственную связь друг с другом. Это делает систему более понятной при эксплуатации и отладке. Существование единственного пути передачи данных от диагностического оборудования и от исполнительных подсистем к ведущему устройству управления делает время передачи данных в сети более детерминированным. Разделение коммуникационной сети на две подсети позволяет проводить настройку исполнительных подсистем и сбор диагностических данных независимо друг от друга.

Проведены испытания ключевой (с точки зрения быстродействия системы) задачи САУ — выполнения последовательности сбора и анализа данных диагностик. Показано, что результаты минимального диагностического набора «осциллографических каналов» (ток и напряжение разряда, расход газа) могут быть собраны за 11 мс и проанализированы менее чем за 1 мс, сбор «кадров/наборов данных» (дуплексная диагностика скорости плазменного потока) может быть осуществлён за 68 мс. В приведённой архитектуре максимально анализируемое число осциллографических каналов 30, что ограничено последовательным сбором данных осциллографов TiePie.

Полученные результаты демонстрируют возможность обеспечить работу КСПУ в импульсно-периодическом режиме с частотой до 10 Гц в разработанной архитектуре САУ с типовым аппаратным обеспечением.

Работа выполнена по государственному контракту № Н.4к.241.09.23.1062 от 19.04.23 на выполнение научно-исследовательской и опытно-конструкторской работы «Создание прототипов плазменных ракетных двигателей с повышенными параметрами тяги и удельного импульса. Этап 2023—2024 годов», кроме подраздела «Анализ диагностических данных», который выполнен при поддержке Российского научного фонда по проекту № 23-29-00265 от 27.01.23.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Ильгисонис В.И., Ильин К.И., Новиков С.Г., Оленин Ю.А.** О программе российских исследований в области управляемого термоядерного синтеза и плазменных технологий. — Физика плазмы, 2021, т. 47, № 11, с. 963—969.
2. **Морозов А.И.** Принципы коаксиальных (квази) стационарных плазменных ускорителей (КСПУ). — Физика плазмы, 1990, т. 16, № 2, с. 131—146.
3. **Климов Н.С. и др.** Экспериментальное исследование интегральных характеристик потока плазмы и разряда квазистационарного сильноточного плазменного ускорителя с собственным магнитным полем. — ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2019, т. 42, № 3, с. 52—63.
4. **Безопасность** функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов. Часть 1. Термины, определения и технические требования. ГОСТ Р МЭК 61511-1-2018. Утвержден и введен в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 8 августа 2018 г. № 466-ст.
5. **Hiroo Kanamaru, Tsuyoshi Mogi, Naoki Aoyama.** Functional safety application using safety PLC. — In: SICE Annual Conference. Takamatsu, Japan, 2007, p. 2489—2492; doi: 10.1109/SICE.2007.4421408.

АО «ГНЦ РФ ТРИНИТИ», 108840, Москва, Троицк, ул. Пушкиных, д. 12, Россия



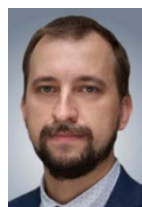
Антон Андреевич Мамонов, м.н.с.  
mamonov@triniti.ru



Константин Михайлович Гуторов,  
научный консультант проекта,  
к.ф.-м.н.  
gutorovkm@triniti.ru



Александр Вадимович Лазукин,  
заместитель директора отделения —  
начальник лаборатории, к.ф.-м.н.  
lazukin\_av@mail.ru



Николай Сергеевич Климов,  
директор по науке и стратегии —  
директор отделения, к.ф.-м.н.  
klimov@triniti.ru

Статья поступила в редакцию 24 сентября 2024 г.

После доработки 9 октября 2024 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 111—123.

## ПРИМЕНЕНИЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЯ СТОКВЕЛЛА ДЛЯ АНАЛИЗА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ МГД-ДИАГНОСТИКИ В ТОКАМАКЕ

*Н.В. Иванов, А.М. Какурин*

*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Продemonстрировано использование расчётного алгоритма на основе преобразования Стоквелла для анализа экспериментальных данных МГД-диагностики в токамаке. Показана возможность применения данного метода для анализа динамики мультимодовой тиринг-неустойчивости, в частности, для очистки сигналов от паразитных шумов, анализа динамики составляющих исходного многокомпонентного сигнала, время-частотного анализа перекрёстной фазовой корреляции сигналов датчиков и определения пространственной структуры отдельной составляющей МГД-возмущения.

**Ключевые слова:** токамак, плазма, МГД-диагностика, тиринг-неустойчивость, спектрограмма, время-частотное представление, S-преобразование.

## APPLICATION OF THE STOCKWELL TRANSFORM FOR ANALYSIS OF THE TOKAMAK MHD DIAGNOSTICS EXPERIMENTAL DATA

*N.V. Ivanov, A.M. Kakurin*

*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The application of the computational algorithm based on the Stockwell transform for the analysis of the MHD diagnostics experimental data in a tokamak is presented. The utilization of this method to analyze the dynamics of multimode tearing instability is demonstrated, in particular to de-noise the signals of the magnetic sensors, to analyze the dynamics of the specific elements of the initial multicomponent signal, as well as the cross-phase correlation of signals from various sensors and to determine the spatial structure of a separate component of the MHD perturbation.

**Key words:** tokamak, plasma, MHD diagnostics, tearing instability, spectrogram, time-frequency representation, S-transform.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное исследование магнитогидродинамических (МГД) явлений в установках токамак, в частности тиринг-неустойчивости, обычно базируется на анализе эволюции возмущений полоидального магнитного поля вблизи границы плазмы. Возмущения полоидального магнитного поля регистрируются с помощью набора датчиков, распределённых вдоль полоидального угла  $\theta$  и тороидального угла  $\varphi$ . Начиная с работы [1], прогресс в развитии этой методики в основном проходил по пути совершенствования процедуры обработки сигналов магнитных датчиков для получения данных о пространственной и временной структурах МГД-возмущений.

Пространственная структура этих возмущений обычно представляет собой суперпозицию полей отдельных МГД-мод, различающихся значениями полоидального  $m$  и тороидального  $n$  волновых чисел. В простейшем варианте идентификация набора мод с разными волновыми числами осуществляется путём пространственного разложения Фурье. Однако из-за особенностей пространственной структуры токамака, связанных с её тороидальностью и возможной некруглой формой поперечного сечения плазменного шнура, простое разложение МГД-возмущений по цилиндрическим гармоникам Фурье с разными полоидальными волновыми числами не является универсальным с точки зрения плазмофизической интерпретации её результатов. Кроме того, совместное применение пространственного преобразования

Фурье с преобразованием Фурье, отображающим временную область в частотную, встречается с трудностями при анализе нестационарной эволюции МГД-мод. Поэтому совершенствование методики обработки сигналов магнитных датчиков является необходимым путём развития МГД-диагностики на установках токамак [2—7].

Одной из возможностей выделения из сигналов магнитных датчиков частотных составляющих, связанных с отдельными МГД-модами, частоты которых зависят от волновых чисел, скоростей вращения плазмы и от пространственно-резонансных магнитных полей [8, 9], является использование при обработке зондовых сигналов время-частотных представлений [6, 7, 10, 11]. Эти представления позволяют на плоскости время—частота получить траектории частотных составляющих, связанных с отдельными пространственными МГД-модами. При этом в рамках время-частотного представления возможны фильтрация сигналов и подавление паразитных шумов.

Для исследования нестационарных сигналов были разработаны методы время-частотного анализа [10, 11]. В частности, с этой целью Д. Габор предложил использовать оконное преобразование Фурье с гауссовым окном, результат которого получил название спектрограммы [12]. Недостатком этого метода для анализа нестационарных сигналов является применение временного окна постоянной ширины, что не позволяет получать наилучшее время-частотное разрешение совместно в областях высоких и низких частот. Эта проблема была решена разработкой Ж. Морле с коллегами непрерывного вейвлет-преобразования, имеющего адаптивное по частоте гауссово окно во времени [13], что оптимизировало время-частотное разрешение как на высоких, так и на низких частотах. Однако при вейвлет-преобразовании получается только относительная фазовая информация, связанная с текущей координатой временного окна, тогда как оконное преобразование Фурье даёт фазовую информацию, привязанную к началу временной реализации анализируемого сигнала.

В работах [14, 15] Р. Стоквелл с коллегами предложили методику обработки нестационарных сигналов, сочетающую достоинство оконного преобразования Фурье, при котором сохраняется абсолютная привязка фазы к началу сигнала, с применением адаптивного временного окна, как при вейвлет-преобразовании. Эта методика, основанная на так называемом S-преобразовании (S-transform), используется для анализа нестационарных процессов, в частности, геофизических явлений. Данная работа посвящена применению S-преобразования для обработки сигналов МГД-диагностики в токамаке.

## 2. ПРЕОБРАЗОВАНИЕ СТОКВЕЛЛА

Выражение для результата S-преобразования исходного сигнала  $u(t)$  представляет собой комплексную функцию переменных времени  $t$  и частоты  $f$ , являющихся координатами на двумерной время-частотной плоскости. Этот результат имеет вид спектрограммы с адаптивным гауссовым окном во времени, ширина которого уменьшается с увеличением частоты. Для оптимизации временного и частотного разрешения были предложены различные модификации формулы, определяющей зависимость ширины гауссова окна от частоты [14—22]. В данной работе использовано модифицированное S-преобразование (MST — Modified S-transform) [17, 18]:

$$S(t, f) = \frac{|f|}{\sqrt{2\pi}(k+h|f|)} \int_{-\infty}^{\infty} u(\tau) \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{|f|(\tau-t)}{k+h|f|} \right)^2 \right] \exp(-i2\pi f\tau) d\tau. \quad (1)$$

В результате преобразования (1) получается комплексная функция, модуль которой содержит информацию о время-частотном распределении амплитуды исходного сигнала, а её аргумент — о распределении фазы. Использование адаптивного окна обеспечивает оптимизацию время-частотного разрешения исходного сигнала  $u(t)$  в широком диапазоне его частот. Оптимизация результата осуществляется путём выбора значений параметров  $k$  и  $h$ . Для низких частот параметр  $k > 0$  определяет число периодов колебаний во временном окне, в результате чего частотное разрешение улучшается с увеличением  $k$ . Параметр  $h > 0$  добавлен в формулу (1) для улучшения частотного разрешения на высоких частотах. При этом выбор более высоких значений параметров  $k$  и  $h$  приводит к соответствующему ухудшению

временного разрешения. Для постоянной частоты  $f_0$  одномерная комплексная функция времени  $S(t, f_0)$  показывает, как амплитуда и фаза составляющей исходного сигнала на этой частоте изменяются во времени. Для фиксированного момента времени  $t_0$  одномерная функция частоты  $S(t_0, f)$  демонстрирует мгновенную форму спектра нестационарного сигнала.

При необходимости исходная нестационарная одномерная функция  $u(t)$  может быть восстановлена из её двумерного время-частотного представления  $S(t, f)$ . Соотношение между  $S(t, f)$  и спектром Фурье  $U(f)$  исходной функции  $u(t)$  имеет вид [14]

$$U(f) = \int_{-\infty}^{\infty} S(t, f) dt. \quad (2)$$

Из выражения (2) следует, что обратное S-преобразование определяется выражением

$$u(t) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \int_{-\infty}^{\infty} S(t, f) dt \right] \exp(i 2\pi f t) df. \quad (3)$$

Следует отметить, что, хотя время-частотное распределение  $S(t, f)$  зависит от параметров  $k$  и  $h$ , результат его интегрирования (2) не зависит от этих параметров, поскольку они входят в интеграл в правой части (2) в составе множителя  $\int_{-\infty}^{\infty} \frac{|f|}{\sqrt{2\pi(k+h|f|)}} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{|f|(\tau-t)}{k+h|f|}\right)^2\right] dt$ , равного единице.

В практических условиях при обработке данных МГД-диагностики анализируется сигнал магнитного датчика, дискретизированный с помощью аналого-цифрового преобразователя. Обычно частота дискретизации  $f_s$  выбирается аппаратным способом для каждого конкретного случая в зависимости от рассматриваемого частотного диапазона. В результате дискретизации из зависимости  $S(t, f)$  получается матрица MST-M с комплексными элементами. В соответствии с числом элементов дискретного сигнала матрица состоит из  $N$  столбцов и  $N/2 + 1$  строк, определяющих диапазон изменения частоты от нуля до частоты Найквиста  $f_n = f_s/2$  [23]. Число элементов дискретного сигнала  $N$  равно произведению продолжительности рассматриваемого процесса и частоты дискретизации. При выборе частоты дискретизации учитывается, что соответствующая частота Найквиста должна превышать максимальную частоту рассматриваемого сигнала. При вычислениях для всех примеров, приведённых в данной работе, были выбраны значения параметров оптимизации  $k = 1$  и  $h = 15/f_s$ .

**Время-частотная фильтрация.** Отображение с помощью S-преобразования одномерного сигнала на двумерную плоскость позволяет осуществлять время-частотную фильтрацию. С этой целью на время-частотной плоскости задаются области, каждая из которых включает в себя одну или несколько траекторий частот анализируемого многокомпонентного сигнала.

Для удаления выбранной составляющей из исходного многокомпонентного сигнала в соответствующей ему матрице MST-M приравниваются к нулю все элементы, принадлежащие области, которая включает в себя удаляемую составляющую. Выполнение обратного S-преобразования для полученной таким образом изменённой матрицы позволяет восстановить многокомпонентный сигнал, из которого удалена выбранная составляющая.

В противоположном варианте, чтобы сохранить выбранную составляющую и удалить все остальные составляющие, в матрице MST-M приравниваются к нулю все элементы, которые не входят в область, содержащую выбранную составляющую. Обратное S-преобразование даёт зависимость от времени выбранной составляющей. Отметим, что в некоторых работах для время-частотной фильтрации используется модифицированный вариант обратного S-преобразования [24—26].

**Очистка сигнала от шума.** Рассмотрим анализируемый сигнал  $u(t)$ , состоящий из полезной составляющей  $u_1(t)$  и паразитного шума  $u_2(t)$ :

$$u(t) = u_1(t) + u_2(t). \quad (4)$$

Эти обозначения сигнала и его составляющих относятся к данному разделу. Как будет указано в последующих разделах, в некоторых случаях там рассматриваются другие составляющие анализируемых сигналов и вводятся соответствующие обозначения.

Допустим, что полезная составляющая сигнала присутствует не во всём рассматриваемом промежутке времени, характеристики шума постоянны во времени и уровень шума не превышает уровень полезного сигнала. При таких условиях для улучшения отношения сигнал/шум можно воспользоваться методом пороговой фильтрации сигнала. Этот метод был сначала разработан для вейвлет-преобразования [27—29] и распространён на случай S-преобразования в работе [30].

Благодаря линейности S-преобразования каждый элемент матрицы MST-M, полученной в результате дискретного представления зависимостей  $u(t)$  и  $S(t, f)$ , состоит из двух слагаемых, которые получаются из результатов преобразования функций  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ . Для каждой строки матрицы MST-M во временном интервале, который содержит только составляющую  $u_2(t)$ , действительные и мнимые части элементов матрицы используются по отдельности для вычисления соответствующих зависящих от частоты пороговых значений уровня сигнала:

$$\lambda(f) = \sigma \sqrt{2 \ln(N_2)}, \quad (5)$$

где  $\sigma$  — среднеквадратичное отклонение, полученное для  $N_2$  элементов каждой строки матрицы MST-M во временном окне, где  $u_1 = 0$ .

Полученные значения  $\lambda(f)$  применяются для пороговой фильтрации элементов каждой строки матрицы MST-M во всём рассматриваемом интервале времени. При этой обработке все действительные и мнимые части элементов матрицы MST-M, не превышающие соответствующих значений  $\lambda$ , полагаются равными нулю. Остальные элементы матрицы сохраняются неизменными. Исправленная таким образом матрица определяет результат S-преобразования для сигнала, частично очищенного от шумовой составляющей  $u_2(t)$ . Выполняя для этого результата обратное S-преобразование, получаем сигнал, подвергнутый пороговой фильтрации.

**Пространственная структура составляющей МГД-возмущения.** Использование процедур время-частотной фильтрации и очистки от шума позволяет выделить составляющие с одинаковыми частотами из многокомпонентных сигналов от датчиков МГД-диагностики, размещённых вблизи границы плазмы в различных положениях по полоидальному и тороидальному углам. Из этих составляющих строятся угловые распределения в полоидальном и тороидальном направлениях возмущений магнитного поля в выбранные моменты времени. В построенных пространственных распределениях число периодов колебаний, укладывающихся в пределы изменения полоидального и тороидального углов на  $2\pi$ , показывает значения волновых чисел  $m$  и  $n$  соответственно.

Для наглядной иллюстрации формы углового распределения выбранной составляющей сигналов магнитных датчиков удобно использовать представление сигналов в полярной системе координат. Для перехода в полярную систему координат к каждому значению сигнала в угловом распределении прибавляется искусственно выбранная фиксированная добавка, перемещающая распределение в положительную область по значениям сигнала. При этом структура возмущения поля в заданный момент времени строится с использованием интерполяции значений сигналов датчиков.

**Время-частотный анализ взаимной фазовой корреляции сигналов.** Сигнал каждого магнитного датчика МГД-диагностики на установке токамак обычно представляет собой совокупность составляющих с нестационарными частотами и амплитудами. При этом сигналы отдельных датчиков, размещённых в разных пространственных положениях у границы плазмы, сохраняют стабильность разности фаз для каждой пространственной гармоники МГД-возмущения. Поэтому в число основных процедур обработки данных МГД-диагностики входит анализ фазовой корреляции сигналов таких датчиков. Анализ может базироваться на S-преобразовании, поскольку при S-преобразовании сохраняется информация о фазе сигнала при изменениях текущего положения и ширины адаптивного гауссова окна во времени.

Рассмотрим сигналы двух магнитных датчиков, которые в данном разделе будут обозначены  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ . Для нахождения в этих сигналах когерентных составляющих используем перекрёстное S-преобразование (Cross-S-transform)  $C_s(t, f)$  [31], равное произведению результата S-преобразования  $S_1(t, f)$  одного из двух сигналов и комплексно сопряжённого значения результата S-преобразования  $S_2(t, f)$  другого сигнала:

$$C_s(t, f) = C_1(t, f) \{C_2(t, f)\}^* . \quad (6)$$

Модуль результата перекрёстного S-преобразования  $|C_s(t, f)|$  несёт информацию о время-частотном распределении произведения амплитуд когерентных составляющих сигналов  $u_1(t)$  и  $u_2(t)$ . Аргумент перекрёстного S-преобразования, равный

$$\arg C_s(t, f) = \arg S_1(t, f) - \arg S_2(t, f), \quad (7)$$

даёт время-частотное распределение разности фаз когерентных составляющих этих сигналов.

### 3. ПРИМЕРЫ ОБРАБОТКИ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ СИГНАЛОВ МГД-ДИАГНОСТИКИ В ТОКАМАКЕ Т-10

Для иллюстрации использования S-преобразования рассмотрим пример обработки сигналов МГД-диагностики в токамаке Т-10, имеющем круглое поперечное сечение плазменного шнура. Следует отметить, что, по нашему мнению, использование S-преобразования для анализа МГД-сигналов в токамаке с вытянутым сечением плазмы также может быть перспективным. В Т-10 источником сигналов является набор из 24 датчиков полоидального магнитного поля с одинаковыми амплитудно-частотными и фазочастотными характеристиками, размещённых у границы плазмы в одном её поперечном сечении и равномерно распределённых вдоль полоидального угла  $\theta$ . Комплекс МГД-диагностики в токамаке Т-10 не содержит набора магнитных датчиков с одинаковыми характеристиками, распределённых вдоль большого обхода тора.

**Динамика разряда и МГД-активности.** Для анализа МГД-активности в токамаке Т-10 с помощью преобразования Стоквелла выбран разряд токамака со сложной динамикой МГД-активности, показанной на рис. 1. Изменения характера МГД-активности достигались воздействием на плазму электронно-циклотронного нагрева (ЭЦН), который включался в момент времени  $t = 0,455$  с от начала разряда, и изменением во времени величины тока плазмы. Ток плазмы линейно возрастал в промежутке времени от  $t = 0,55$  с до  $t = 0,57$  с. При этом коэффициент запаса устойчивости на границе плазмы менялся в пределах от  $q(a) = 3,1$  до  $q(a) = 2,6$ .

На рис. 1 представлены зависимости от времени тока плазмы  $I_p$ , сигнала одного из датчиков МГД-диагностики  $u(t)$  и модуля его время-частотного распределения, полученного с помощью S-преобразования. ЭЦН включался в момент времени, который отмечен на рис. 1,  $a$ , и продолжался в течение всего интервала времени возрастания тока плазмы. Зависимости даны в трёх различных временных промежутках: всего разряда токамака, в более узком временном промежутке, начинающемся перед включением ЭЦН, и во временном интервале возрастания тока плазмы. На рис. 1 видно, что модификация условий разряда приводит к изменениям амплитуды сигнала магнитного датчика и к усложнению его время-частотного распределения, особенно в интервале времени возрастания тока.

**Результаты время-частотной фильтрации сигналов датчиков.** Характер изменения МГД-активности после включения электронно-циклотронного нагрева иллюстрируется на рис. 2, где показаны зависимости от времени сигнала магнитного датчика и модуля его время-частотного распределения. На этой стадии разряда токамака изменение МГД-активности проявляется в развитии дополнительной более высокочастотной (ВЧ) составляющей сигнала магнитного датчика с частотой в области 9—11 кГц при сохранении низкочастотной (НЧ) составляющей с частотой, приблизительно равной 6 кГц.

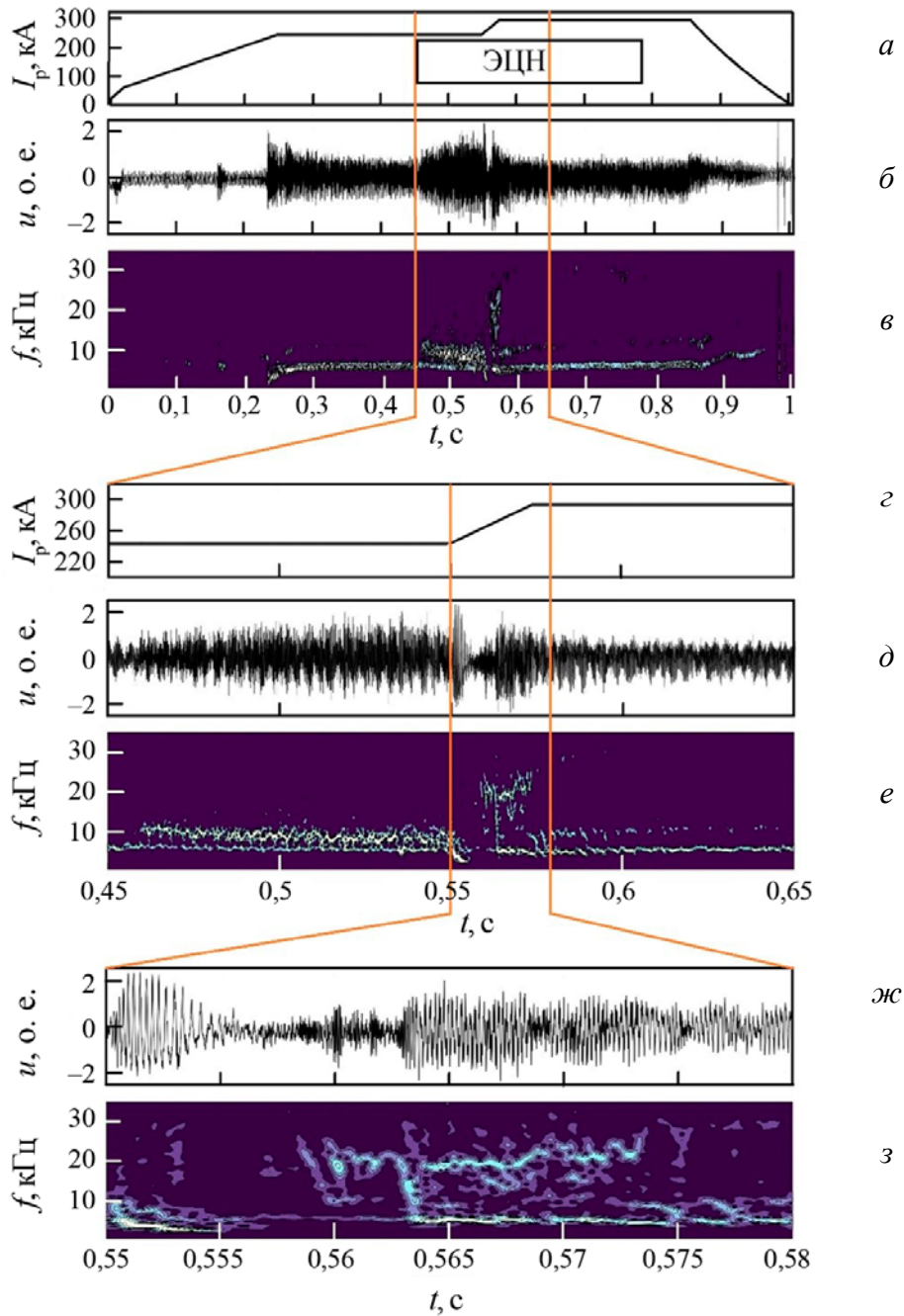


Рис. 1. Динамика МГД-активности в разряде с ЭЦН и возрастанием тока плазмы: *а* — ток плазмы  $I_p$ ; *б* — сигнал магнитного датчика  $u(t)$ ; *в* — модуль время-частотного распределения  $|S(t, f)|$  сигнала датчика в течение всего разряда токамака; *г*, *д*, *е* — те же зависимости в более коротком промежутке времени, включающем периоды ЭЦН и возрастания тока плазмы; *ж* — сигнал магнитного датчика  $u(t)$ ; *з* — модуль время-частотного распределения этого сигнала  $|S(t, f)|$  в период возрастания тока плазмы.

Для выделения с помощью время-частотной фильтрации по отдельности ВЧ- и НЧ-составляющих сигнала выбраны показанные на рис. 2, *б* области  $z_1$  и  $z_2$ , каждая из которых включает в себя соответствующую составляющую. На рис. 2, *в* представлен модуль время-частотного распределения выделенной ВЧ-составляющей. Временная реализация выделенной ВЧ-составляющей  $u_{\text{ВЧ}}$  показана на рис. 2, *г*. Полоидальное распределение ВЧ-составляющей сигналов датчиков МГД-диагностики показано на рис. 2, *ж*. Для НЧ-составляющей модуль время-частотного распределения, выделенный сигнал магнитного датчика и мгновенное полоидальное распределение сигналов датчиков представлены на рис. 2, *д*, *е*, *з*.

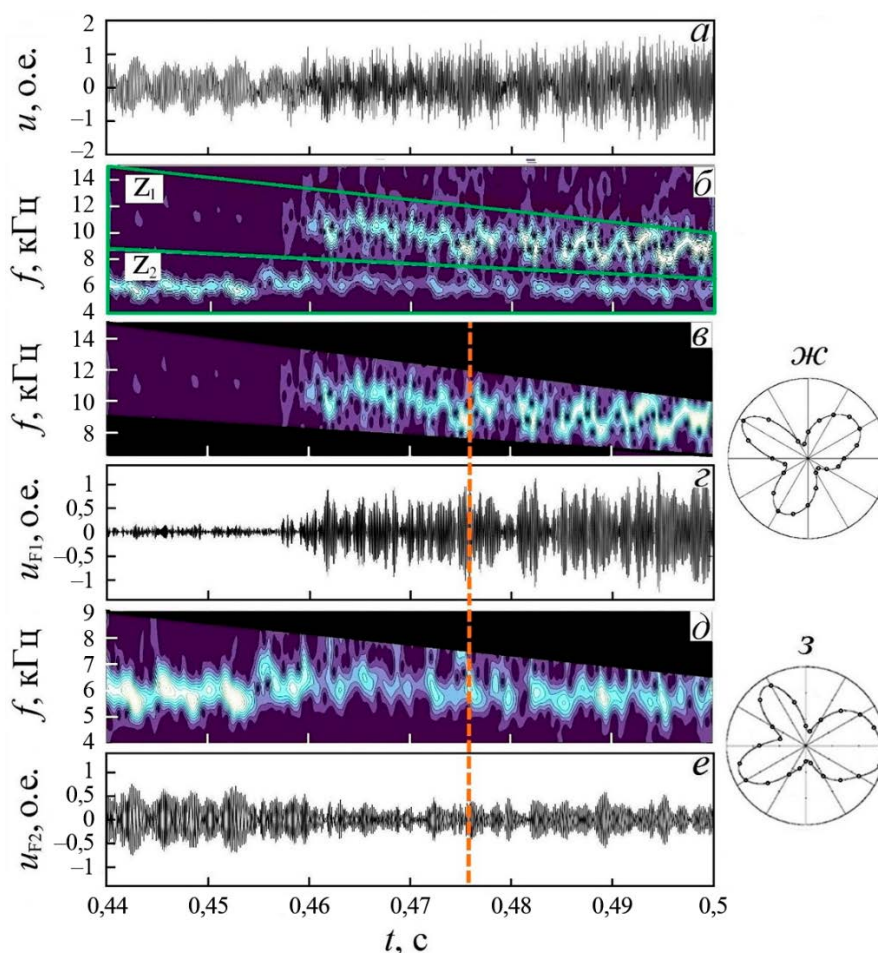


Рис. 2. Анализ влияния ЭЦН на МГД-активность: *a* — сигнал магнитного датчика; *b* — модуль время-частотного распределения сигнала; *в* — модуль время-частотного распределения сигнала в области  $z_1$ ; *г* — ВЧ-составляющая сигнала  $u_{F1}$ , выделенная по области фильтрации  $z_1$ ; *д* — модуль время-частотного распределения сигнала в области  $z_2$ ; *е* — НЧ-составляющая сигнала  $u_{F2}$ , выделенная по области фильтрации  $z_2$ ; *ж* — полоидальное распределение ВЧ-составляющих сигналов датчиков в момент времени, показанный вертикальной пунктирной линией на рис. 2, *в*, *г*; *з* — полоидальное распределение НЧ-составляющих сигналов датчиков в момент времени, показанный вертикальной пунктирной линией на рис. 2, *д*, *е*

Пространственные распределения изображены в полярных системах координат. Они соответствуют моментам времени, отмеченным на рисунке вертикальными пунктирными линиями. Формы этих распределений являются типичными для интервала времени, приведённого на рис. 2. Обе составляющие магнитного возмущения с разными частотами имеют пространственную структуру, соответствующую значению полоидального волнового числа  $m = 3$ . Такое же полоидальное волновое число получается при анализе возмущения до включения ЭЦН.

Одновременное присутствие двух составляющих возмущения магнитного поля с одинаковыми значениями полоидального волнового числа  $m = 3$  и различными частотами, вероятно, объясняется тем, что МГД-моды, соответствующие этим составляющим, имеют различные тороидальные волновые числа  $n = 1$  и  $n = 2$ . Естественно предположить, что эти МГД-моды связаны с магнитными островными структурами, расположенными в плазме в окрестностях разных магнитных поверхностей. Частота каждой МГД-моды определяется значениями соответствующих волновых чисел и угловыми скоростями её вращения в полоидальном и тороидальном направлениях.

На рис. 3 показано время-частотное распределение сигнала магнитного датчика в интервале времени, в котором наряду с ЭЦН происходит увеличение тока плазмы, показаны области  $z_3$ ,  $z_4$ ,  $z_5$  и  $z_6$ , выбранные для выделения с помощью время-частотной фильтрации составляющих суммарного сигнала.

На рис. 4—7 показаны результаты анализа составляющих сигнала, выделенных во время-частотных областях  $z_3$ ,  $z_4$ ,  $z_5$  и  $z_6$  соответственно.

Как показал анализ пространственных распределений составляющих сигналов датчиков, распределение возмущения для время-частотной области  $z_3$  соответствует полоидальному волновому числу  $m = 3$ , а для областей  $z_4$ ,  $z_5$  и  $z_6$  соответствует  $m = 8$ ,  $m = 5$  и  $m = 7$ . На рис. 4—7 видно, что в процессе роста тока плазмы происходят изменения частот выделенных составляющих МГД-моды без изменений их полоидальных волновых чисел.

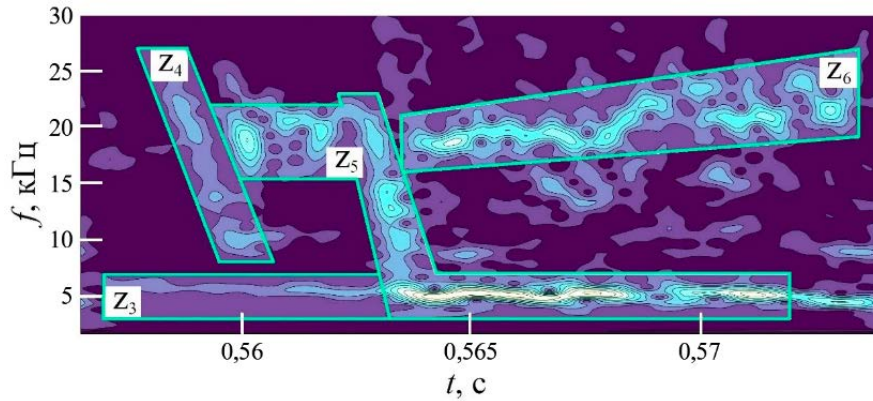


Рис. 3. Модуль время-частотного распределения сигнала магнитного датчика с указанием заданных для фильтрации областей  $z_3$ ,  $z_4$ ,  $z_5$ ,  $z_6$  во временном интервале, содержащем электронно-циклотронный нагрев и рост тока плазмы

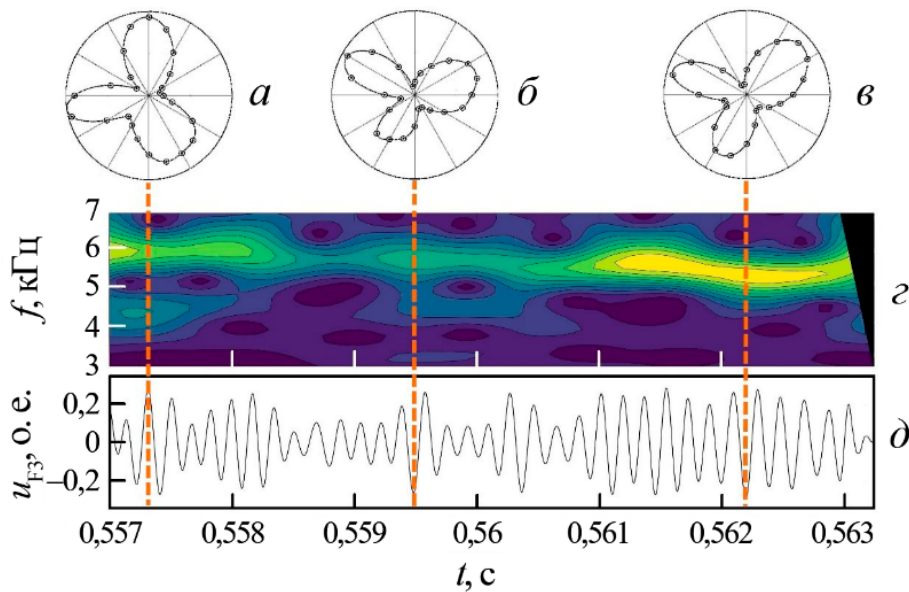


Рис. 4. Результат анализа пространственной структуры и изменения во времени составляющей сигнала МГД-диагностики во время-частотной области  $z_3$ : *a*, *б*, *в* — пространственные распределения в полоидальном направлении составляющих сигналов магнитных датчиков в моменты времени, отмеченные пунктирными линиями; *г* — модуль время-частотного распределения составляющей сигнала  $u_{F3}$ ; *д* — составляющая сигнала  $u_{F3}$

**Применение перекрёстного S-преобразования и очистки от шума для анализа фазовой корреляции сигналов датчиков МГД-диагностики.** Как было отмечено ранее, перекрёстное S-преобразование сигналов разных датчиков позволяет выделить составляющие, принадлежащие этим сигналам и обладающие фазовой корреляцией. Однако в сигналах датчиков МГД-диагностики в токамаке обычно присутствует паразитный шум. Из-за этого время-частотные распределения разности фаз отдельных сигналов имеют вид сложных мозаичных структур, что затрудняет их анализ и требует очистки от шума результата перекрёстного S-преобразования.

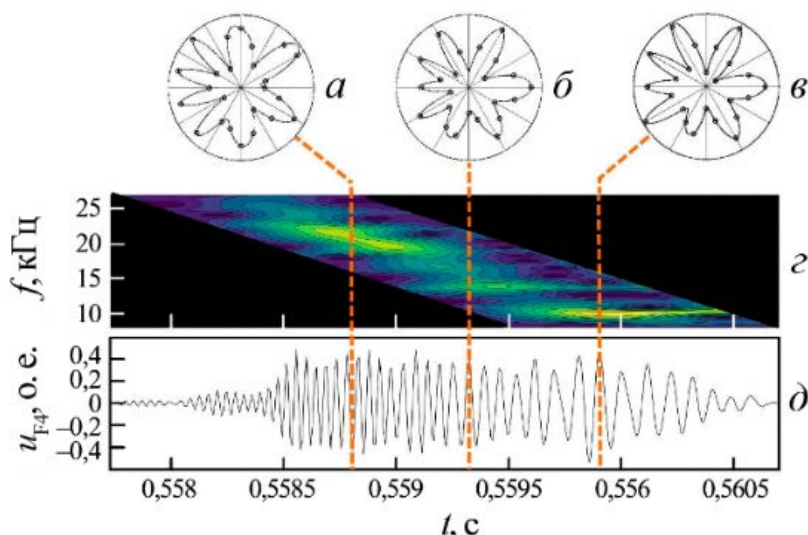


Рис. 5. Результат анализа пространственной структуры и изменения во времени составляющей сигнала МГД-диагностики во время-частотной области  $z_4$ :  $a, б, в$  — пространственные распределения в полоидальном направлении составляющих сигналов магнитных датчиков в моменты времени, отмеченные пунктирными линиями;  $z$  — модуль время-частотного распределения составляющей сигнала  $u_{F4}$ ;  $d$  — составляющая сигнала  $u_{F4}$

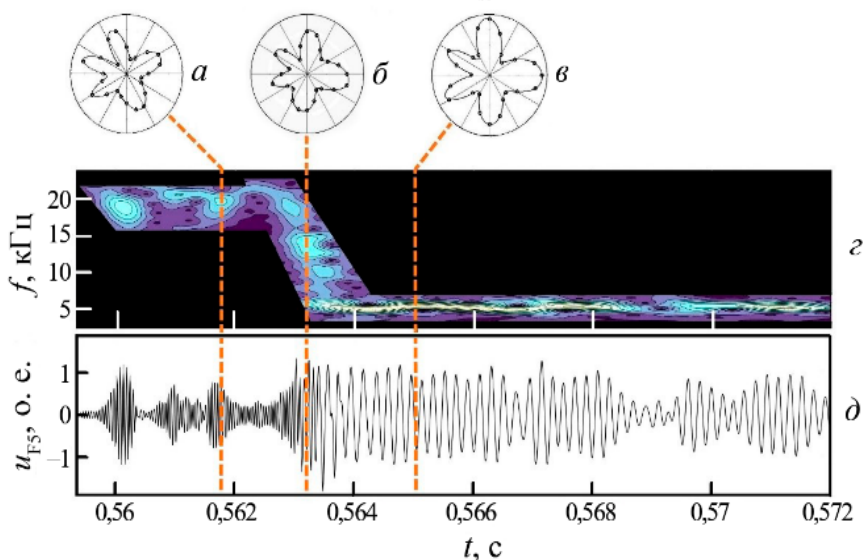


Рис. 6. Результат анализа пространственной структуры и изменения во времени составляющей сигнала МГД-диагностики во время-частотной области  $z_5$ :  $a, б, в$  — пространственные распределения в полоидальном направлении составляющих сигналов магнитных датчиков в моменты времени, отмеченные пунктирными линиями;  $z$  — модуль время-частотного распределения составляющей сигнала  $u_{F5}$ ;  $d$  — составляющая сигнала  $u_{F5}$

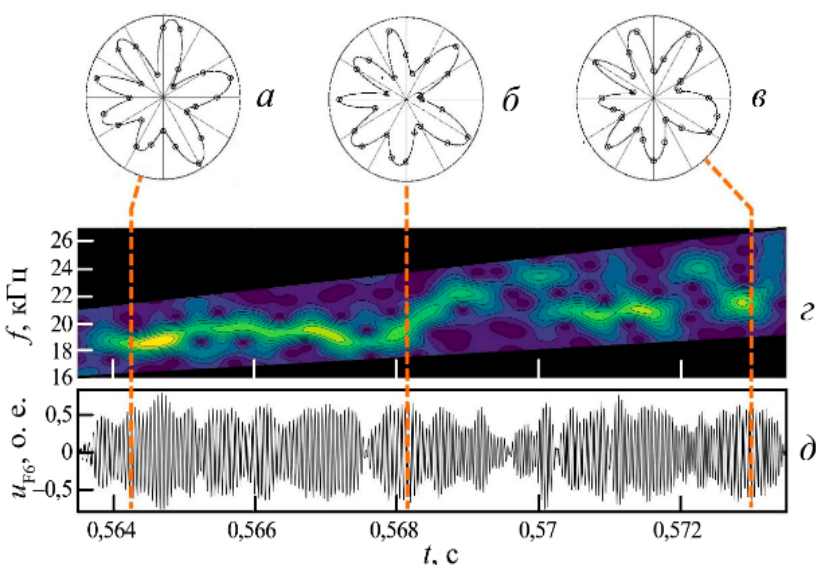


Рис. 7. Результат анализа пространственной структуры и изменения во времени составляющей сигнала МГД-диагностики во время-частотной области  $z_6$ :  $a, б, в$  — пространственные распределения в полоидальном направлении составляющих сигналов магнитных датчиков в моменты времени, отмеченные пунктирными линиями;  $z$  — модуль время-частотного распределения составляющей сигнала  $u_{F6}$ ;  $d$  — составляющая сигнала  $u_{F6}$

Пример перекрёстного S-преобразования сигналов двух соседних магнитных датчиков, полоидальные угловые координаты которых различаются на  $15^\circ$  ( $0,26$  рад.), и последующей очистки результата от

паразитного шума показан на рис. 8. На рис. 8, *а, в* представлены результаты перекрёстного S-преобразования исходных сигналов, на рис. 8, *б, г* — те же результаты, очищенные от шума. Общий интервал времени на этих рисунках составляет  $0,554 \leq t \leq 0,574$  с, а интервал времени, содержащий только шумовую составляющую и использованный при определении пороговых значений  $\lambda$  для очистки сигналов от шума, ограничивается значениями  $0,554 \leq t \leq 0,5562$  с. Как видно на рис. 8, в данном случае удаление шумовой составляющей слабо влияет на отображение модуля и повышает наглядность отображения аргумента результата перекрёстного S-преобразования на время-частотной плоскости. Результаты обработки сигналов показывают, что разности фаз синхронных составляющих сигналов с одинаковыми полоидальными волновыми числами сохраняются при изменениях частот этих составляющих во времени.

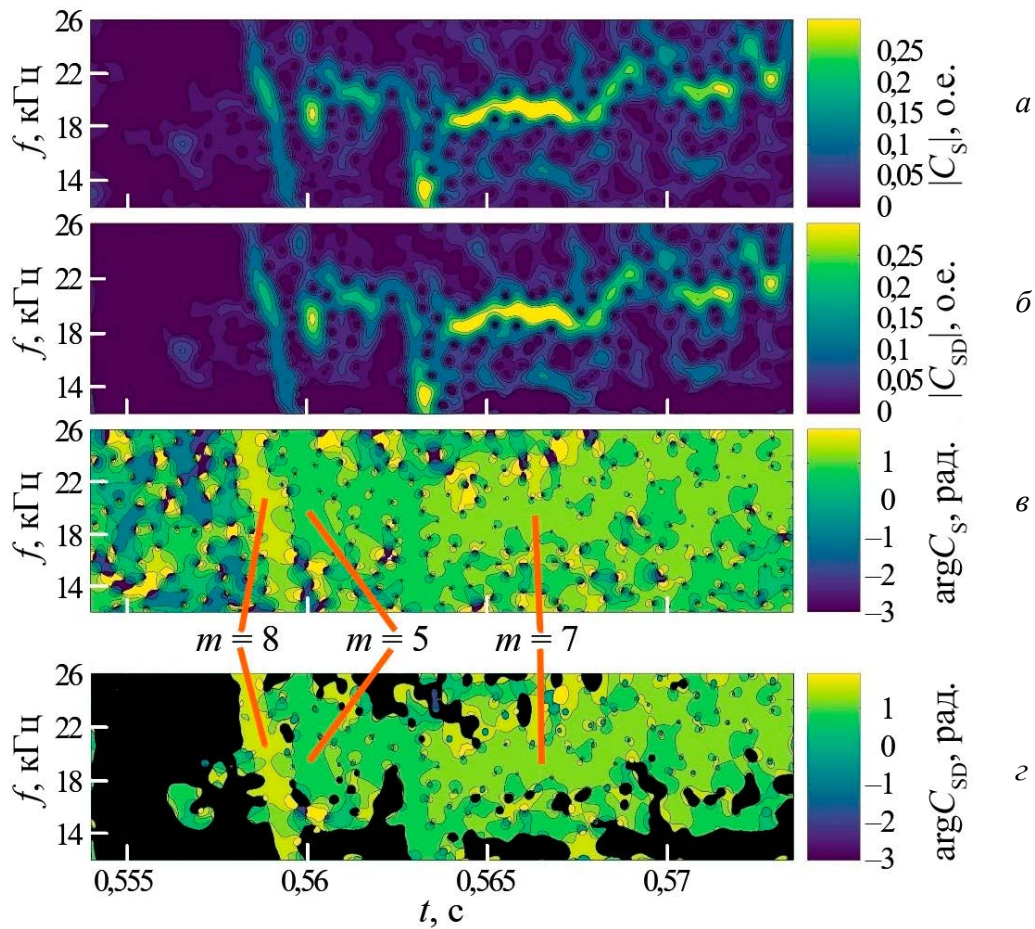


Рис. 8. Иллюстрация применения перекрёстного S-преобразования сигналов датчиков и очистки результата от шума для анализа фазовой корреляции: *а, в* — время-частотные распределения модуля  $|C_S|$  и аргумента  $\arg C_S$  перекрёстного S-преобразования сигналов двух соседних магнитных датчиков, включающих паразитный шум; *б, г* — очищенные от паразитного шума время-частотные распределения модуля  $|C_{SD}|$  и аргумента  $\arg C_{SD}$  перекрёстного S-преобразования сигналов двух соседних магнитных датчиков

#### 4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведён анализ динамических и пространственных характеристик сигналов МГД-диагностики в токамаке с использованием расчётного алгоритма на основе преобразования Стоквелла. Продемонстрирована возможность использования данного метода для очистки сигналов от паразитных шумов, анализа динамики составляющих исходного многокомпонентного сигнала, время-частотного анализа перекрёстной фазовой корреляции сигналов датчиков и определения пространственной структуры отдельной составляющей МГД-возмущения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Мирнов С.В., Семенов И.Б.** Исследование неустойчивостей плазменного шнура в установке Токамак-3 корреляционным методом. — *Атомная энергия*, 1971, т. 30, вып. 1, с. 20—27.
2. **Nardone C.** Multichannel fluctuation data analysis by the singular value decomposition method. Application to MHD modes in JET. — *Plasma Phys. Control. Fusion*, 1992, vol. 34, № 9, p. 1447—1465.
3. **Какурин А.М., Орловский И.И.** Метод эмпирического разложения в исследовании структуры крупномасштабных МГД-неустойчивостей в токамаке. — *Физика плазмы*, 2004, т. 30, № 5, с. 370—375.
4. **Faridyousefi H., Salem M.K., Ghorannevis M.** MHD Mode Identification from Mirnov Coils Signals in Tokamak Via Combination of Singular Value Decomposition and Hilbert—Huang Transform Analysis Methods. — *J. of Fusion Energy*, 2020, vol. 39, p. 512—520.
5. **Jayakumar Chandrasekaran, Sangeetha Jayaraman.** Magnetohydrodynamic Mode Identification for Golem Mirnov Coil Signals Using Singular Value Decomposition and Multichannel Variational Mode Decomposition Method for Analyzing Time—Frequency. — *J. of Fusion Energy*, 2022, vol. 41, № 2, p. 1—8.
6. **Figueiredo A.C.A., Nave M.F.F., and EFDA—JET Contributors.** Time—frequency analysis of non-stationary signals in fusion plasmas using the Choi—Williams distribution. — *Nucl. Fusion*, 2004, vol. 44, p. L17—L20.
7. **Figueiredo A.C.A., Nave M.F.F., and EFDA—JET Contributors.** Time-frequency analysis of nonstationary fusion plasma signals: a comparison between the Choi—Williams distribution and wavelets. — *Rev. Sci. Instrum.*, 2004, vol. 75, p. 4268—4270.
8. **Eliseev L.G., Ivanov N.V., Kakurin A.M., Melnikov A.V., Perfilov S.V.** Magnetic island and plasma rotation under external resonant magnetic perturbation in the T-10 tokamak. — *Physics of Plasmas*, 2015, vol. 22, p. 052504; doi: 10.1063/1.4921646.
9. **Fitzpatrick R.** Further modeling of  $q_{95}$  windows for the suppression of edge localized modes by resonant magnetic perturbations in the DIII-D tokamak. — *Phys. Plasmas*, 2021, vol. 28, p. 022503; <https://doi.org/10.1063/5.0035874>.
10. **Козн Л.** Время-частотные распределения. Обзор. — *ТИИЭР*, 1989, т. 77, № 10, с. 72—120.
11. **Boashash B.** Time-Frequency Signal Analysis and Processing — a Comprehensive Reference (2nd edn.). — Amsterdam: Elsevier, 2016, p. 14—23.
12. **Gabor D.** Theory of communication. — *J. of the Institution of Electrical Engineers*, 1946, vol. 93, p. 429—441.
13. **Goupillaud P., Grossmann A., Morlet J.** Cycle-octave and related transforms in seismic analysis. — *Geoexploration*, 1984, vol. 23, p. 85—102.
14. **Stockwell R.G., Mansinha L., Lowe R.P.** Localization of the complex spectrum: the S-transform. — *IEEE Trans. Signal Proc.*, 1996, vol. 44(4), p. 998—1001.
15. **Mansinha L., Stockwell R., Lowe R., Eramian M., Schincariol R.** Local S-spectrum analysis of 1-D and 2-D data. — *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1997, vol. 103 (3), p. 329—336.
16. **Pinnegar C.R., Mansinha L.** The S-transform with windows of arbitrary and varying shape. — *Geophysics*, 2003, vol. 68, № 1, p. 381—385.
17. **George N.V., Sahu S.S., Mansinha L., Tiampo K., Panda G.** Time localised band filtering using modified S-transform. — In: Proc. on the IEEE International Conference on Signal Processing Systemes (ICSPPS). Singapore, 2009, p. 42—46.
18. **Assous S., Boashash B.** Evaluation of the modified S-transform for time-frequency synchrony analysis and source localization. — *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 2012, vol. 1, p. 1—18.
19. **Sejdic E., Djurovic I., Jiang J.** A window width optimized S-transform. — *EURASIP J. Adv. Signal Process*, 2008, № 59, p. 1—13.
20. **Jianping Ma, Jin Jiang.** Analysis and design of modified window shapes for S-transform to improve time—frequency localization. — *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2015, vol. 58—59, p. 271—284.
21. **Tie Zhong, Shuo Zhang, Guowei Cai, Yue Li, Baojun Yang, Yun Chen.** Power Quality Disturbance Recognition Based on Multiresolution S-Transform and Decision Tree. — *IEEE Access*, 2019, vol. 7, p. 88380—88392.
22. **Junjie Liu, Chenfei Zhao, Haojie Wu, Fuai Zhang, Nan Yan,** Fluid mobility calculation based on improved window parameters optimized S-transform for reservoir delineation. — *Unconventional Resources*, 2023, vol. 3, p. 134—141.
23. **Ifeachor E.C., Jervis B.W.** Digital Signal Processing. Prentice Hall, 2004. ISBN 0-201-59619-9.
24. **Schimmel M., Gallart J.** The inverse S-transform in filters with time-frequency localization. — *IEEE Trans. Signal Processing*, 2005, vol 53, № 10, p. 4417—4422.
25. **Schimmel M., Gallart J., Simon C.** An alternative inverse S-transform for filters with time-frequency localization. — In: Proc. 4th IEEE Symp. Image Signal Processing Analysis (ISPA). Barcelona, Spain, 2005, p. 424—429.
26. **Simon C., Ventosa S., Schimmel M., Heldring A., Danobeitia J.J., Gallart J., Manuel A.** The S-Transform and its inverses: side effects of discretizing and filtering. — *IEEE Trans. Signal Process*, 2007, vol. 55, № 10, p. 4928—4937.

27. **Donoho D., Johnstone I.M.** Ideal spatial adaptation by wavelet shrinkage. — *Biometrika*, 1994, vol. 81, p. 425—455.
28. **Donoho D.** De-noising by soft-thresholding. — *IEEE Trans. Inf. Theory*, 1995, vol. 41, p. 613—627.
29. **Малла С.** Вэйвлеты в обработке сигналов. Пер. с англ. — М.: Мир, 2005, с. 486—494.
30. **Parolai S.** Denoising of Seismograms Using the S-Transform. — *Bulletin of the Seismological Society of America*, 2009, vol. 99, № 1, p. 226—234.
31. **Stockwell R.G.** Why use the S-Transform? — *AMS Pseudo-Differential Operators: Partial Differential Equations and Time-Frequency Analysis*, 2007, vol. 52, p. 279—309.

НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия



Николай Владимирович Иванов, заместитель начальника отдела, д.ф.-м.н.  
Ivanov\_NV@nrcki.ru



Алексей Михайлович Какурин, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.  
Kakurin\_AM@nrcki.ru

Статья поступила в редакцию 25 сентября 2024 г.

После доработки 20 февраля 2025 г.

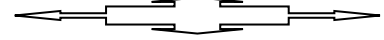
Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 124—135.



# ПЛАЗМА—СТЕНКА и МАТЕРИАЛЫ для УТС



УДК 544.022.344.3, 544.022.382

## МОДЕЛИРОВАНИЕ СТАРЕНИЯ КАСКАДОВ АТОМНЫХ СТОЛКНОВЕНИЙ В ОЦК Fe И V ОБЪЕКТНЫМ КИНЕТИЧЕСКИМ МЕТОДОМ МОНТЕ-КАРЛО

*Д.Н. Демидов, А.Б. Сивак*

*НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия*

Старение каскадов атомных столкновений с повреждающими энергиями 1—50 кэВ при температурах 300—900 К в ОЦК-металлах Fe и V промоделировано объектным кинетическим методом Монте-Карло. Изучаемые металлы представляют интерес как основа малоактивируемых конструкционных сталей и сплавов для термоядерных реакторов и гибридных систем «синтез—деление». Начальные пространственные распределения собственных точечных дефектов, выживших после остывания каскадной области (20 пс от начала развития каскада), брались из ранее полученных молекулярно-динамических данных. Эволюция системы, включающая в себя процессы диффузии, рекомбинации, кластеризации и диссоциации радиационных дефектов, отслеживалась в течение 5 нс. Получены зависимости от температуры и повреждающей энергии количества собственных точечных дефектов, выживших после старения, и соответствующие распределения по размерам их кластеров. В процессе старения каскадная эффективность снижается на 12—40% от начальных значений в зависимости от материала, температуры и повреждающей энергии. Определены физические механизмы, лежащие в основе наблюдаемых особенностей рассчитанных зависимостей.

**Ключевые слова:** первичная радиационная повреждаемость, каскады атомных столкновений, старение, каскадная эффективность, собственные точечные дефекты, кластеризация, железо, ванадий.

## MODELLING OF COLLISION CASCADES AGING IN BCC Fe AND V USING OBJECT KINETIC MONTE CARLO METHOD

*D.N. Demidov, A.B. Sivak*

*NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia*

The aging of collision cascades with damaging energies of 1—50 keV at temperatures of 300—900 K in BCC metals Fe and V has been simulated by an object kinetic Monte Carlo method. The studied metals are of interest as the basis for low-activation structural steels and alloys for fusion reactors and hybrid fission—fusion systems. The initial spatial distributions of self-point defects survived after the cascade region cooling (20 ps from the beginning of the cascade development) have been taken from previously obtained molecular dynamics data. The evolution of the system, which includes the processes of diffusion, recombination, clustering, and dissociation of radiation defects, has been surveilled for 5 ns. The temperature and damaging energy dependences of the number of survived self-point defects after aging and the corresponding size distributions of their clusters have been obtained. During the aging process, cascade efficiency decreases by 12—40% from the initial values, depending on the material, temperature and damaging energy. The physical mechanisms underlying the observed features of the calculated dependencies have been determined.

**Key words:** primary radiation damage, collision cascades, aging, cascade efficiency, self-point defects, clustering, iron, vanadium.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Конструкционные материалы в активных зонах ядерных и термоядерных реакторов подвергаются значительным радиационным нагрузкам. В существующих феноменологических моделях изменения макроскопических свойств материалов (распухание, ползучесть, упрочнение и др.) под повреждающим нейтронным облучением в качестве входных параметров используются данные о первичных ра-

диационных повреждениях, вызываемых нейтронным облучением. NRT-модель [1], которая фактически является международным стандартом для расчётов первичной радиационной повреждаемости материалов, разработана на основе результатов компьютерного моделирования ионных столкновений в твёрдых телах в рамках приближения парных столкновений. Такое моделирование проводится только для баллистической стадии каскада атомных столкновений (КАС) и не учитывает дальнейшую эволюцию каскада, когда кинетические энергии атомов снижаются до значений ниже пороговой энергии смещения ( $\sim 10$  эВ). Как отмечается в [2], за время, пока энергии атомов каскадной области уменьшаются от пороговых до тепловых ( $\sim 10$  пс), образовавшиеся точечные дефекты (пары Френкеля), находящиеся на небольших расстояниях друг от друга, совершают  $\sim 10$ — $100$  скачков, что может привести к значительному числу рекомбинаций.

Считается [3], что наиболее точный учёт физических процессов в материале в области КАС среди имеющихся в настоящее время расчётных методов даёт метод молекулярной динамики (МД). МД-методом рассчитан значительный объём данных [2, 4] о первичной радиационной повреждаемости различных металлов и сплавов. Существенным ограничением МД-метода при расчётах развития и эволюции КАС является то, что для точного интегрирования уравнений движения атомов материала требуется достаточно маленький шаг интегрирования (менее  $10^{-15}$  с), поэтому общее время моделирования обычно ограничено  $\sim 1$  нс, в то время как такие кинетические процессы, как диффузия, рекомбинация, кластеризация и диссоциация радиационных дефектов (РД), в области КАС происходят в течение более длительного времени [3]. Редким примером МД-исследования, в котором отслеживалась кинетика указанных процессов на более длительных временах (до  $\sim 5,5$  нс), служит работа [5].

Преодолеть данное ограничение возможно с помощью объектного кинетического метода Монте-Карло (ОКМК), в рамках которого рассчитываются не движения отдельных атомов, а диффузия и реакции самих РД (объектов). Применение ОКМК-метода к расчётам кинетики РД в области КАС началось с 1970-х гг. [6]. В первых работах рассматривался ограниченный набор физических процессов, сопровождающих старение КАС: например, учитывалась подвижность только собственных межузельных атомов (СМА) и вакансий [6—9]. Позднее добавился учёт образования подвижных кластеров собственных точечных дефектов (СТД), реакции их диссоциации и взаимной рекомбинации ([10—12] для W, [13—16] для Fe, [17] для V, [18] для Ni и [19] для Mo).

Несмотря на большое число опубликованных работ по данной теме, наблюдается дефицит системности в имеющихся данных, затрудняющий их анализ и последующее применение в задачах радиационной физики твёрдых тел. Цель настоящей работы — восполнить имеющуюся нехватку данных для ОЦК-кристаллов Fe и V. Исследуемые металлы интересны тем, что являются основой малоактивируемых конструкционных сталей и сплавов (ферритно-мартенситные стали, сплавы ванадия) для термоядерных реакторов и гибридных систем «синтез—деление». В настоящей работе старение КАС с повреждающей энергией 1—50 кэВ моделируется ОКМК-методом для Fe и V в диапазоне температуры 300—900 К.

Произведённый в реакции DT-синтеза нейтрон в упругом столкновении с атомом Fe или V может передать в среднем  $\sim 0,5$  МэВ кинетической энергии. Если эти атомы являются частью матрицы соответственно металлов Fe и V, то одна часть этой энергии рассеется в упругих столкновениях атомов, а другая — в электронных потерях. Радиационные дефекты образуются в каскадах атомных столкновений, соответствующая часть энергии называется повреждающей энергией [2]. Значение повреждающей энергии  $E^d$  каскадов, вызванных первично выбитыми атомами с энергией  $\sim 0,5$  МэВ, составляет  $\sim 220$  кэВ для Fe и V [2]. В Fe и V при  $E^d > \sim 20$ — $30$  кэВ количество выживших дефектов линейно зависит от  $E^d$ , а их кластерные распределения не зависят от  $E^d$  [20]. Такое поведение характеристик первичной радиационной повреждаемости объясняется в [2, 4] делением каскадов с  $E^d \sim 20$ — $30$  кэВ на субкаскады. Поэтому верхняя граница  $E^d$  рассматриваемых в настоящей работе каскадов выбрана равной 50 кэВ. При  $E^d < 1$  кэВ в каскадах образуется малое количество дефектов (в основном одиночные СМА и вакансии [2]), эффекты старения малы, поэтому нижняя граница  $E^d$  рассмотренных каскадов выбрана равной 1 кэВ.

Моделируемые температуры старения выбраны соответствующими температурам металлов, для которых проводилось МД-моделирование каскадов в [20] (начальные пространственные распределения РД для ОКМК-расчётов настоящей работы получены МД-моделированием в [20]). Выбор, в свою очередь, определялся диапазоном температур, при которых возможна эксплуатация конструкционных материалов с матрицей из Fe и V (стали, сплавы ванадия) в термоядерных реакторах.

Моделируемое время старения КАС (5 нс) ограничено характерным временем протекания процессов первичной радиационной повреждаемости в конструкционных материалах ядерных и термоядерных реакторов. Используемая ОКМК-модель учитывает все упомянутые физические процессы с участием РД. Диффузия СМА и их кластеров моделируется с учётом разных их механизмов диффузии (3D, 1D, смешанный 1D/3D). Для параметризации ОКМК-модели используются данные атомистического моделирования (включая начальные пространственные распределения СТД и их кластеров, создаваемых КАС) с использованием потенциалов межатомного взаимодействия [21] и [22] в Fe и V соответственно. Обсуждение применимости этих потенциалов к рассматриваемым задачам и их преимуществ относительно других потенциалов приведено в [23].

## 2. МЕТОДИКА МОДЕЛИРОВАНИЯ

ОКМК-метод, с помощью которого в настоящей работе моделируется старение КАС, основан на алгоритме «времени пребывания» (алгоритм «*n*-fold way» или алгоритм «Bortz-Kalos-Lebowitz» — VKL-алгоритм) [24] и позволяет учесть дискретность кристаллической решётки, её симметрию и механизмы диффузии моделируемых объектов.

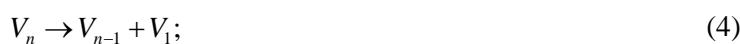
Время старения КАС  $\tau$ , с одной стороны, должно быть как можно большим, чтобы наиболее полно отследить влияние процессов кластеризации, рекомбинации и диссоциации РД на каскадную эффективность и функцию распределения СТД по кластерам различного размера. С другой стороны,  $\tau$  должно быть таким, чтобы вероятность гибели РД на микроструктурных стоках в реальных материалах за это время была достаточно малой, так как такие реакции будут приводить к эволюции микроструктуры и, следовательно, выходят за рамки изучаемых в работе процессов первичной радиационной повреждаемости. В качестве компромисса значение  $\tau$  выбирается в 2 раза меньшим, чем среднее время  $\tau_{\max} = (k^2 D_{\max})^{-1}$ , за которое РД с максимальным коэффициентом диффузии  $D_{\max}$  ( $D_{\max} \approx 3 \cdot 10^{-4}$  см<sup>2</sup>/с для СМА и их кластеров по данным [25, 26]) достигают микроструктурных стоков со стоковой силой  $k^2 \approx 3 \cdot 10^{15}$  м<sup>-2</sup>. Это значение  $k^2$  выбрано как среднее геометрическое границ диапазона значений  $k^2$ , характерных для конструкционных материалов атомной техники:  $10^{15}$ — $10^{16}$  м<sup>-2</sup> [27]. Определяемое таким образом значение  $\tau$  составляет 5 нс.

**Реакции, в которых участвуют РД.** Состоящие из  $n$  СМА и  $n$  вакансий РД обозначим как  $I_n$  и  $V_n$  соответственно. Величину  $n$  назовём размером РД. В работе рассматриваются следующие реакции между РД:



где  $\emptyset$  означает отсутствие РД, а  $m$  равнозначно  $n$  и обозначает размер РД.

Учитывается возможность термической диссоциации  $V_n$  и  $I_n$  с  $n \geq 2$ :



Реакции (1), (2) для одиночных СТД происходят, если расстояние между ними становится меньше или равным  $R_{cr}$  — расстояние до вторых и четвёртых ближайших соседей (БС) ОЦК-решётки для вакансий и СМА соответственно [20]. Эти расстояния равны  $a$  (вторые БС) и  $\sim 1,66a$  (четвёртые БС), где  $a$  — параметр решётки. Реакции (3) для одиночных вакансий и СМА происходят, если расстояние между ними уменьшается до  $a$ . Реакции (1)—(3) с участием кластеров СТД происходят, если расстояние между реакционными поверхностями реагирующих объектов становится меньше  $\lambda = a\sqrt{3}/2$  — длины скачка в первые БС ОЦК-решётки. Реакционная поверхность  $V_n$  для всех  $n$ , а также  $I_n$  с  $n \leq 2$  ( $I_{n \leq 2}$ ) представляет собой сферу объёмом  $n\Omega$ . Реакционная поверхность  $I_{n \geq 3}$  представляет собой диск объёмом  $n\Omega$ , толщина которого задаётся равной  $a\sqrt{3}/2$  (длина вектора Бюргерса типа  $\frac{1}{2}\langle 111 \rangle$  в ОЦК-решётке). Пространственное положение РД, образующегося в результате реакции двух РД, определяется как центр их масс (под «массой» РД понимается размер  $n$  в случае  $I_n$  и  $-n$  в случае  $V_n$ ).

Положение кластера СТД, с которым происходит реакция (4) или (5), не меняется. Размер  $n$  такого кластера уменьшается на единицу, а положение одиночного СТД, образующегося в результате реакции, задаётся случайным образом на поверхности сферы радиусом  $R_{ds}$ , в центре которой находится кластер размером  $n - 1$ :  $R_{ds} = R + R_{cr} + \lambda$ , где  $R$  — радиус реакционной поверхности (диска или сферы в зависимости от типа кластера).

**Начальные пространственные распределения РД и ориентации кластеров СМА.** В качестве начальных пространственных распределений РД для ОКМК-расчётов брались полученные МД-моделированием в [20] пространственные распределения РД, создаваемых КАС со значениями повреждающей энергии  $E^d = 1, 5, 10, 20, 50$  кэВ в объёме ОЦК Fe и V при 300, 600 и 900 К (время МД-моделирования составляло 20 пс от начала развития КАС).

Помимо положений в пространстве, объекты типа  $I_n$  характеризуются своей пространственной ориентацией (направление расщепления составляющих  $I_n$  гантельных СМА, от которого зависит выбор направления диффузионного скачка  $I_n$ ). Поскольку одиночные СМА и димежузлия часто меняют свою ориентацию, их начальные ориентации задавались случайным образом: случайные векторы типов  $\langle 110 \rangle$  и  $\langle 111 \rangle$  для  $I_1$  и  $I_2$  соответственно. Начальные ориентации объектов типа  $I_{n \geq 3}$  определялись из МД-данных [20]. СМА, составляющие кластеры такого типа, лежат в плоскости, близкой или совпадающей по ориентации с плоскостями типа  $\{111\}$ . При этом ориентации кластеров близки к нормальям к их плоскостям залегания. Таким образом, они представляют собой зародыши краевых дислокационных петель межузельного типа с вектором Бюргерса типа  $\frac{1}{2}\langle 111 \rangle$ . Поэтому начальные ориентации кластеров  $I_{n \geq 3}$  задавались как векторы типа  $\langle 111 \rangle$ , имеющие наименьший угол разориентировки с векторами нормали к плоскостям залегания.

**Механизмы диффузии РД.** Механизмы диффузии РД оказывают влияние на константы их реакций между собой [28], поэтому учёт этих механизмов важен для описания кинетики ансамбля РД.

Вакансии могут совершать скачки в восемь ближайших соседних узлов ОЦК-решётки с равной вероятностью. СМА ( $\langle 110 \rangle$  гантельная конфигурация) могут совершать скачки в четыре ближайших соседних узла, так как при каждом скачке ось гантели поворачивается на  $60^\circ$  относительно исходного направления расщепления [29], в каждый из четырёх узлов СМА может попасть двумя способами с различными конечными ориентациями.

Объекты  $I_n$  с  $2 \leq n \leq 5$  ( $I_{2-5}$ ) обладают смешанным 1D/3D-механизмом диффузии. Кластер двигается одномерно сонаправленно своей текущей ориентации (краудионный механизм) до тех пор, пока та не сменится (реориентация), после чего кластер продолжает двигаться одномерно сонаправленно его новой ориентации [30].

В [25, 26] наблюдалась тенденция к увеличению энергии реориентации  $E^R$  кластеров  $I_{2-5}$  с ростом  $n$  в Fe и V. Поэтому сделано предположение, что значения  $E^R$  для  $I_{n \geq 6}$  больше, чем для  $I_5$  (0,6 эВ в V и 1,1 эВ в Fe). Вследствие этого события реориентации  $I_{n \geq 6}$  не учитывались как слишком редкие для рассматриваемых времён, и их диффузия считалась полностью одномерной.

В рассматриваемом диапазоне температур значения коэффициента диффузии  $D$  для  $V_1$  на два и более порядка ниже, чем для  $I_n$ . Значения  $D$  для  $V_{n \geq 2}$  ниже, чем для  $V_1$  [31]. Поэтому используется фи-

зически оправданное упрощение, что вакансионные кластеры неподвижны. Несмотря на это, реакции (1) между ними могут происходить при соприкосновении друг с другом в процессе их роста.

**Частоты событий для РД.** Все упоминаемые в этом подразделе данные получены в рамках атомистического моделирования, если не указано иное.

Частоты скачков  $v^M$  РД рассчитывались как

$$v^M = 6D/\lambda^2. \quad (6)$$

Значения  $D$  для  $V_1$  и  $I_1$  в Fe и V брались из [32, 33] соответственно, для  $I_{2-5}$  — из [25, 26] для Fe и V соответственно. Значения  $v^M$  для  $I_{n \geq 6}$  взяты равными значениям для  $I_5$ , поскольку различия значений  $D$  для  $I_{2-5}$  заметно меньше одного порядка величины (особенно при  $T \geq 600$  К) [25, 26].

Значения частот реориентаций  $v^R$  для  $I_{2-5}$  взяты из [25, 26] для Fe и V соответственно.

Частоты диссоциации  $v^D$  для  $V_n$  и  $I_{n \geq 2}$  рассчитывались по формуле Аррениуса

$$v^D = v_0^D \exp(-\beta E^D), \quad (7)$$

где  $\beta = (k_B T)^{-1}$ ,  $k_B$  — постоянная Больцмана;  $T$  — температура;  $E^D$  — энергия диссоциации кластера. Значения  $E^D$  рассчитывались как

$$E^D = E^B + E^{AM}, \quad (8)$$

где  $E^{AM}$  — энергия активации миграции одиночного СТД;  $E^B$  — энергия связи кластера:

$$E^B = E_1^F + E_{n-1}^F - E_n^F, \quad (9)$$

где  $E_n^F$  — энергия образования кластера размером  $n$ .

Значения  $E^{AM}$  для  $V_1$  составляют 0,74 эВ [32] и 0,48 эВ [33] для Fe и V соответственно.  $E^{AM}$  для  $I_1$  зависит от температуры в Fe и V [32, 33], поэтому для каждой конкретной температуры значение  $E^{AM}$  своё: 0,22, 0,13, 0,09 эВ в Fe и 0,21, 0,16, 0,13 эВ в V при  $T = 300, 600, 900$  К соответственно.

Значение  $E^B$  для  $V_2$  составляет 0,22 эВ в Fe [33] и 0,36 эВ в V (рассчитано в настоящей работе по методике [33]). Для кластеров  $V_{n \geq 3}$  значения  $E^B$  рассчитывались как [34]

$$E^B = 4\pi\gamma \left( \frac{3\Omega}{4\pi} \right)^{2/3} \left( (n-1)^{2/3} - n^{2/3} \right) + E_1^F, \quad (10)$$

где  $\Omega = a^3/2$  — атомный объём;  $\gamma$  — поверхностная энергия (0,15 эВ/Å<sup>2</sup> для Fe и V [35]);  $E_1^F$  — энергия образования вакансии (1,92 эВ для Fe [32] и 2,79 эВ для V [33]).

Значения  $E^B$  для  $I_{2-5}$  брались из [25, 26] для Fe и V соответственно для наиболее энергетически выгодных пространственных конфигураций  $I_n$ . Для  $I_{n \geq 6}$   $E^B > 1,5$  эВ (на порядок выше энергии тепловых колебаний при 900 К), поэтому события диссоциации для них за время моделирования не успевают реализоваться.

Значение  $v_0^D$  в (7) для  $V_n$  задавалось равным частоте Дебая для соответствующего материала:  $v_D = k_B T_D/h$ , где  $h$  — постоянная Планка,  $T_D$  — температура Дебая (434 К для Fe [36] и 400 К [37] для V). Определённые таким образом значения  $v_D$  составляют  $1,0 \cdot 10^{13}$  Гц для Fe и  $0,83 \cdot 10^{13}$  Гц для V.

Значения  $v_0^D$  для всех  $I_{2-5}$  принимались равными обратным значениям предэкспоненциального множителя в формуле для времени жизни до диссоциации димежузлий в Fe и V, определённых в [38].

**Рассчитываемые характеристики первичной радиационной повреждаемости.** В процессе моделирования старения области КАС отслеживались две основные метрики процессов, происходящих в соответствии с реакциями (1)—(5): каскадная эффективность  $\eta$  и функция распределения  $\chi^\pm(n)$ , где  $\chi^+$  и  $\chi^-$  — доли СМА (+) и вакансий (−), содержащихся в РД размером  $n$ , соответственно. Кроме того, вёлся полный учёт реакций (1)—(5): записывались размеры участвовавших в реакциях РД (как исходных, так и образовавшихся в результате реакций), а также моменты времени, в которые происходили реакции.

Значение  $\eta$  в каждый момент времени рассчитывалось как отношение текущего количества ПФ  $N^s$  к количеству ПФ  $N^d$ , предсказываемому NRT-стандартом:

$$N^d(E^d) = 0,8 \frac{E^d}{2T^d}, \quad \frac{2T^d}{0,8} < E^d < \infty, \quad (11)$$

где  $T^d$  — пороговая энергия смещения атомов из узлов кристаллической решётки (40 эВ для Fe и V [39]).

Для каждого материала, температуры и значения повреждающей энергии имеется 20 различных начальных пространственных распределений РД, полученных МД-методом в [20]. Поскольку алгоритм Монте-Карло имеет стохастический характер, для получения статистически достоверных результатов производилось 500 запусков ОКМК-кода для каждого начального распределения РД. Для определения  $\chi^\pm(n)$  и  $\eta$  проводилось усреднение их значений по всем 10 000 ( $20 \times 500$ ) расчётам. Для определения их погрешности рассчитывались средние значения  $\chi^\pm(n)$  и  $\eta$  по 500 расчётам для каждого из 20 начальных распределений, и по данным выборкам рассчитывались их стандартные отклонения.

### 3. РЕЗУЛЬТАТЫ

**Каскадная эффективность.** На рис. 1 приведены полученные ОКМК-методом значения каскадной эффективности  $\eta$  при времени старения  $t = 5$  нс в Fe и V. Расчёты проведены для всех пар рассмотренных  $E^d$  и  $T$ . Для сравнения на графиках также построены полученные в [20] аналитические аппроксимации начальных ( $t = 0$ ) зависимостей  $\eta(E^d)$ . Для каскадов с  $E^d \geq 20$  кэВ в Fe  $\eta \approx 0,20$  при  $t = 5$  нс для всех рассмотренных  $T$  ( $\eta = 0,25$  при  $t = 0$ ), в V  $\eta \approx 0,23$  при  $T = 300$  К и  $\eta \approx 0,15$  при  $T \geq 600$  К ( $\eta = 0,26$  и  $\eta = 0,23$  соответственно при  $t = 0$ ). Зависимость значений  $\eta$  от  $T$  при  $t = 5$  нс в V возникает как следствие их зависимости от  $T$  при  $t = 0$ , причины возникновения которой обсуждены в [20]. Таким образом, для каскадов с  $E^d \geq 20$  кэВ за время старения 5 нс величина  $\eta$  снижается на 17—26% для Fe и на 13—40% для V в зависимости от температуры (чем выше  $T$ , тем сильнее снижение).

На рис. 2 представлены зависимости  $\eta(t)$  для Fe и V при  $T = 900$  К и  $E^d = 50$  кэВ, характеризующиеся наибольшим снижением  $\eta$  за 5 нс. Зависимости  $\eta(t)$  при других значениях  $T$  и  $E^d$  ведут себя схожим образом с зависимостями, приведёнными на рис. 2. Отличия носят количественный характер. Скорость снижения  $\eta$  заметно уменьшается к моменту времени  $t = 5$  нс, однако  $\eta$  не выходит на стационарное значение.

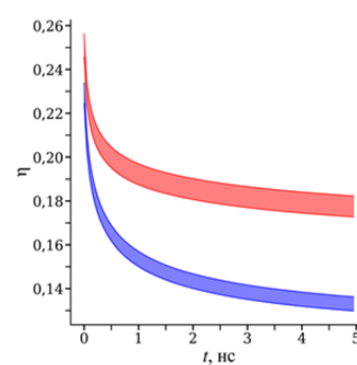
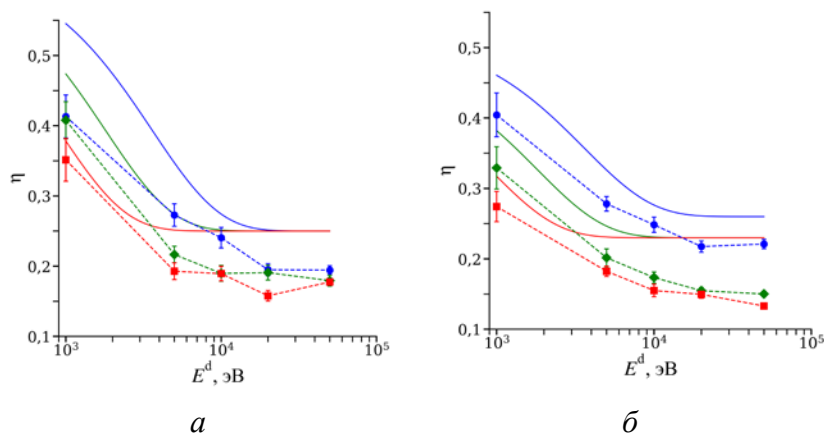


Рис. 1. Зависимость каскадной эффективности  $\eta$  от повреждающей энергии  $E^d$  в Fe (а) и V (б) при разных температурах до и после старения. Для всех ОКМК-данных (символы, соединённые пунктирными линиями для удобства восприятия) приведены стандартные ошибки. Аналитические зависимости  $\eta(E^d)$  (сплошные линии) получены в [20]: — 300 К,  $t = 0$ ; — 600 К,  $t = 0$ ; — 900 К,  $t = 0$ . ОКМК-данные: ● — 300 К,  $t = 5$  нс; ◆ — 600 К,  $t = 5$  нс; ■ — 900 К,  $t = 5$  нс

Рис. 2. Зависимости  $\eta(t)$  для КАС с  $E^d = 50$  кэВ в Fe и V при 900 К. Закрашенные области соответствуют разбросу значений  $\eta$ , определяемому погрешностью: — Fe; — V

В Fe при 300 К величина  $\eta$  снижается на 17% за 5 нс, что не согласуется с результатами работы [15], в которой при аналогичных условиях рекомбинационные процессы в области КАС проявляются на временах больше 10 нс. Такое рассогласование возникает из-за значительно более высоких значений энергии активации  $I_{n \leq 4}$ , используемых в [15], по сравнению с используемыми в настоящей работе.

В Fe по результатам [15] величина  $\eta$  после старения КАС с  $E^d = 50$  кэВ в течение  $10^4$  с снижается на 30, 39 и 56% при 300, 600 и 900 К соответственно. В настоящей работе снижение  $\eta$  для тех же  $E^d$  и  $T$  за 5 нс составляет 17, 24 и 26% соответственно — примерно половина от величины снижения  $\eta$  в [15].

**Распределения СТД по кластерам различного размера.** Распределения  $\chi^\pm(n)$  до и после старения КАС для всех рассмотренных пар значений  $E^d$  и  $T$  представлены на рис. 3 и 4 для Fe и V соответственно. Видно, что старение заметно меняет вид этих распределений, причём при различных  $T$  изменения носят разный характер. Обсуждение этих изменений приводится далее.

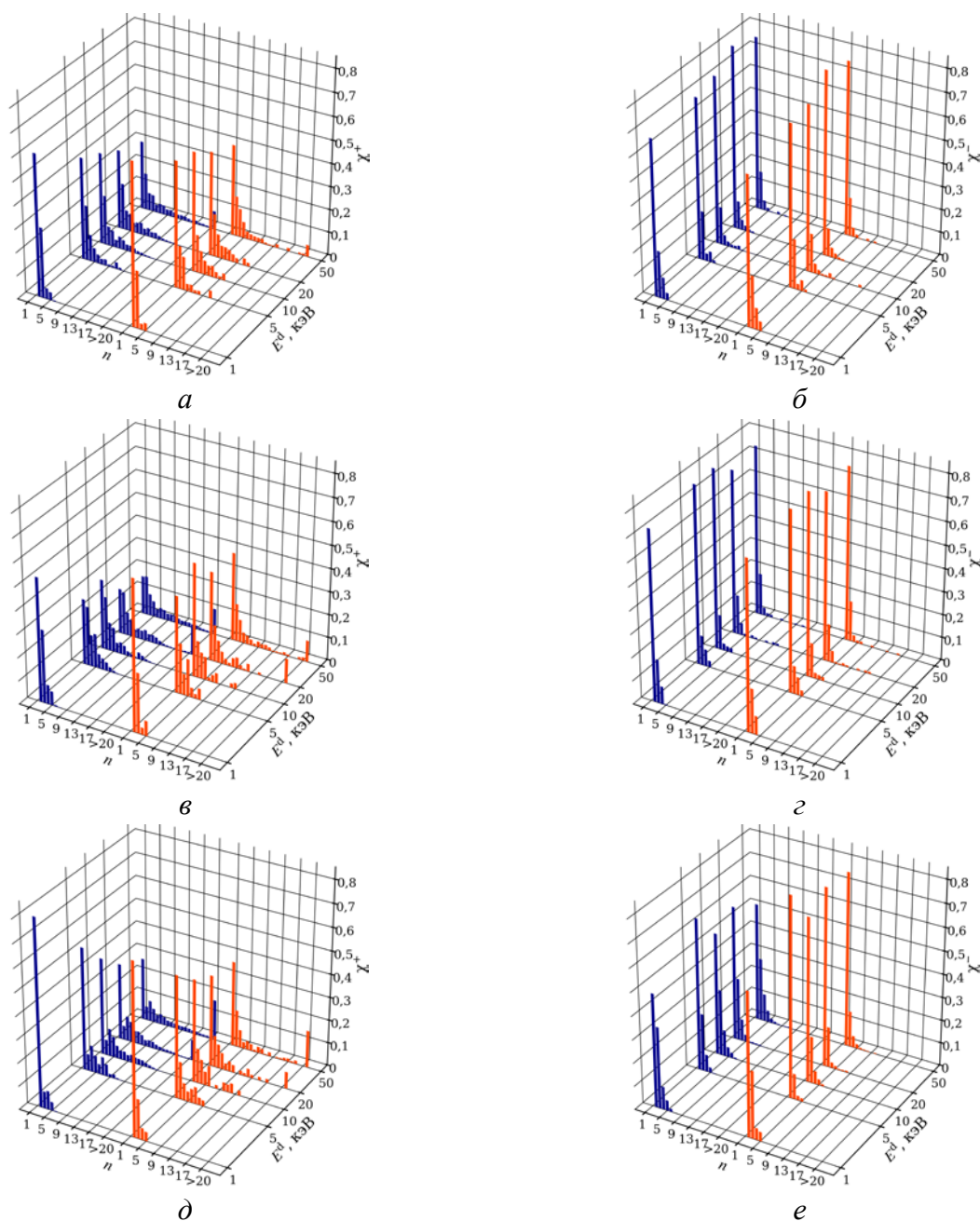


Рис. 3. Распределения  $\chi^+(n)$  (а, в, д) и  $\chi^-(n)$  (б, г, е) в Fe при 300 К (а, б), 600 К (в, г), 900 К (д, е) до (красные) и после (синие) старения

**Распределения СТД по кластерам различного размера.** Распределения  $\chi^\pm(n)$  до и после старения КАС для всех рассмотренных пар значений  $E^d$  и  $T$  представлены на рис. 3 и 4 для Fe и V соответственно. Видно, что старение заметно меняет вид этих распределений, причём при различных  $T$  изменения носят разный характер. Обсуждение этих изменений приводится далее.

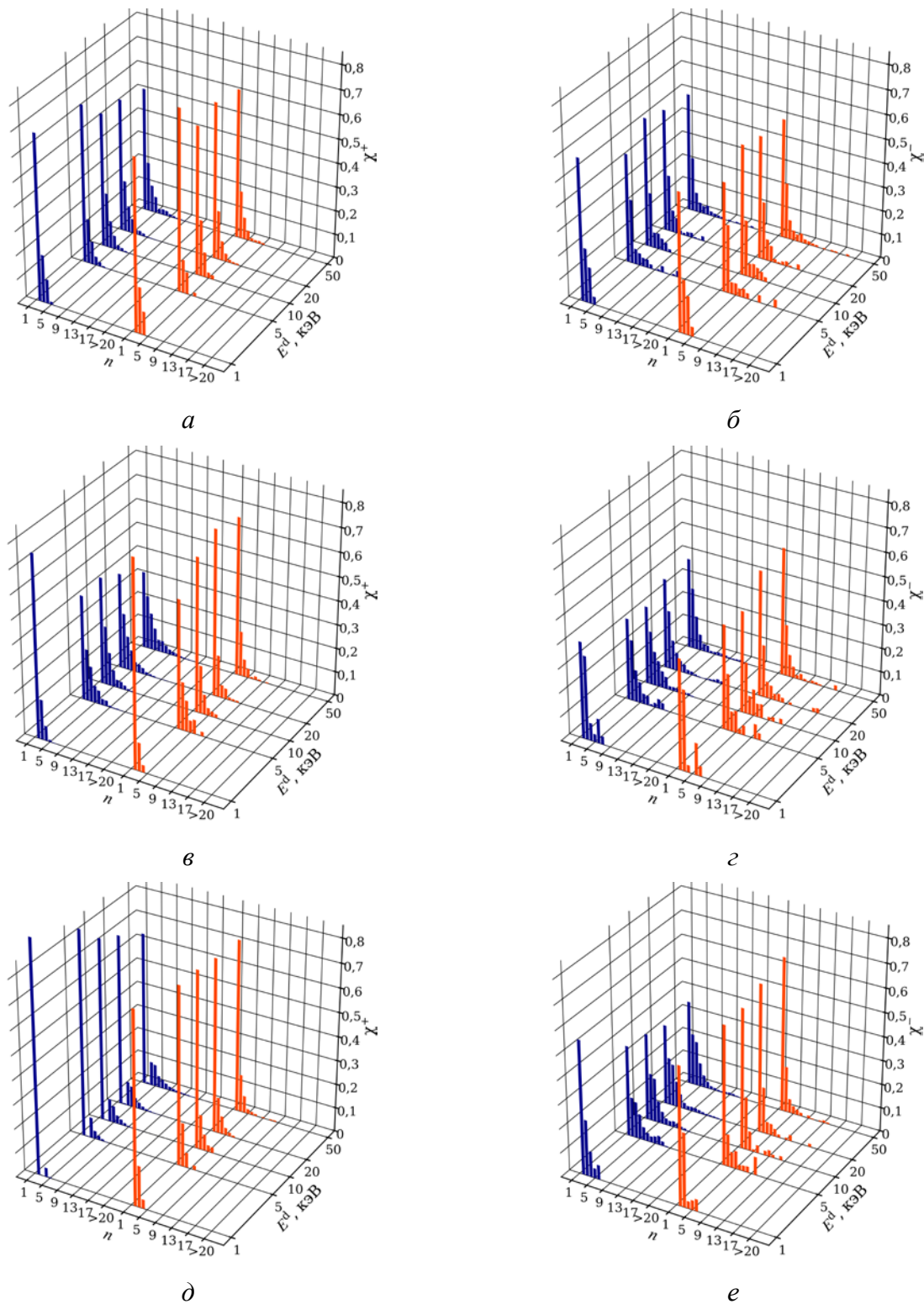


Рис. 4. Распределения  $\chi^+(n)$  (а, в, д) и  $\chi^-(n)$  (б, г, е) в V при 300 К (а, б), 600 К (в, г), 900 К (д, е) до (красные) и после (синие) старения

#### 4. ОБСУЖДЕНИЕ

**Роль реакций термической диссоциации.** Реакции термической диссоциации (5) для  $I_2$  в процессе старения КАС заметно меняют вид распределений  $\chi^+(n)$  в области  $n \leq 5$  при 900 К в Fe (см. рис. 3, д) и V (см. рис. 4, д).

Частота диссоциации  $I_2$  в V является наибольшей среди частот диссоциации  $I_n$  и  $V_n$  из-за самого низкого среди всех типов кластеров значения  $E^D$  (0,67 эВ). Как следствие, после старения КАС при 900 К  $\chi^+(2) \approx 0$  (до старения  $\chi^+(2) = 0,15$ ). Образующиеся в результате диссоциации  $I_1$  пополняют, в первую очередь, фракцию  $\chi^+(1)$  и, во вторую очередь, через реакции (2) фракции  $\chi^+(n)$  с  $n > 2$  (особенно  $\chi^+(3)$ , так как по начальному распределению чем крупнее кластеры, тем реже они встречаются, а значит тем менее вероятны реакции с ними).

Аналогичная картина наблюдается и в Fe при 900 К: после старения  $\chi^+(2) \approx 0,04$  (до старения  $\chi^+(2) = 0,20$ ). Несколько большее значение  $\chi^+(2)$  в Fe по сравнению с V обусловлено более высоким значением  $E^D$  для  $I_2$  в Fe, чем в V (1,0 эВ в Fe и 0,67 эВ в V).

В обоих рассматриваемых металлах  $V_2$  диссоциируют как минимум на порядок реже  $I_2$ , так как значения  $E^D$  и  $v_0^D$  для  $V_2$  соответственно выше и ниже, чем для  $I_2$ . Реакции диссоциации кластеров большего размера ещё более редки. Поэтому все они не оказывают заметного влияния на вид распределений  $\chi^\pm(n)$ .

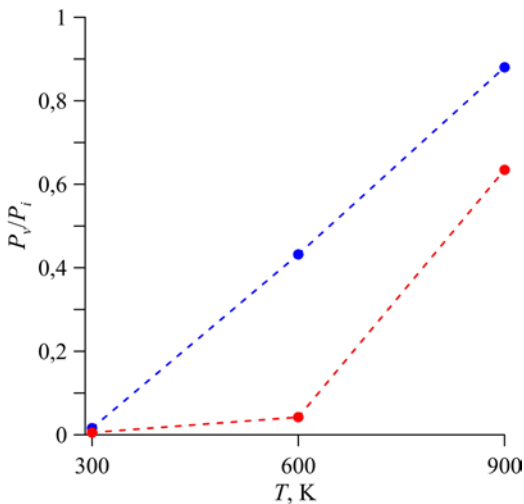


Рис. 5. Температурные зависимости  $P_v/P_i$  в Fe (●) и V (●)

**Роль диффузии вакансий.** Подвижность одиночных вакансий увеличивается с ростом  $T$ , что приводит к росту их кластеризации: фракция  $\chi^-(1)$  снижается с ростом  $T$ . Особенно это заметно для V, так как  $E^{AM}$  для  $V_1$  значительно ниже в V по сравнению с Fe (0,48 и 0,74 эВ соответственно). Введём обозначения: пусть  $P_v(P_i)$  — суммарное количество реакций между  $V_1$  и  $V_n$  ( $I_n$ ) с любыми  $n$  по всем ОКМК-расчётам для всех рассмотренных  $E^d$ , но при заданной  $T$ . Отношение  $P_v/P_i$  характеризует преобладающий тип реакций (рекомбинации или кластеризации) с участием  $V_1$ . Рассмотрим температурную зависимость  $P_v/P_i$  (рис. 5). С ростом  $T$  увеличивается число реакций между  $V_1$  и  $V_n$ , приводящих к укрупнению кластеров  $V_n$ , относительно числа рекомбинационных реакций с участием  $V_1$ . В Fe этот процесс интенсифицируется при  $T > 600$  К, а в V — при  $T > 300$  К (из-за

более низкого значения  $E^{AM}$  для  $V_1$  в V). Это приводит к тому, что значения  $\chi^-(3)$  и  $\chi^-(4)$  в V при 900 К после старения заметно превышают соответствующие значения до старения. Вид температурной зависимости  $P_v/P_i$  также объясняет особенности температурных зависимостей  $\chi^-(1)$  после старения: в V  $\chi^-(1)$  меняется от 0,46 до 0,3 с ростом  $T$  (см. рис. 4, б, з, е), а в Fe  $\chi^-(1) \approx 0,70$  при 300 и 600 К и  $\chi^-(1) \approx 0,47$  при 900 К (см. рис. 3, б, з, е).

**Роль механизма диффузии кластеров  $I_n$ .** Стоковые силы элементов микроструктуры для РД чувствительны к механизму диффузии РД [30]. Поэтому влияние одномерно мигрирующих кластеров СМА на эволюцию микроструктуры в процессе облучения может существенно отличаться от влияния кластеров с другими механизмами миграции. В связи с этим рассмотрим подробнее изменение доли СМА, содержащихся в кластерах с 1D-механизмом миграции, в процессе старения КАС.

В настоящей работе, как отмечалось ранее,  $I_{n \geq 6}$  мигрируют одномерно. Обозначим общую долю СМА, содержащихся в кластерах  $I_{n \geq 6}$ , как  $S$ . Значения  $S$  до и после старения КАС сведены в таблице. Видно, что старение приводит к заметному росту величины  $S$  для КАС с  $E^d \geq 10$  кэВ.

**Значения  $S$  (в %) при различных  $T, E^d$  в Fe и V до и после старения КАС**

Материал	$E^d$ , кэВ	300 К		600 К		900 К	
		до	после	до	после	до	после
Fe	1	0	0	0	0	0	0
	5	9,5	10,8	10,8	11,5	19,0	17,2
	10	16,0	19,2	13,3	19,5	23,8	24,5
	20	20,2	24,4	30,1	39,2	28,9	35,3
	50	23,1	33,2	30,5	40,7	36,2	43,0
V	1	0	0	0	0	0	0
	5	1,6	0,7	7,8	7,4	1,8	0,8
	10	1,7	1,9	3,7	6,4	2,3	4,0
	20	2,6	4,0	2,6	9,4	2,2	4,9
	50	3,9	6,2	3,2	14,5	3,3	11,4

В Fe с повышением  $T$  наблюдается увеличение конечных значений  $S$ , что объясняется увеличением исходных (до старения) значений  $S$ . В V с ростом  $T$  от 300 до 600 К также наблюдается увеличение конечных значений  $S$ , но исходные значения  $S$  с повышением  $T$  не увеличиваются. В этом случае рост  $S$  с  $T$  обусловлен увеличением коэффициентов диффузии  $I_1$  и  $I_2$  более чем на порядок [25, 26]. С повышением  $T$  от 600 до 900 К конечные значения  $S$  в V снижаются из-за интенсивной диссоциации  $I_2$  в процессе старения, что приводит к перекрытию части каналов образования кластеров  $I_{n \geq 6}$ .

Увеличение доли СМА, содержащихся в одномерно мигрирующих  $I_n$ , в процессе старения КАС в Fe при 600 и 900 К также отмечается в [15].

Известно, что константы реакций реагирующих дефектов сильно зависят от их механизмов диффузии [28]. Поэтому представляет интерес выяснить устойчивость полученных распределений  $\chi^+(n)$  к замене механизма диффузии для кластеров  $I_{3-5}$  со смешанного 1D/3D- на 3D-механизм. Для этого в Fe и V при 600 К было дополнительно проведено ОКМК-моделирование с модифицированными параметрами: частоты  $\nu^R$  для  $I_{3-5}$  приравнялись к  $\nu^R$  для  $I_2$  для обеспечения близости механизма диффузии  $I_{3-5}$  к чистому 3D-механизму диффузии [25, 26]. Для 3D-механизма диффузии  $I_{3-5}$  их константы реакции с прочими РД значительно выше, чем для 1D/3D-механизма. Это усиливает рекомбинационные процессы ( $\eta$  снижается на 5% относительно случая 1D/3D-механизма диффузии  $I_{3-5}$ ) и процессы объединения  $I_{3-5}$  между собой и с другими кластерами СМА. В результате значения  $\chi^+(3-5)$  снижаются (рис. 6). Распределения  $\chi^-(n)$  при этом практически не меняются. Сходное влияние смены механизма диффузии  $I_3$  с 1D на 3D на увеличение частоты реакций рекомбинации с участием  $I_3$  отмечается в [15].

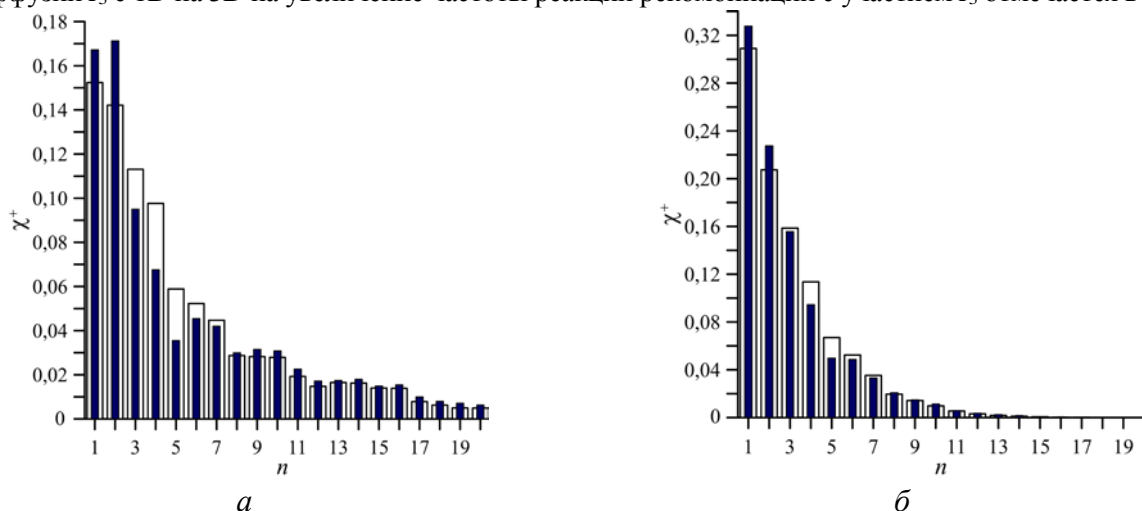


Рис. 6. Сравнение распределений  $\chi^+(n)$  для КАС с  $E^d = 50$  кэВ после старения для случаев смешанного 1D/3D- (□) и 3D-механизмов (■) диффузии  $I_{3-5}$  в Fe (а) и V (б) при 600 К

## 5. ВЫВОДЫ

Проведено моделирование старения каскадов атомных столкновений в ОЦК-металлах Fe и V с помощью объектного кинетического метода Монте-Карло с использованием начальных пространственных распределений РД, полученных в [20] методом молекулярной динамики. Рассчитаны значения каскадной эффективности  $\eta$  и распределения СТД по кластерам различного размера  $\chi^{\pm}(n)$  после старения (время старения 5 нс) для значений повреждающей энергии  $E^d$  каскада 1—50 кэВ и диапазона температуры  $T$  300—900 К.

В Fe при всех рассмотренных температурах значение  $\eta$  для каскадов с  $E^d \geq 20$  кэВ составляет 0,25 и 0,2 до и после старения соответственно. В V при 300 К значение  $\eta$  равно 0,26 и 0,23 до и после старения, а при  $T \geq 600$  К — 0,23 и 0,15 соответственно.

Выявлены механизмы эволюции дефектов в каскадной области, приводящие к изменениям распределения  $\chi^{\pm}(n)$  в процессе старения. При 300 К основной вклад в эти изменения вносят контролируемые диффузией межзельных РД реакции их объединения и рекомбинации с вакансионными РД. С ростом температуры дополнительный вклад в изменения вносят увеличение подвижности вакансий (при 900 К в Fe и 600—900 К в V) и рост частоты термической диссоциации димезузий (в Fe и V при 900 К). Продемонстрирована чувствительность распределений  $\chi^{\pm}(n)$  не только к коэффициентам диффузии РД, но и к механизмам диффузии кластеров СМА (1D, 3D, смешанный 1D/3D), что обуславливает важность правильного учёта механизмов диффузии кластеров СМА при моделировании.

Полученные в работе результаты важны для уточнения функции источника радиационных дефектов в физических моделях эволюции радиационной микроструктуры металлов, являющихся основой малоактивируемых конструкционных сталей и сплавов для термоядерных реакторов и гибридных систем «синтез—деление».

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 23-72-01090 (<https://rscf.ru/project/23-72-01090/>) и с использованием оборудования Центра коллективного пользования «Комплекс моделирования и обработки данных исследовательских установок мега-класса» НИЦ «Курчатовский институт» (<http://ckp.nrcki.ru/>).

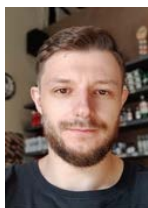
## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Norgett M.J., Robinson M.T., Torrens I.M.** A proposed method of calculating displacement dose rates. — Nucl. Eng. Des., 1975, vol. 33, p. 50—54; [https://doi.org/10.1016/0029-5493\(75\)90035-7](https://doi.org/10.1016/0029-5493(75)90035-7).
2. **Stoller R.E., Zarkadoula E.** Primary radiation damage formation in solids. — Comprehensive Nuclear Materials (Second Edition). Elsevier, 2020, p. 620—662; <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-803581-8.00661-5>.
3. **Was G.S.** Fundamentals of radiation materials science: metals and alloys. — Springer, 2016. 839 p.
4. **Nordlund K., Zinkle S.J., Sand A.E. et al.** Primary radiation damage: a review of current understanding and models. — J. Nucl. Mater., 2018, vol. 512, p. 450—479; <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2018.10.027>.
5. **Borodin V.** Molecular dynamics simulation of annealing of post-ballistic cascade remnants in silicon. — Nucl. Instrum. Meth. B, 2012, vol. 282, p. 33—37; <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2011.08.047>.
6. **Doran D.G.** Computer simulation of displacement spike annealing, Radiation Effects. — Radiation Effects, 1970, vol. 2, p. 249—267; <https://doi.org/10.1080/00337576908243987>.
7. **Красноштанов В.Ф., Коломыткин В.В.** Машинное моделирование процесса отжига дефектов в области каскада столкновений (бесструктурное приближение). Препринт ИАЭ-2244. — М.: ИАЭ, 1972. 29 с.
8. **Кеворкян Ю.Р., Афонин В.Е.** Машинное моделирование изотермического отжига каскадной области повреждения в альфа-железе (кристаллическая модель). Препринт ИАЭ-2510. — М.: ИАЭ, 1975. 22 с.
9. **Платонов П.А., Красноштанов В.Ф., Кеворкян Ю.Р.** Моделирование процессов образования и отжига дефектов в областях повреждения, создаваемых каскадами столкновения в альфа-железе. — Атомная энергия, 1975, т. 39, вып. 4, с. 260—264; [https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya\\_t39-4\\_1975/p260/](https://elib.biblioatom.ru/text/atomnaya-energiya_t39-4_1975/p260/).
10. **Wei L., Zhang C., Zheng Q., Zeng Z., Li Y.** Individual cascade annealing in BCC tungsten: effects of size and spatial distributions of defects. — RSC Advances, 2022, vol. 12, 23176; <https://doi.org/10.1039/d2ra04138c>.
11. **Nandipati G., Setyawan W., Heinisch H.L., Roche K.J., Kurtz R.J., Wirth B.D.** Displacement cascades and

- defect annealing in tungsten, Part II: Object kinetic Monte Carlo simulation of tungsten cascade aging. — *J. Nucl. Mater.*, 2015, vol. 462, p. 338—344; <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2014.09.067>.
12. **Mason D.R., Sand A.E., Dudarev S.L.** Atomistic-object kinetic Monte Carlo simulations of irradiation damage in tungsten. — *Model. Simul. Mater. Sci. Eng.*, 2019, vol. 27(5), 055003; <https://doi.org/10.1088/1361-651X/ab1a1e>.
  13. **Gao F., Bacon D.J., Barashev A.V., Heinisch H.L.** Kinetic Monte Carlo annealing simulation of damage produced by cascades in alpha-iron. — *MRS Proceedings*, 1998, vol. 540, p. 703—711; <https://doi.org/10.1557/PROC-540-703>.
  14. **Wirth B.D., Odette G.R.** Kinetic lattice Monte Carlo simulations of cascade aging in iron and dilute iron-copper alloys. — *MRS Proceedings*, 1998, vol. 540, p. 637—642; <https://doi.org/10.1557/PROC-540-637>.
  15. **Suzudo T., Golubov S.I., Stoller R.E., Yamaguchi M., Tomohito T., Kaburaki H.** Kinetic Monte Carlo annealing simulation of cascade damage in  $\alpha$ -Fe. — *Prog. Nucl. Sci. Techn.*, 2011, vol. 2, p. 56—63; <https://doi.org/10.15669/pnst.2.56>.
  16. **Suzudo T., Golubov S.I., Stoller R.E., Yamaguchi M., Tsuru T., Kaburaki H.** Annealing simulation of cascade damage in  $\alpha$ -Fe. — *J. Nucl. Mater.*, 2012, vol. 423, p. 40—46; <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2012.01.014>.
  17. **Alonso E., Caturla M.-J.** Simulation of damage production and accumulation in vanadium. — *J. Nucl. Mater.*, 2000, vol. 276, p. 221—229; [https://doi.org/10.1016/S0022-3115\(99\)00181-6](https://doi.org/10.1016/S0022-3115(99)00181-6).
  18. **Xiao W.-J., Wu G.-Y., Li M.-H., Deng H.-Q., Zhang W., Huai P., Hu W.-Y.** MD and OKMC simulations of the displacement cascades in nickel. — *Nucl. Sci. Techn.*, 2016, vol. 27(3), p. 57—62; <https://doi.org/10.1007/s41365-016-0057-y>.
  19. **Wu G.-Y., Hu N.-W., Deng H.-Q., Xiao S.-F., Hu W.-Y.** Simulation of radiation damages in molybdenum by combining molecular dynamics and OKMC. — *Nucl. Sci. Techn.*, 2016, vol. 28, p. 3; <https://doi.org/10.1007/s41365-016-0164-9>.
  20. **Сивак А.Б., Демидов Д.Н., Зольников К.П., Корчуганов А.В., Сивак П.А., Романов В.А., Чернов В.М.** Первичная радиационная повреждаемость в ОЦК-металлах Fe и V: анализ молекулярно-динамических данных. — *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2019, т. 100(4), с. 25—57; <https://elibrary.ru/item.asp?id=44630371>.
  21. **Романов В.А., Сивак А.Б., Чернов В.М.** Кристаллографические, энергетические и кинетические свойства собственных точечных дефектов и их кластеров в ОЦК-железе. 1. Полуэмпирическая модель ОЦК-железа и потенциал межатомного взаимодействия. — *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2006, т. 66(1), с. 129—150; <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=22614316>.
  22. **Романов В.А., Сивак А.Б., Сивак П.А., Чернов В.М.** Равновесные и диффузионные характеристики собственных точечных дефектов в ванадии. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2012, т. 35, вып. 2, с. 60—80; <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2012-35-2-60-80>.
  23. **Сивак А.Б., Романов В.А., Демидов Д.Н., Сивак П.А., Чернов В.М.** Потенциалы межатомного взаимодействия для моделирования каскадов атомных столкновений и собственных точечных дефектов в ОЦК-металлах Fe и V. — *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2019, т. 100(4), с. 5—24; <https://elibrary.ru/item.asp?id=44630370>.
  24. **Bortz A.B., Kalos M.H., Lebowitz J.L.** A new algorithm for Monte Carlo simulation of Ising spin systems. — *J. Comput. Phys.*, 1975, vol. 17(1), p. 10—18; [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(75\)90060-1](https://doi.org/10.1016/0021-9991(75)90060-1).
  25. **Сивак А.Б., Демидов Д.Н., Сивак П.А.** Диффузионные характеристики радиационных дефектов в железе: молекулярно-динамические данные. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2021, т. 44, вып. 2, p. 148—157; <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2021-44-2-148-157>.
  26. **Демидов Д.Н., Сивак А.Б., Сивак П.А.** Диффузионные характеристики кластеров собственных междоузельных атомов в ванадии: молекулярно-динамические данные. — *ФММ*, 2023, т. 124(5), с. 400—408; <https://doi.org/10.31857/S0015323023600132>.
  27. **Zinkle S.J., Snead L.L.** Designing radiation resistance in materials for fusion energy. — *Ann. Rev. Mat. Res.*, 2014, vol. 44, p. 241—267; <https://doi.org/10.1146/annurev-matsci-070813-113627>.
  28. **Adjanor G.** Complete characterization of sink-strengths for 1D to 3D mobilities of defect clusters: Bridging between limiting cases with effective sink-strengths calculations. — *J. Nucl. Mater.*, 2022, vol. 572(5), 154010; <https://doi.org/10.1016/j.jnucmat.2022.154010>.
  29. **Johnson R.A.** Interstitials and vacancies in  $\alpha$ -iron. — *Phys. Rev.*, 1964, vol. 134(5A), A1329—A1336; <https://doi.org/10.1103/PhysRev.134.A1329>.
  30. **Heinisch H.L., Singh B.N., Golubov S.I.** A kinetic Monte Carlo study of mixed 1D/3D defect migration. — *J. Comput. Aided Mater. Des.*, 1999, vol. 6(2/3), p. 277—282; <https://doi.org/10.1023/A:1008777901639>.

31. **Djurabekova F., Malerba L., Pasianot R.C., Olsson P., Nordlund K.** Kinetics versus thermodynamics in materials modeling: the case of the di-vacancy in iron. — *Philos. Mag.*, 2010, vol. 90(19), p. 2585—2595; <https://doi.org/10.1080/14786431003662515>.
32. **Сивак А.Б., Романов В.А., Чернов В.М.** Диффузионные характеристики собственных точечных дефектов в ОЦК-железе. — *Перспектив. материалы*, 2009, т. 6, с. 5—11; <https://elibrary.ru/item.asp?id=12975968>.
33. **Романов В.А., Сивак А.Б., Чернов В.М.** Кристаллографические, энергетические и кинетические свойства собственных точечных дефектов и их кластеров в ОЦК-железе. 4. Вакансионные кластеры. — *ВАНТ. Сер. Материаловедение и новые материалы*, 2006, т. 66(1), с. 188—201; <https://elibrary.ru/item.asp?id=22614322>.
34. **Soned N., de la Rubia T.D.** Defect production, annealing kinetics and damage evolution in  $\alpha$ -Fe: an atomic-scale computer simulation. — *Philos. Mag. A*, 1998, vol. 785, p. 995—1019; <https://doi.org/10.1080/01418619808239970>.
35. **Niessen A.K., de Boer F.R., Boom R., de Châtel P.F., Mattens W.C.M., Miedema A.R.** Model predictions for the enthalpy of formation of transition metal alloys II. — *Calphad*, 1983, vol. 7(1), p. 51—70; [https://doi.org/10.1016/0364-5916\(83\)90030-5](https://doi.org/10.1016/0364-5916(83)90030-5).
36. **Herbstein F.H., Smuts J.** Determination of Debye temperature of  $\alpha$ -iron by X-ray diffraction. — *Philos. Mag.*, 1963, vol. 8(87), p. 367—385; <https://doi.org/10.1080/14786436308211139>.
37. **Arblaster J.W.** Thermodynamic properties of vanadium. — *J. Ph. Equilibria Diffus.*, 2017, vol. 38(1), p. 51—64; <https://doi.org/10.1007/s11669-016-0514-7>.
38. **Демидов Д.Н., Сивак А.Б., Сивак П.А.** Термическая диссоциация димежузлий в ОЦК Fe и V: молекулярно-динамическое исследование. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2019, т. 42, вып. 2, с. 99; <https://doi.org/10.21517/0202-3822-2019-42-2-99-107>.
39. **ASTM E521-16**, Standard Practice for Investigating the Effects of Neutron Radiation Damage Using Charged-Particle Irradiation. ASTM International, West Conshohocken, PA, 2016, [www.astm.org](http://www.astm.org); <https://doi.org/10.1520/E0521-16>

НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия



Дмитрий Николаевич Демидов, научный сотрудник, к.ф.-м.н., лауреат премии имени И.В. Курчатова среди работ молодых научных сотрудников и инженеров-исследователей  
[Demidov\\_DN@nrcki.ru](mailto:Demidov_DN@nrcki.ru)



Александр Борисович Сивак, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.  
[Sivak\\_AB@nrcki.ru](mailto:Sivak_AB@nrcki.ru)

Статья поступила в редакцию 11 февраля 2025 г.

После доработки 2 апреля 2025 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

*Сер. Термоядерный синтез*, 2025, т. 48, вып. 2, с. 136—148.

УДК 621.039.61

## УДАЛЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ СТАЛИ ЭК-181 ПРИ ПЛАЗМЕННОМ ОБЛУЧЕНИИ

Т.А. Шишкова<sup>1,2</sup>, А.В. Голубева<sup>1</sup>, Н.О. Степанов<sup>1</sup>, Д.И. Черкез<sup>1</sup>, Н.П. Бобырь<sup>1</sup>, Д.А. Козлов<sup>1</sup>,  
В.М. Чернов<sup>3</sup>, М.Б. Розенкевич<sup>2</sup>

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, Россия

<sup>3</sup>АО «ВНИИИМ им. А.А. Бочвара», Москва, Россия

В настоящей работе исследовали изотопное замещение дейтерия протием в стали ЭК-181 при плазменном облучении. Образцы последовательно облучали дейтериевой и водородной плазмой до дозы  $1 \cdot 10^{25}$  ат./м<sup>2</sup> при 473 К и вытягивающем потенциале –100 В. Термодесорбционный анализ содержания дейтерия в образцах до и после воздействия протиевой плазмы показал, что после воздействия Н-плазмы количество дейтерия, определяемое десорбцией молекул HD и D<sub>2</sub> в процессе анализа, снизилось в ~25 раз.

Показано, что изотопное замещение дейтерия протием (H—D) при плазменном облучении — более эффективный способ удаления дейтерия из стали ЭК-181, чем прогрев в вакууме.

**Ключевые слова:** изотопы водорода, материалы термоядерного реактора, изотопный обмен, детритизация.

## REMOVAL OF DEUTERIUM FROM EK-181 STEEL BY PLASMA IRRADIATION

T.A. Shishkova<sup>1,2</sup>, A.V. Golubeva<sup>1</sup>, N.O. Stepanov<sup>1</sup>, D.I. Cherkez<sup>1</sup>, N.P. Bobyr<sup>1</sup>, D.A. Kozlov<sup>1</sup>,  
V.M. Chernov<sup>3</sup>, M.B. Rozenkevich<sup>2</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>Mendeleev University of Chemical Technology, Moscow, Russia

<sup>3</sup>A.A. Bochvar High-Technology Scientific Research Institute for Inorganic Materials, Moscow, Russia

In this work, the isotopic substitution of deuterium by protium in EK-181 steel under plasma irradiation was investigated. The samples were successively irradiated with deuterium and hydrogen plasma to a dose of  $1 \cdot 10^{25}$  at./m<sup>2</sup> at 473 K, bias voltage –100 V. Thermal desorption analysis of the deuterium retention in the samples before and after exposure to protium plasma showed that after exposure to H-plasma, the deuterium retention, determined by the desorption of HD and D<sub>2</sub> molecules during the analysis, decreased by ~25 times.

It is shown that the isotopic substitution of H—D under plasma irradiation is a more effective way to remove deuterium from EK-181 steel than heating in a vacuum.

**Key words:** hydrogen isotopes, fusion reactor materials, isotope exchange, tritium removal.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

В процессе эксплуатации термоядерного реактора (ТЯР) материалы вакуумной камеры будут контактировать с тяжёлыми изотопами водорода — дейтерием и тритием. Накопление трития в материалах вакуумной камеры может привести к выведению трития из полезного оборота и стать причиной нарушения безопасной эксплуатации реактора из-за потерь в окружающую среду. В области исследований взаимодействия изотопов водорода с кандидатными материалами ТЯР важным направлением является разработка и оценка эффективности методов извлечения трития из материалов с целью его последующего возврата в термоядерный топливный цикл.

Среди технологий детритизации в первую очередь рассматривают методы, основанные на удалении трития путём прогрева. Прогрев материала активизирует извлечение трития из ловушек кристаллической решётки и диффузию к поверхности материала из объёма. Далее путём вакуумной откачки или продувки инертным газом тритий удаляется с поверхности материала. Прогрев в условиях вакуумной откачки

является предпочтительным методом детритизации вакуумной камеры термоядерного реактора. Откачиваемая тритийсодержащая смесь газов, десорбирующихся из прогреваемых материалов, может быть направлена в системы топливного цикла для дальнейшей переработки. Прогрев в условиях продувки инертным газом рассматривают в проекте ТЯР ИТЭР для удаления трития из твёрдых отходов перед утилизацией: отжиг при температуре 800—1000 °С в потоке аргона с содержанием водорода не более 4% [1].

В проекте ИТЭР, несмотря на смену облицовочного материала первой стенки (бериллий заменён на вольфрам), прогрев дивертора и первой стенки остаётся одним из базовых методов детритизации. До перехода на полностью вольфрамовую облицовку предлагался прогрев первой стенки при 240 °С и дивертора при 350 °С [1, 2]. В настоящее время предлагается проводить прогрев основной камеры и дивертора при одинаковой температуре — 240 °С. Аргументы для такого решения приведены в обзоре [3].

В токамаке ИТЭР наряду с термодегазацией одним из ключевых методов детритизации вакуумной камеры является изотопный обмен [3]. Метод изотопного обмена применительно к детритизации камеры ТЯР основан на замещении в материале трития дейтерием при воздействии в виде газа или плазмы. В литературе представлен ряд отдельных работ, посвящённых исследованию изотопного замещения в металлах и сплавах как при выдержке в газообразной атмосфере водорода [4—8], так и при плазменном или ионном облучении [9—12]. В ИТЭР детритизация методом изотопного обмена будет проводиться в условиях ионно-циклотронного кондиционирования первой стенки (ion cyclotron wall conditioning — ICWC) и плазменных разрядов [3]. Технологии детритизации, выбранные для проекта ИТЭР, были протестированы на установке JET с бериллием и вольфрамом в качестве обращённых к плазме материалов [13].

Сталь ЭК-181 относится к классу малоактивируемых ферритно-мартенситных сталей, рассматриваемых в качестве кандидатных материалов blankets в термоядерных реакторах [14]. Эти стали отвечают требованию быстрого спада наведённой активности и характеризуются низким распуханием под воздействием нейтронов [15]. Изучению детритизации сталей этого класса методом изотопного обмена посвящено небольшое количество работ. Например, в работах [8, 16] исследовался изотопный обмен в китайских ферритно-мартенситных сталях CLAM и CLF-1. Большинство работ по тематике изотопного обмена посвящено материалам облицовки первой стенки. Исследований по изотопному обмену водорода в стали ЭК-181 ранее не проводилось.

Ввиду сложности работы с радиоактивными веществами число работ по исследованию замещения трития в материалах дейтерием ограничено. Применимость изотопного обмена как метода детритизации может оцениваться на основании результатов, полученных для пары H—D.

Цель настоящей работы — исследование изотопного замещения дейтерия водородом для стали ЭК-181 при плазменном облучении.

## 2. МАТЕРИАЛ

Основные элементы, входящие в состав стали ЭК-181, представлены в таблице.

Состав стали ЭК-181 (мас. %)

Элемент	Содержание	Элемент	Содержание
Ni	0,03	Cr	12
C	0,16	Mn	0,6
N	0,07	Ta	0,15
Si	0,4	W	1,09
Ti	0,05	Fe	Основа
V	0,4		

Образцы стали были вырезаны из цилиндрического штабика путём электроэрозионной резки и механически отполированы с двух сторон до зеркального блеска с постепенным уменьшением зернистости

полировальной суспензии до 0,04 мкм, после чего размер образцов составил  $\sim 10 \times 10 \times 0,5$  мм. Отполированные образцы очищались в ацетоне в ультразвуковой ванне, а также прогревались в вакууме при температуре 773 К в течение 2 ч с целью частичной релаксации напряжений, созданных полировкой.

### 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ СТЕНДЫ

Образцы стали ЭК-181 последовательно облучали дейтериевой и протиевой плазмой на стенде ПИМ (плазменный источник магнитный), схема и описание установки представлены в [17]. Плазменный источник позволяет получать низкотемпературную плазму с температурой электронов  $T_e \sim 3\text{--}5$  эВ и температурой ионов  $T_i \sim 0,4$  эВ. Измеренное ранее с помощью времяпролётного масс-анализатора [17] соотношение ионов в плазме  $\text{H}_3^+ : \text{H}_2^+ : \text{H}^+ = 7 : 2 : 1$  предполагалось и для потоков ионов дейтерия на образцы в ходе облучения. При расчёте интегральной дозы облучения также учитывается и поток нейтральных атомов, доля которого к потоку ионов, падающих на образец, составляет согласно оценкам до  $\sim 30\%$  [17]. В используемом в работе держателе (диаметр цилиндрической части 35 мм) может быть закреплено до пяти образцов размером  $10 \times 10$  мм одновременно. Образцы прижимаются к медному основанию при помощи молибденовой маски. Маска закрывает не более 10% площади образца. В ходе облучения температура контролируется с помощью хромель-алюмелевой термопары на поверхности медной подложки, изолированной от остальной части держателя, что позволяет прикладывать к сборке из образцов вытягивающий потенциал до  $-600$  В. Медное основание держателя с обратной стороны оборудовано изолированным омическим нагревателем из вольфрамовой проволоки и экранировано фольгой из стали 12Х18Н10Т для снижения тепловпотерь вовне.

Уникальная черта стенда ПИМ — относительно большой ( $\varnothing 150$  мм) размер области однородной плазмы, ввиду чего установленные в держатель образцы облучаются при одинаковой плотности потока частиц на поверхность (неоднородность  $< 5\%$ ). В данной работе во всех случаях на держатель образцов подавали отрицательный потенциал смещения 100 В, определяющий энергию ионов, бомбардирующих поверхность. Полное количество ионов, поступающих на образцы за время облучения, определялось по измерению тока ионов, вытянутых из плазмы, с последующим пересчётом в поток атомов на поверхность. Согласно оценкам, поток ионов и атомов при облучении дейтерием составлял  $(2,0\text{--}2,1)10^{20}$  ат.  $\text{D}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ , при облучении водородом —  $(2,3\text{--}2,4)10^{20}$  ат.  $\text{H}/(\text{с}\cdot\text{м}^2)$ .

Термодесорбционный (ТДС) анализ проводили на специализированном высоковакуумном стенде. Загрузка образцов осуществлялась через шлюзовую камеру, отсекаемую от основного объёма пневматической шиберной задвижкой. Остаточное давление в основной камере составляло  $\sim 10^{-7}$  Па. Скорость нагрева образцов из стали ЭК-181 составляла 0,5 К/с, максимальная температура нагрева в ходе ТДС-анализа не превышала 1270 К. Для уменьшения влияния фоновых сигналов и повышения точности ТДС-анализ проводился дважды. Повторный ТДС-анализ считался фоновым (дегазация со стенок камеры, колбы) и вычитался из первого спектра термодесорбции. Далее в работе все ТДС-спектры представлены с учётом вычета фоновых сигналов, регистрируемых при повторном прогреве. Парциальные давления газов, десорбирующихся из образца, регистрировались с помощью квадрупольного масс-спектрометра Microvision 2 (MKS Instruments).

Дейтерий десорбировался из образцов стали ЭК-181 в составе молекул  $\text{D}_2$  (4 а.е.м.), HD (3 а.е.м.), HDO (19 а.е.м.) и  $\text{D}_2\text{O}$  (20 а.е.м.). После каждого эксперимента при помощи течи известной проводимости осуществлялась калибровка квадрупольного масс-спектрометра по потокам газов  $\text{H}_2$ ,  $\text{D}_2$ . Калибровочный коэффициент для потока HD рассчитывался как среднее арифметическое между калибровочными коэффициентами для газов  $\text{D}_2$  и  $\text{H}_2$ . Ввиду сложности определения калибровочных коэффициентов для молекул HDO и  $\text{D}_2\text{O}$  учёт выхода дейтерия в составе тяжёлой воды является одним из проблемных вопросов в обработке результатов ТДС-измерений. В рамках данной работы калибровка квадрупольного масс-спектрометра по потокам HDO (19 а.е.м.) и  $\text{D}_2\text{O}$  (20 а.е.м.) не проводилась. Без учёта вклада молекул тяжёлой воды результаты измерения общего количества десорбированного дейтерия из насыщенных дейтерием образцов, не подвергавшихся изотопному обмену, занижены, по нашим оценкам, не более чем на  $\sim 30\%$ . В образцах, подвергавшихся изотопному обмену, вклад десорбции в

составе воды выше. В настоящей работе для расчёта потоков дейтерия в составе HDO и D<sub>2</sub>O использовались калибровочные коэффициенты для HD и D<sub>2</sub> соответственно. Рассчитанные потоки десорбции в виде HDO и D<sub>2</sub>O являются оценочными, но могут быть использованы для сравнения выхода дейтерия в составе воды из разных образцов. В литературе подобные допущения о калибровочных коэффициентах для HDO и D<sub>2</sub>O зачастую делаются при расчётах выхода дейтерия в составе тяжёлой воды. В [18] чувствительность по парам воды H<sub>2</sub>O, HDO и D<sub>2</sub>O принималась равной чувствительности по D<sub>2</sub>. В [19] коэффициенты чувствительности для H<sub>2</sub>O, HDO и D<sub>2</sub>O также считали равными, при этом принималось, что коэффициенты для H<sub>2</sub>O и H<sub>2</sub> отличаются в ~2 раза.

#### 4. ОПИСАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

В ходе экспериментов по изотопному замещению пять образцов стали ЭК-181 облучили дейтериевой плазмой до дозы  $1 \cdot 10^{25}$  ат. D/м<sup>2</sup> при приложении к держателю вытягивающего потенциала –100 В и температуре 473 К. Далее три из пяти образцов использовали для ТДС-анализа содержания дейтерия после облучения дейтериевой плазмой. Два образца дополнительно облучили водородной плазмой до той же дозы ( $1 \cdot 10^{25}$  ат. H/м<sup>2</sup>) при температуре 473 К, после чего также определили содержание дейтерия в них методом ТДС. Временная шкала проведения экспериментов с образцами, насыщенными из плазмы, представлена на рис. 1.

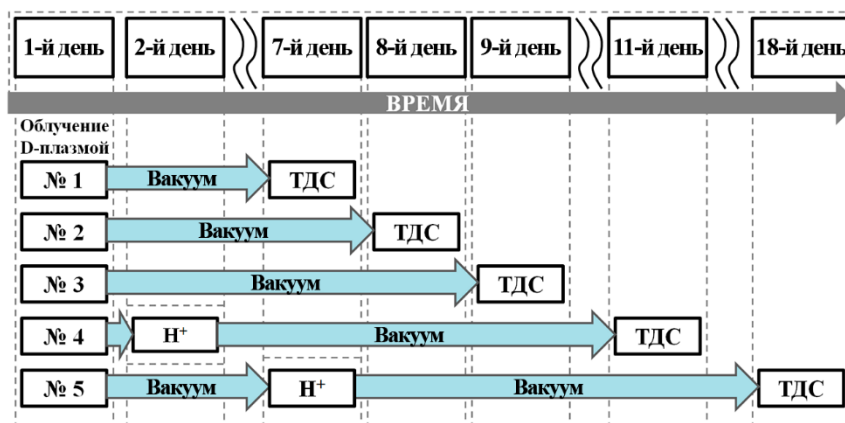


Рис. 1. Временная шкала проведения экспериментов с образцами, насыщенными дейтерием из плазмы

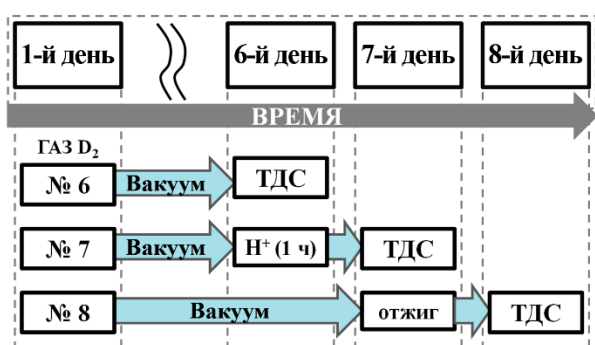


Рис. 2. Временная шкала проведения экспериментов с образцами, насыщенными дейтерием из газа

образца в вакууме при 473 К осуществляли в держателе стенда ПИМ. Камера, в которой размещался держатель с образцом, непрерывно откачивалась турбомолекулярным и форвакуумным насосами, давление в камере не превышало  $10^{-6}$  мбар. Содержание дейтерия в образцах после плазменного облучения и после прогрева в вакууме также определяли методом термодесорбции. Последовательность экспериментов представлена на рис. 2.

Поскольку процесс изотопного замещения проводился при повышенной температуре образцов (473 К), необходимо оценить вклад в него термодезгазации. Для этого два образца одновременно насытили в газообразном дейтерии при температуре 473 К и давлении 0,5 МПа в течение 25 ч. После насыщения дейтерием один образец облучали водородной плазмой при температуре 473 К, другой выдерживали в вакууме при этой же температуре. Длительность выдержки в вакууме и длительность плазменного облучения составляли 1 ч. Интегральная доза при облучении H-плазмой в течение 1 ч составила  $5,7 \cdot 10^{23}$  ат. H/м<sup>2</sup>. Выдержку

Между процессами введения дейтерия в образец и ТДС-анализом все образцы хранили в высоком вакууме ( $\sim 10^{-6}$  Па) для уменьшения потерь дейтерия за счёт изотопного обмена с атмосферными газами. После облучения образцы кратковременно контактировали с атмосферой во время установки в камеру стенда непосредственно перед проведением ТДС-анализа.

## 5. РЕЗУЛЬТАТЫ

ТДС-спектры трёх образцов (№ 1, 2, 3), облучённых дейтериевой плазмой, показаны на рис. 3. На рис. 3, *а* показаны ТДС-спектры дейтерия, десорбирующегося в составе молекул  $D_2$  (4 а.е.м.) и HD (3 а.е.м.), на рис. 3, *б* — в составе молекул HDO (19 а.е.м.) и  $D_2O$  (20 а.е.м.). Между процессом насыщения дейтерием и ТДС-анализом эти образцы хранились в вакууме в течение 6, 7 и 8 дней. Как видно из рисунка, ТДС-спектры трёх образцов очень близки. Во всех случаях дейтерий десорбировался преимущественно в составе молекул  $D_2$ , количество десорбировавшегося дейтерия в составе HD на порядок ниже. Расхождение в интегральном количестве дейтерия, десорбировавшегося в виде  $D_2$ , не превышает 4%, в виде HD — 17%. На спектрах наблюдается один пик  $D_2$  с максимумом при температуре  $\sim 600$  К. Десорбция дейтерия в составе молекул HD начинается позднее по сравнению с выходом  $D_2$ . Максимум десорбционного пика HD приходится на  $\sim 630$  К.

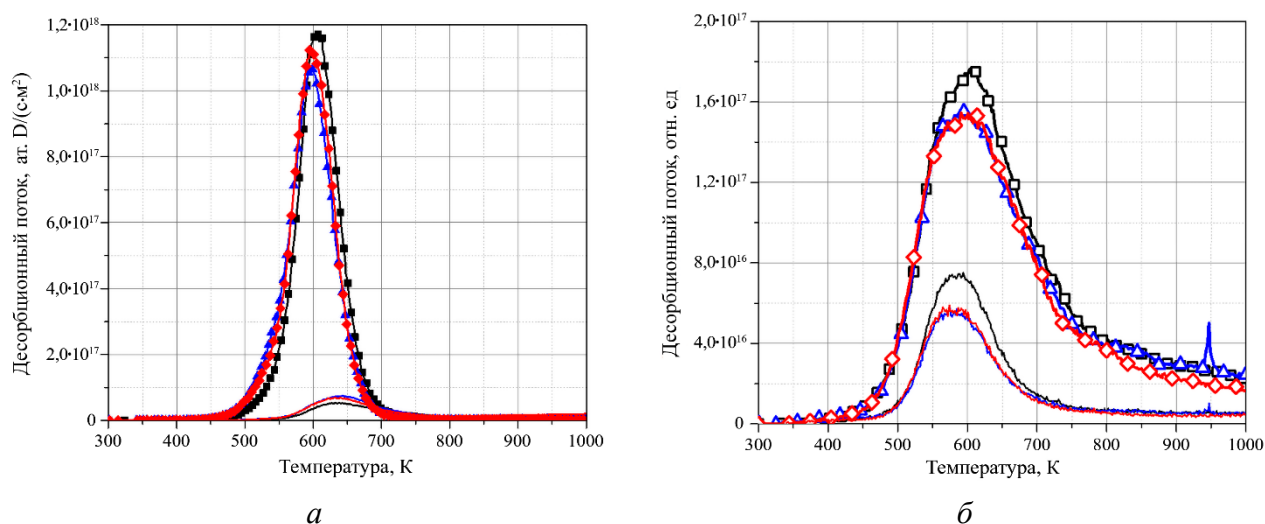


Рис. 3. ТДС-спектры дейтерия, десорбирующегося: *а* — в составе молекул  $D_2$  (4 а.е.м.) и HD (3 а.е.м.) (№ 1 (6 дней в вакууме): ■ —  $D_2$ , — — HD; № 2 (7 дней в вакууме): ▲ —  $D_2$ , — — HD; № 3 (8 дней в вакууме): ◆ —  $D_2$ , — — HD); *б* — в составе молекул HDO (19 а.е.м.) и  $D_2O$  (20 а.е.м.) из образцов сталей после насыщения дейтерием из плазмы (№ 1 (6 дней в вакууме): □ — HDO, — —  $D_2O$ ; № 2 (7 дней в вакууме): △ — HDO, — —  $D_2O$ ; № 3 (8 дней в вакууме): ◇ — HDO, — —  $D_2O$ )

Два образца стали ЭК-181, насыщенные дейтерием из плазмы, далее облучили H-плазмой до интегральной дозы  $1 \cdot 10^{25}$  ат./м<sup>2</sup> при температуре 473 К (см. рис. 1). Образец № 4 облучался H-плазмой на следующий день после насыщения, образец № 5 — на 7-й день. Между процессами облучения H-плазмой и ТДС-анализа образцы хранились в вакууме в течение 8 дней (№ 4) и 11 дней (№ 5). ТДС-спектры для двух образцов, облучённых H-плазмой, практически одинаковы. На рис. 4 представлено сравнение спектров десорбции дейтерия из образца, облучённого D-плазмой (образец № 1), и образцов, облучённых последовательно D- и H-плазмой.

На рис. 5 показано интегральное количество дейтерия, десорбировавшегося из образцов в составе молекул  $D_2$ , HD, HDO и  $D_2O$ . При расчёте десорбционных потоков калибровочные коэффициенты для HDO и  $D_2O$  принимались равными калибровочным коэффициентам HD и  $D_2$ . Из этого допущения следует, что для образцов № 1, 2 и 3 после облучения D-плазмой ( $1 \cdot 10^{25}$  D/м<sup>2</sup>) суммарный вклад молекул

тяжёлой воды  $\text{HDO}$  и  $\text{D}_2\text{O}$  в общее количество десорбированного дейтерия составляет 30—35%. Необходимо принять во внимание, что поскольку реальные значения калибровочных коэффициентов для  $\text{HDO}$  и  $\text{D}_2\text{O}$  могут отличаться, то величина вклада тяжёлой воды в десорбцию дейтерия является оценочной.

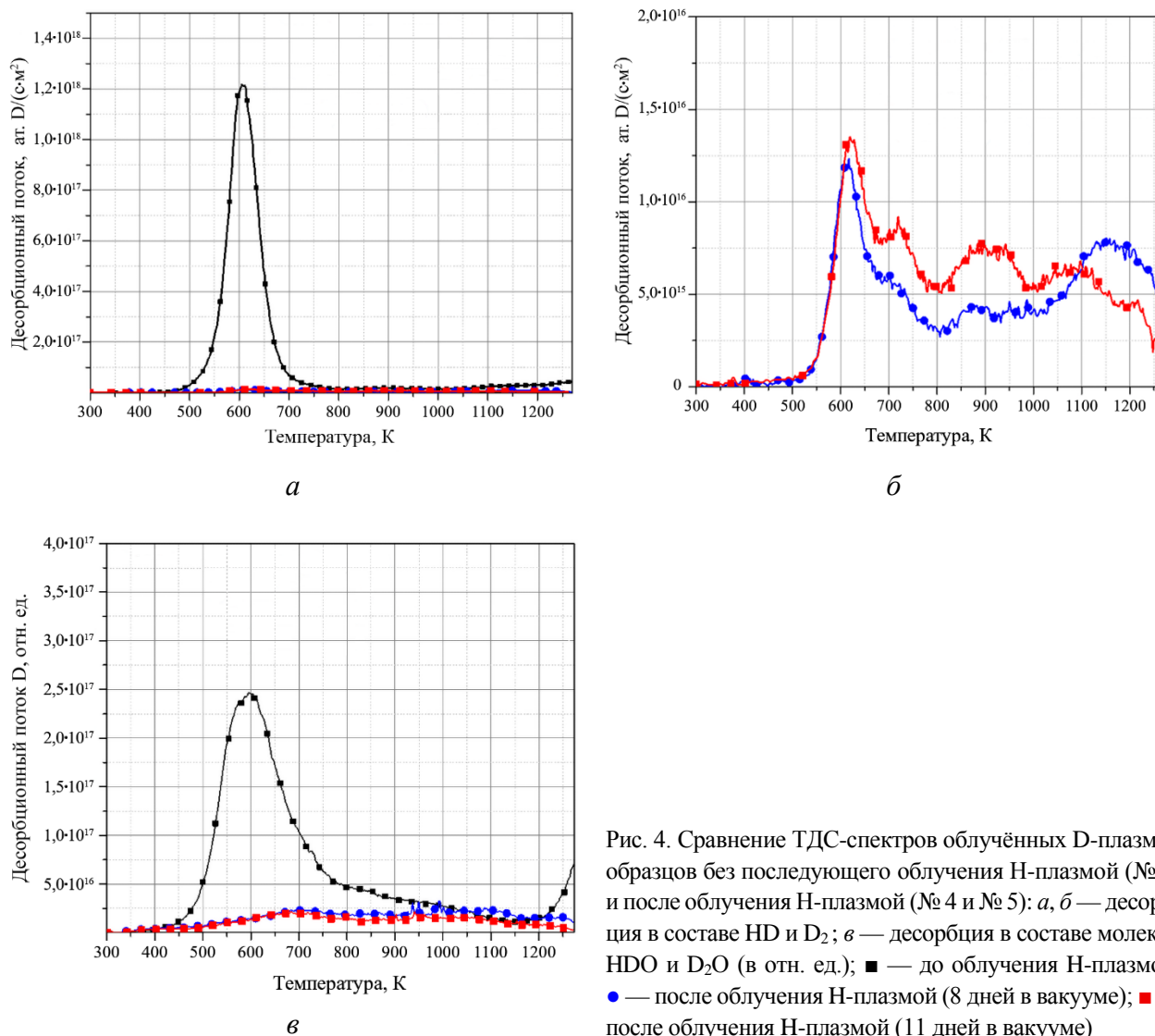


Рис. 4. Сравнение ТДС-спектров облучённых D-плазмой образцов без последующего облучения H-плазмой (№ 1) и после облучения H-плазмой (№ 4 и № 5): а, б — десорбция в составе HD и  $\text{D}_2$ ; в — десорбция в составе молекул  $\text{HDO}$  и  $\text{D}_2\text{O}$  (в отн. ед.); ■ — до облучения H-плазмой; ● — после облучения H-плазмой (8 дней в вакууме); ■ — после облучения H-плазмой (11 дней в вакууме)

После облучения H-плазмой количество дейтерия, десорбированного суммарно в составе  $\text{D}_2$  и HD, снизилось в среднем приблизительно в 25 раз.

Поскольку облучение H-плазмой проводилось при температуре 473 K, необходимо оценить, какой вклад в извлечение дейтерия вносит десорбция дейтерия, вызванная нагревом образца. Для оценки вклада нагрева в извлечение дейтерия при облучении плазмой использовали образцы, насыщенные из газа (схема эксперимента на рис. 2, описание эксперимента приведено в конце раздела 4).

На ТДС-спектре, полученном после насыщения образца из газа (рис. б), наблюдается один пик выхода дейтерия в виде молекул  $\text{D}_2$  с максимумом при температуре 573 K. Для сравнения, характерный пик дейтерия на спектре образца, насыщенного из D-плазмы, наблюдался при 600 K. После насыщения из газа дейтерий десорбируется из образца преимущественно в составе  $\text{D}_2$ .

На рис. 7 представлены спектры термодесорбции дейтерия из трёх образцов: после насыщения из газа (473 K, 25 ч, 0,5 МПа), после выдержки в вакууме в течение 1 ч, после облучения H-плазмой в течение 1 ч (до дозы  $5,7 \cdot 10^{23}$  ат.  $\text{H}/\text{м}^2$ ).

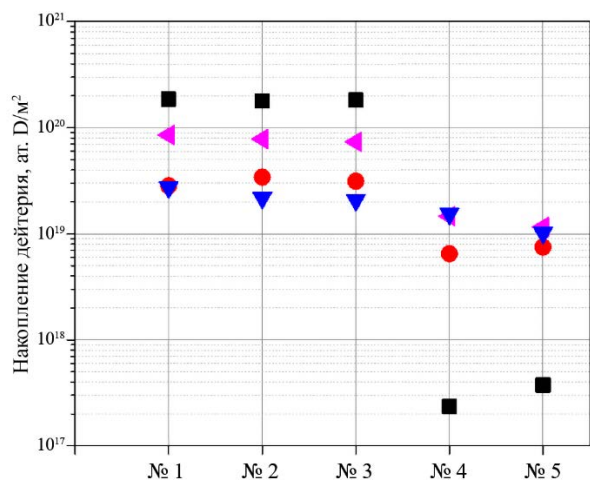


Рис. 5. Интегральное количество дейтерия, десорбированного в составе  $D_2$  (■), HD (●), HDO (▲) и  $D_2O$  (▼) из образцов после облучения D-плазмой (№ 1, 2, 3) и после последовательного облучения D- и H-плазмой (№ 4, 5)

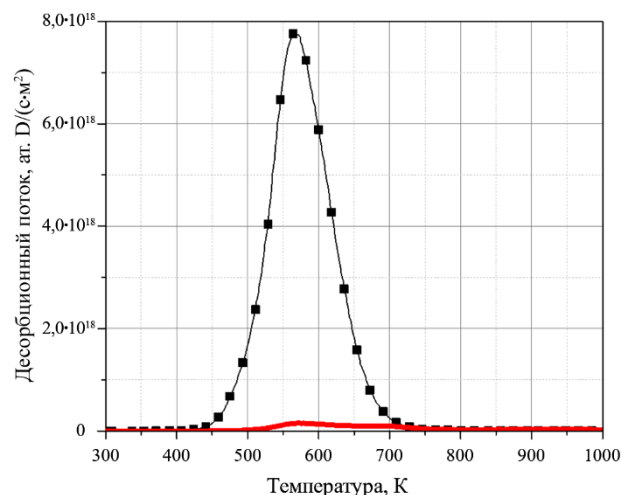
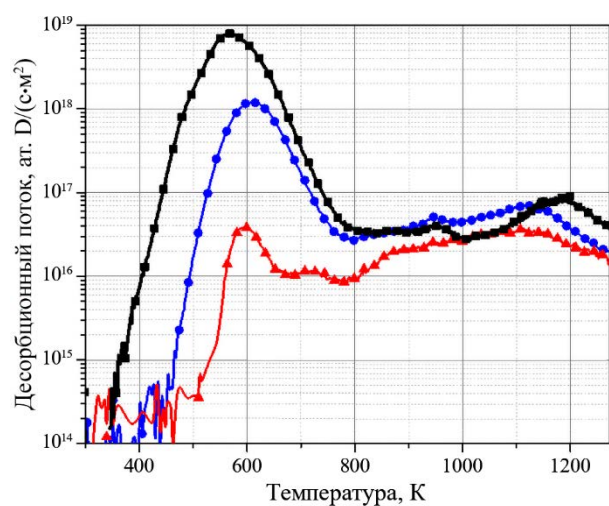
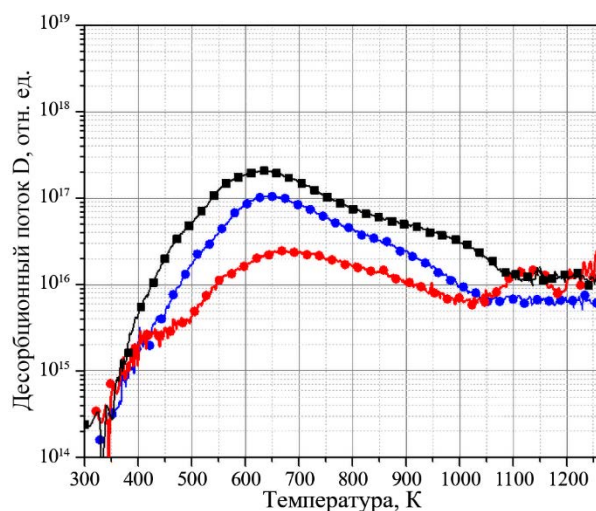


Рис. 6. ТДС-спектры дейтерия, десорбирующегося в виде молекул  $D_2$  (4 а.е.м.) (■) и HD (3 а.е.м.) (—) из образца стали ЭК-181 после насыщения дейтерием из газа



*a*



*б*

Рис. 7. ТДС-спектры дейтерия, десорбирующегося из образцов стали ЭК-181 после насыщения дейтерием, выдержки в вакууме и облучения H-плазмой: *a* — в составе молекул  $D_2$  (4 а.е.м.) и HD (3 а.е.м.); *б* — в составе молекул  $D_2O$  (20 а.е.м.) и HDO (19 а.е.м.); ■ — накопление дейтерия после насыщения из газа (№ 6); после извлечения дейтерия: ● — выдержка в вакууме (№ 8), ▲ — облучение H-плазмой (№ 7)

После выдержки в вакууме основная часть дейтерия десорбируется из образца в составе молекул  $D_2$ , после облучения H-плазмой — в виде молекул HD. Характерный пик  $D_2$  наблюдается при температуре  $\sim 600$  K после выдержки в вакууме. На спектре образца после облучения H-плазмой наблюдается при этой же температуре максимум пика HD.

На рис. 8 показано сравнение интегрального количества дейтерия, десорбированного из всех исследуемых образцов в составе молекул  $D_2$ , HD, HDO и  $D_2O$ . Интегральное количество дейтерия, десорбированного в составе  $D_2$ , для образца, насыщенного из газа (№ 6), выше почти на порядок (в виде HD — выше в 2 раза) по сравнению с образцами, насыщенными из плазмы (№ 1—3).

Из рис. 8 видно, что выход дейтерия в составе молекул  $D_2O$  слабо изменяется после облучения H-плазмой и после прогрева в вакууме, так как сигнал  $D_2O$  близок к уровню фонового сигнала.

Для насыщенного из газа образца (№ 6) вклад десорбции в виде тяжёлой воды незначителен (не более ~6%). По интегральному количеству десорбированных молекул  $D_2$  и HD можно оценить снижение содержания дейтерия за счёт облучения Н-плазмой (1 ч) и нагрева в вакууме (1 ч). Облучение Н-плазмой (473 К, 1 ч) привело к снижению десорбированного  $D_2$  на ~3 порядка, выдержка в вакууме при тех же условиях — в ~7 раз. Десорбция дейтерия в составе HD после облучения Н-плазмой снизилась в 3 раза, после выдержки в вакууме — на 28%.

Таким образом, изотопное замещение D—H при плазменном облучении — более эффективный способ удаления дейтерия из стали ЭК-181, чем прогрев. Можно предположить, что облучение D-плазмой также окажется более эффективным для удаления трития из стенки.

На рис. 9 представлены спектры десорбции  $H_2$  (2 а.е.м.) из некоторых исследованных образцов. После облучения Н-плазмой независимо от дозы облучения и способа насыщения дейтерием на ТДС-спектрах при температуре, близкой к 573 К, наблюдается пик протия, который отсутствует на спектрах для образцов, не облучавшихся Н-плазмой. На спектрах десорбции дейтерия из образцов без изотопного замещения (см. рис. 3) при температуре 600 К наблюдался пик десорбции дейтерия. Поскольку характерные пики протия и дейтерия наблюдаются при близких температурах, можно заключить, что протий занимает в стали позиции, в которых ранее находился дейтерий. Высокие десорбционные потоки водорода в высокотемпературной области спектра, вероятно, не связаны с выделением водорода из образцов. Поскольку водород — доминирующий компонент остаточного газа в высоковакуумных установках, он присутствует повсеместно в материалах и на поверхностях, окружающих образец.

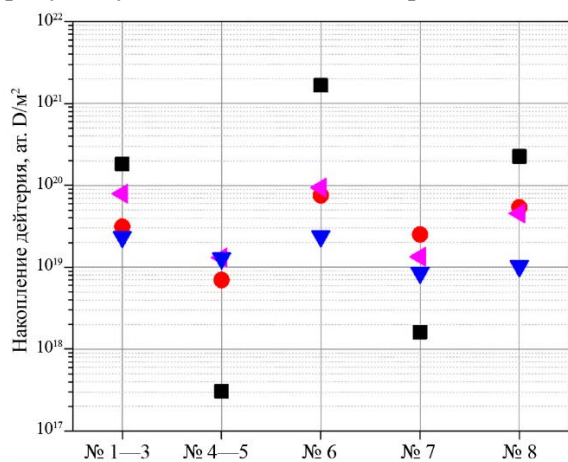


Рис. 8. Интегральное количество дейтерия, десорбированного в составе  $D_2$  (■), HD (●), HDO (▲) и  $D_2O$  (▼) из образцов после облучения D-плазмой (усреднённые значения для № 1, 2, 3), после последовательного облучения D- и H-плазмой (№ 4, 5), после насыщения дейтерием из газа (№ 6), после насыщения дейтерием из газа и последующего облучения Н-плазмой в течение 1 ч (№ 7), после насыщения дейтерием из газа и отжига в вакууме в течение 1 ч (№ 8)

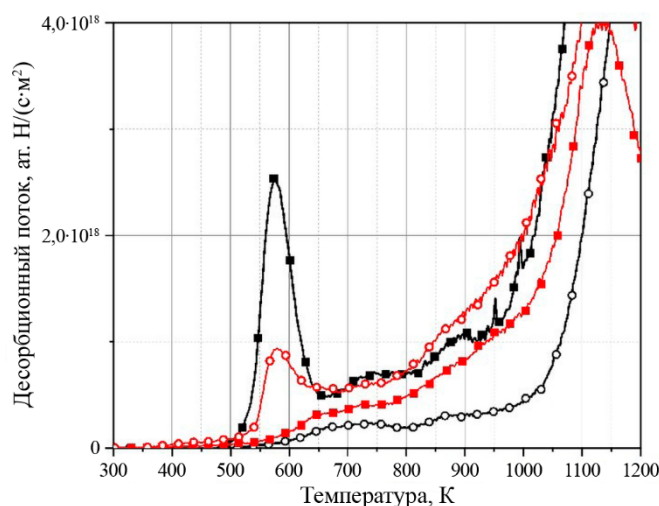


Рис. 9. Сравнение ТДС-спектров  $H_2$  (2 а.е.м.), десорбирующегося из образцов без облучения Н-плазмой и после облучения Н-плазмой: ○ — облучение D-плазмой (без облучения Н-плазмой); ■ — облучение Н-плазмой после облучения D-плазмой; ■ — нагрев в вакууме (1 ч) после насыщения из газа; ○ — облучение Н-плазмой (1 ч) после насыщения из газа

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе исследовали изотопное замещение дейтерия протием в стали ЭК-181 при плазменном облучении. Образцы последовательно облучали дейтериевой и водородной плазмой до дозы  $1 \cdot 10^{25}$  ат./м² при 473 К при величине вытягивающего потенциала –100 В. ТДС-анализ содержания дейтерия в образцах до и после воздействия протиевой плазмы показал, что после воздействия Н-плазмы количество дейтерия, определяемое десорбцией молекул HD и  $D_2$  в процессе анализа, снизилось в ~25 раз.

Чтобы разделить эффект прогрева при 473 К и облучения Н-плазмой при 473 К, образцы насыщали в газообразном D<sub>2</sub>, после чего один образец нагревали в вакууме при 473 К в течение 1 ч, другой облучали в плазме при 473 К в течение 1 ч. После облучения водородной плазмой в течение 1 ч при 473 К содержание дейтерия существенно ниже по сравнению с образцом, выдержанным в вакууме при тех же условиях: выход дейтерия в виде D<sub>2</sub> ниже на два порядка, в виде HD — ниже в ~2 раза.

В работе показано, что изотопное замещение D—H при плазменном облучении — более эффективный способ удаления дейтерия из стали ЭК-181, чем прогрев в вакууме. Можно предположить, что облучение D-плазмой также окажется более эффективным для удаления трития из стенки.

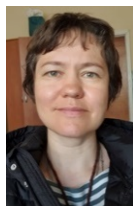
Данная работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 8 «Физика изотопов водорода».

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Rosanvallon S., Benchikhoun M., Ciattaglia S. et al.** Management of Tritium in ITER Waste. — *Fusion Science and Technology*, 2011, vol. 60, № 3, p. 855—860; doi: 10.13182/FST11-A12553.
2. **De Temmerman G., Baldwin M.J., Anthoine D. et al.** Efficiency of thermal outgassing for tritium retention measurement and removal in ITER. — *Nuclear Materials and Energy*, 2017, vol. 12, p. 267—272; doi: 10.1016/j.nme.2016.10.016.
3. **Pitts R.A., Loarte A., Wauters T. et al.** Plasma-wall interaction impact of the ITER re-baseline. — *Nuclear Materials and Energy*, 2025, vol. 42, p. 101854.
4. **Nobuta Y., Hatano Y., Torikai Y., Nakayama M.** Effects of baking in deuterium atmosphere on tritium removal from tungsten. — *Fusion Engineering and Design*, 2018, vol. 136, p. 674—677.
5. **Nobuta Y., Hatano Y., Lee S.E., Nakayama M.** Hydrogen isotope exchange in tungsten during heating in hydrogen isotope gas atmosphere. — *Fusion Engineering and Design*, 2020, vol. 157, p. 111703.
6. **Крат С.А., Васина Я.А., Пришвицын А.С. и др.** Замещение тяжёлых изотопов водорода в вольфрамовых слоях при выдержке в газе. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2020, т. 43, вып. 3, с. 71—78.
7. **Ahlgren T., Jalkanen P., Mizohata K., Tuboltsev V. et al.** Hydrogen isotope exchange in tungsten during annealing in hydrogen atmosphere. — *Nucl. Fusion*, 2019, vol. 59, p. 026016.
8. **Wang Zh., Chen C.A., Xiang X. et al.** Trace tritium removal in China reduced activation ferritic-martensitic steels through thermal desorption with/without hydrogen isotope exchange. — *Fusion Engineering and Design*, 2019, vol. 149, p. 111330.
9. **Alimov V.Kh., Tyburska-Püschel B. et al.** Hydrogen isotope exchange in tungsten irradiated sequentially with low-energy deuterium and protium ions. — *Phys. Scr.*, 2011, vol. 145, p. 014037.
10. **Roth J., Schwarz-Selinger T., Alimov V.Kh., Markina E.** Hydrogen isotope exchange in tungsten: Discussion as removal method for tritium. — *J. of Nuclear Materials*, 2013, vol. 432, № 1—3, p. 341—347.
11. **Watanabe T., Kaneko T., Matsunami N. et al.** In-situ measurement of deuterium retention in W under plasma exposure. — *J. of Nuclear Materials*, 2015, vol. 463, p. 1049—1052; doi: 10.1016/j.jnucmat.2012.08.004.
12. **Takagi I., Nomura S., Minamimoto T. et al.** Hydrogen–deuterium exchange on plasma-exposed W and SS surface. — *J. of Nuclear Materials*, vol. 463, p. 1125—1128; doi: 10.1016/j.jnucmat.2014.11.037.
13. **Matveev D., Douai D., Wauters T. et al.** Tritium removal from JET-ILW after T and D—T experimental campaigns. — *Nucl. Fusion*, 2023, vol. 63, p. 112014; doi: 10.1088/1741-4326/acf0d4.
14. **Tanigawa H., Shiba K., Möslang A. et al.** Status and key issues of reduced activation ferritic/martensitic steels as the structural material for a DEMO blanket. — *J. of Nuclear Materials*, 2011, vol. 417, № 1—3, p. 9—15.
15. **Компаниец Т.Н.** К проблеме выбора сталей для реактора ДЕМО. — *ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез*, 2009, вып. 3, с. 16—24.
16. **Wang Zh., An Chen Ch., Song Ya. et al.** Deuterium retention removal in China reduced activation ferritic-martensitic steels through thermal desorption and hydrogen isotope exchange. — *Fusion Eng. Des.*, 2018, vol. 126, p. 139.
17. **Голубева А.В., Черкез Д.И., Спицын А.В., Янченков С.В.** Установка для исследования проницаемости материалов при плазменном облучении. — *Приборы и техника эксперимента*, 2017, № 6, с. 67—77.
18. **Крат С.А., Пришвицын А.С., Сорокин И.А. и др.** Сравнение удержания дейтерия в вольфрамовых пленках различной толщины. — *Ядерная физика и инжиниринг*, 2024, т. 15(3), с. 218—223; <https://doi.org/10.56304/S207956292303020X>. EDN: WFT.
19. **Zhao M., Jacob W., Gao L. et al.** Deuterium retention behavior of pure and Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-doped tungsten investigated by nuclear reaction analysis and thermal desorption spectroscopy. — *Nuclear Materials and Energy*, 2018, vol. 15, p. 32—42.



Татьяна Александровна Шишкова, инженер-исследователь; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия; аспирант; РХТУ им. Д.И. Менделеева, 125047, Москва, Миусская пл., д. 9, Россия  
Anfimova\_TA@nrcki.ru



Анна Владимировна Голубева, начальник лаборатории, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
Golubeva\_AV@nrcki.ru



Никита Олегович Степанов, младший научный сотрудник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
Stepanov\_NO@nrcki.ru



Дмитрий Ильич Черкез, старший научный сотрудник, к.ф.-м.н.; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
Cherkez\_DI@nrcki.ru



Николай Павлович Бобырь, заместитель начальника отдела; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
Bobyrg\_NP@nrcki.ru



Дмитрий Алексеевич Козлов, научный сотрудник; НИЦ «Курчатовский институт», 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1, Россия  
Kozlov\_DAI@nrcki.ru



Вячеслав Михайлович Чернов, главный научный сотрудник, д.ф.-м.н., профессор; АО «ВНИИНМ А.А. Бочвара», 123060, Москва, ул. Рогова, д. 5а, Россия  
VMChernov@bochvar.ru



Михаил Борисович Розенкевич, профессор, д.х.н.; РХТУ им. Д.И. Менделеева, Москва, 12504, Миусская пл. д. 9, Россия  
rozenkevich.m.b@muctr.ru

Статья поступила в редакцию 30 октября 2024 г.

После доработки 15 ноября 2024 г.

Принята к публикации 18 апреля 2025 г.

Вопросы атомной науки и техники.

Сер. Термоядерный синтез, 2025, т. 48, вып. 2, с. 149—158.

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЗОРЫ

*Четкин Е.И., Шишкин А.Г.* Машинное обучение в задачах управляемого термоядерного синтеза. 5

### ИТЭР

*Рыбиков А.А., Кузнецов Н.А., Литуновский Н.В., Маханько А.Н., Пискарев П.Ю., Еремкин А.В., Богданов И.П., Кузнецов В.Е., Володин А.В., Архипов Н.И.* Определение предельно допустимых дефектов при пайке вольфрам-медных облицовочных плиток обращенных к плазме элементов центральной сборки дивертора токамака ИТЭР ..... 19

*Фридрихсен Д.С., Немцев Г.Е., Кормилицын Т.М., Обудовский С.Ю., Панкратенко А.В., Самойленко М.С., Степанов С.Б.* Испытания ионизационных камер деления, модернизированных для регистрации термоядерных нейтронов ..... 33

### ТРТ

*Миронов М.И., Афанасьев В.И., Гончаров П.Р., Мельник А.Д., Наволоцкий А.С., Несеневич В.Г., Петров М.П., Петров С.Я., Чернышев Ф.В., Шмитов Р.Ю.* Возможности корпускулярной диагностики для исследования дейтериево-водородной плазмы на установке ТРТ ..... 40

*Павлова Г.С., Тугаринов С.Н., Кузьмин Н.В., Серов В.В.* Концепция вертикальной системы наблюдения для диагностики «активная спектроскопия» на установке ТРТ ..... 48

*Кондрашов В.Н., Родионов Н.Б., Родионов Д.С., Докука В.Н., Хайрутдинов Р.Р., Аникин А.С., Семенов А.А., Лизунов А.В., Букин А.Н., Карпов Д.А.* Обращение с тритием в комплексе токамака с реакторными технологиями ..... 57

*Раздобарин А.Г., Елец Д.И., Букреев И.М., Дмитриев А.М., Медведев О.С., Мухин Е.Е., Снигирев Л.А., Толстяков С.Ю.* Молибденовые лазерные зеркала для диагностических систем токамака ТРТ ..... 71

### Т-11М

*Васина Я.А., Лазарев В.Б., Мирнов С.В., Щербак А.Н., Джигайло Н.Т., Зорин А.В., Пришвицын А.С.* Ресурсные испытания вертикального литиевого лимитера с внешней подачей лития на токамаке Т-11М ..... 78

### КТМ

*Крат С.А., Чектыбаев Б.Ж., Батырбеков Э.Г., Сорокин И.А., Лузанов В.А., Соларевич Т., Довганюк С.С., Гаспарян Ю.М., Тажбаева И.Л., Кашикбаев Е.А., Ольховик Д.А., Бакланов В.В., Коянбаев Е.Т.* Диагностика долговременной эрозии и осаждения материала первой стенки токамака КТМ: апробация и первые результаты ..... 88

### ПЛМ

*Федорович С.Д., Дедов А.В., Аристов А.И., Будаев В.П.* Динамика жидкометаллических капель при инжекции в плазму в установке ПЛМ ..... 99

### КСПУ

*Мамонов А.А., Гуторов К.М., Лазукин А.В., Климов Н.С.* Архитектура системы управления, сбора и архивации данных, обеспечивающая функционирование квазистационарного высоко-точного плазменного ускорителя в импульсно-периодическом режиме ..... 111

### ДИАГНОСТИКИ

*Иванов Н.В., Какурин А.М.* Применение преобразования Стоквелла для анализа экспериментальных данных МГД-диагностики в токамаке ..... 124

### ПЛАЗМА—СТЕНКА И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ УТС

*Демидов Д.Н., Сивак А.Б.* Моделирование старения каскадов атомных столкновений в ОЦК Fe и V объектным кинетическим методом Монте-Карло ..... 136

*Шишкова Т.А., Голубева А.В., Степанов Н.О., Черкез Д.И., Бобырь Н.П., Козлов Д.А., Чернов В.М., Розенкевич М.Б.* Удаление дейтерия из стали ЭК-181 при плазменном облучении ..... 149

## CONTENTS

### Reviews

<i>Chetkin E.I., Shishkin A.G.</i> Machine learning applied to problems of nuclear fusion .....	5
---	---

### ITER

<i>Rybikov A.A., Kuznetsov N.A., Litunovsky N.V., Makhankov A.N., Piskarev P.Yu., Eremkin A.V., Bogdanov I.P., Kuznetsov V.E., Volodin A.V., Arkhipov N.I.</i> Determination of maximum permissible defect during brazing of tungsten-copper armour tiles for ITER divertor dome plasma-facing units .....	19
<i>Fridrikhsen D.S., Nemtsev G.E., Kormilitsyn T.M., Obudovsky S.Yu., Pankratenko A.V., Samoilenko M.S., Stepanov S.B.</i> Tests of fission ionization chambers upgraded to register thermonuclear neutrons .....	33

### TRT

<i>Mironov M.I., Afanasyev V.I., Goncharov P.R., Melnik A.D., Navolotsky A.S., Nesenevich V.G., Petrov M.P., Petrov S.Ya., Chernyshev F.V., Shmitov R.Yu.</i> Use of neutral particle diagnostics for deuterium-hydrogen plasma research in TRT facility .....	40
<i>Pavlova G.S., Tugarinov S.N., Kuzmin N.V., Serov V.V.</i> The concept of a vertical observation system for cxrs diagnostics at the TRT tokamak .....	48
<i>Kondrashov V.N., Rodionov N.B., Rodionov D.S., Dokuka V.N., Khairutdinov R.R., Anikin A.S., Semenov A.A., Lizunov A.V., Bukin A.N., Karpov D.A.</i> Tritium handling in the tokamak complex with reactor technologies .....	57
<i>Razdobarin A.G., Elets D.I., Bukreev I.M., Dmitriev A.M., Medvedev O.S., Mukhin E.E., Snigirev L.A., Tolstyakov S.Yu.</i> Molybdenum laser mirrors for diagnostic systems of TRT tokamak .....	71

### T-11M

<i>Vasina Ya.A., Lazarev V.B., Mirnov S.V., Shcherbak A.N., Djigailo N.T., Zorin A.V., Prishvitsyn A.S.</i> Lifetime testing of the vertical lithium limiter with external lithium supply on T-11M tokamak .....	78
--	----

### KTM

<i>Krat S.A., Chektybaev B.Zh., Batyrbekov E.G., Sorokin I.A., Luzanov V.A., Solarevich T., Dovganyuk S.S., Gasparyan Yu.M., Tazhibaeva I.L., Kashikbaev E.A., Olkhovik D.A., Koyanbayev Ye.T., Baklanov V.V.</i> KTM tokamak first-wall material long-term erosion and deposition diagnostics: approximation and first results .....	88
---	----

### PLM

<i>Fedorovich S.D., Dedov A.V., Aristov A.I., Budaev V.P.</i> The dynamics of liquid metal droplets during their injection in plasma of PLM installation .....	99
--	----

### QSPA

<i>Mamonov A.A., Gutorov K.M., Lazukin A.V., Klimov N.S.</i> Control, acquisition and archiving system architecture for the operation of quasi-stationary high-current plasma accelerator in pulse-periodic mode .....	111
--	-----

### Diagnostics

<i>Ivanov N.V., Kakurin A.M.</i> Application of the Stockwell transform for analysis of the tokamak MHD diagnostics experimental data .....	124
---	-----

### Plasma—wall and materials for CTF

<i>Demidov D.N., Sivak A.B.</i> Modelling of collision cascades aging in BCC Fe and V using object kinetic Monte Carlo method .....	136
<i>Shishkova T.A., Golubeva A.V., Stepanov N.O., Cherkez D.I., Bobyr N.P., Kozlov D.A., Chernov V.M., Rozenkevich M.B.</i> Removal of deuterium from EK-181 steel by plasma irradiation .....	149

Вопросы атомной науки и техники  
Серия: Термоядерный синтез  
Том 48, выпуск 2

Ответственные за выпуск А.Б. Кукушкин, Л.К. Кузнецова  
Редактор Н.В. Бокша. Компьютерная вёрстка Л.К. Кузнецова, Л.Г. Николаева. Корректор Н.В. Бокша.  
Программист-переводчик И.В. Скорюпина. IT-инженер Е.Н. Николаев.

Подписано в печать 07.11.2025. Формат 60×90/8  
Печать цифровая. Усл. печ. л. 20,0. Уч.-изд. л. 21,5. Тираж 110. Индекс 3648. 14 статей. Заказ 45  
Адрес редакции: Россия, 123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1  
Отпечатано в Национальном исследовательском центре «Курчатовский институт»

123182, Москва, пл. Академика Курчатова, 1

