



Сборник тезисов докладов  
Пятнадцатой Международной школы  
молодых ученых и специалистов  
имени А. А. Курдюмова.  
Окуловка, 03–09 июля 2022 г.

Book of abstracts at the  
Fifteenth International School  
for young scientists named after  
A. A. Kurdyumov.  
Okulovka, 03 July–09 July, 2022

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА  
С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ.  
IHISM '22 JUNIOR**

**INTERACTION OF HYDROGEN ISOTOPES  
WITH STRUCTURAL MATERIALS.  
IHISM '22 JUNIOR**

**IHISM '22 Junior**

НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ ИНСТИТУТ»  
ГОСКОРПОРАЦИЯ «РОСАТОМ»  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
NRC «KURCHATOV INSTITUTE»  
STATE CORPORATION FOR ATOMIC ENERGY «ROSATOM»  
RFNC-VNIEF

**Сборник тезисов докладов  
Пятнадцатой Международной Школы  
молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова.  
IHISM'22 Junior**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА  
С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ**

Окуловка, 03–09 июля 2022 г.



**Book of abstracts at the Fifteen International School  
for young scientists named after A. A. Kurdyumov.  
IHISM'22 Junior**

**INTERACTION OF HYDROGEN ISOTOPES  
WITH STRUCTURAL MATERIALS**

Okulovka, 03–09 July, 2022

**Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'22 Junior.** Сборник тезисов Пятнадцатой Международной Школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова. Под ред. доктора технических наук А. А. Юхимчука – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2022.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на Пятнадцатую Международную Школу молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова. «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'22 Junior». Материалы представлены по следующим темам: кинетика и термодинамика взаимодействия изотопов водорода с твердыми телами, включая эффекты радиогенного гелия; механические свойства и структурные превращения конструкционных материалов в среде водорода; гидриды и гидридные превращения; аппаратура и методы исследования.

**Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials. IHISM'22 Junior.** The Book of Abstracts at the Fifteen International School for young scientists named after A. A. Kurdyumov. Edited by Dr. A. A. Yukhimchuk – Sarov: RFNC-VNIIEF, 2022.

The Book contains the abstracts of presentations at the Fifteen International School for young scientists named after A. A. Kurdyumov «Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials. IHISM'22 Junior». The abstracts concern the following topics: kinetics and thermodynamics of the interaction of hydrogen isotopes with solids, including the effects of radiogenic helium; mechanical properties and structural transformations of structural materials in a hydrogen environment; hydrides and hydride transformations; equipment and research methods.

Печатается с оригинальных текстов авторов  
Printed using the original texts by the authors

Составители:

А. В. Бучирин, Н. Ю. Туманова

Compilers:

A. V. Buchirin, N. Yu. Tumanova

**Организаторы:**

НИЦ «Курчатовский институт»

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Росатом

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Национальный Центр Физики и Математики (НЦФМ)



РОСАТОМ



Н Ц Ф М

**Sponsors:**

NRC «Kurchatov institute»

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

State corporation for atomic energy

FSUE «Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics» (FSUE «RFNC-VNIIEF»)

National Centre for Physics and Mathematics

---

## Международный программный комитет

### **Сопредседатели:**

Илькаев Р. И. – почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ;  
Ковальчук М. В. – президент НИЦ «Курчатовский институт»

### **Заместители сопредседателей:**

Воронин В. В. – д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Россия;  
Хвостенко П. П. – д.т.н., НИЦ «Курчатовский институт», Россия;  
Юхимчук А.А. – д.т.н., РФЯЦ-ВНИИЭФ, Россия

### **Члены комитета:**

Алексеев И. А. – к.т.н., НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ, Россия;  
Беграмбеков Л. Б. – проф., НИЯУ МИФИ, Россия;  
Вербецкий В. Н. – проф., МГУ, Россия;  
Денисов Е. А. – к.ф.-м.н., доцент СПбГУ, Россия;  
Заика Ю. В. – д.ф.-м.н., «КарНЦ РАН», Россия;  
Калин Б. А. – проф., НИЯУ МИФИ, Россия;  
Кутеев Б. В. – д.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт», Россия;  
Лифшиц А. И. – проф., СПбГУТ, Россия;  
Магомедбеков Э. П. – к.х.н., РХТУ, Россия;  
Нецкина О. В. – к.х.н., ИК СО РАН, Россия  
Писарев А. А. – проф., НИЯУ МИФИ;  
Постников А. Ю. – к.т.н., РФЯЦ-ВНИИЭФ, Россия;  
Тажибаева И. Л. – проф., ИАЭ НЯЦ РК, Казахстан;  
Хапов А. С. – к.т.н., ВНИИА им. Н.Л. Духова, Россия

### **Секретарь:**

Голубева Анна Владимировна – к.ф.-м.н., НИЦ «Курчатовский институт»,  
Россия, тел. +7 499 196 7100 (#6117), e-mail: Golubeva\_AV@nrcki.ru

## Организационный комитет

### **Сопредседатели:**

Камболов М. А. (НИЦ «Курчатовский институт»);  
Горчаков С. Е. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Москалев О. А. (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

### **Заместители сопредседателей:**

Алексеев И. А., НИЦ «Курчатовский институт» - ПИЯФ;  
Бондаренко С. Д. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Максимкин И. П. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);  
Спицын А. В. (НИЦ «Курчатовский институт»)

### **Члены комитета:**

Ананьев С. С. (НИЦ «Курчатовский институт»);  
Анфимова Т. А. (НИЦ «Курчатовский институт»);  
Береснёв А. А. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Биниенко К. А. (НИЦ «Курчатовский институт»);  
Бучирин А. В. (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»);  
Бобырь Н. П. (НИЦ «Курчатовский институт»);  
Калоева Е. В. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Кузнецов В. П. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Новосельцев Д. С. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Петрова Н. Ю. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Русяева К. А. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Поляков М. С. (НИЦ «Курчатовский институт»);  
Сенягина М. Н. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);  
Титорчук И. Г. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Феоктистова И. С. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);  
Чубова Н. М. (НИЦ «Курчатовский институт»);  
Шека С. А. (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ);  
Юхимчук А. А. (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»).

### **Секретарь:**

Абрамец Владислава Владимировна (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ), т. 8 (81371) 4 68-17, e-mail: abramets\_vv@pnpi.nrcki.ru  
Калоева Екатерина Витальевна (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ), т. 8 (81371) 3-20-39, e-mail: kaloeva\_ev@pnpi.nrcki.ru

**Тематика Школы**

- Кинетика и термодинамика взаимодействия изотопов водорода с твердыми телами, включая эффекты радиогенного гелия.
- Механические свойства и структурные превращения конструкционных материалов в среде водорода.
- Гидриды и гидридные превращения.
- Аппаратура и методы исследования.

---

## **International Program Committee**

### **Organizing Committee**

#### **Co-Chairs:**

Ilkaev R. I. – Honorary Scientific Director of the RFNC-VNIIEF;

Kovalchuk M. V. – President of SIC «Kurchatov Institute»

#### **Deputy Co-Chairs:**

Voronin V. V. – Doctor of Ph.D., SIC «Kurchatov Institute» – PIAF, Russia;

Khvostenko P. P. – Doctor of Technical Sciences, SIC «Kurchatov Institute», Russia;

Yukhimchuk A. A. – Doctor of Technical Sciences, RFNC-VNIIEF, Russia

#### **Members of the Committee:**

Alekseev I. A. – Candidate of Technical Sciences, SIC «Kurchatov Institute» – PIAF, Russia;

Begrambekov L. B. – Professor, NRU MEPhI, Russia;

Verbetsky V. N. – Professor, Moscow State University, Russia;

Denisov E. A. – Ph.D., Associate Professor of St. Petersburg State University, Russia;

Zaika Yu. V. – Doctor of Ph.D., «KarSC RAS», Russia;

Korobtsev S. V. – Ph.D., Research Center «Kurchatov Institute», Russia;

Kuteev B. V. – Doctor of Ph.D., SIC «Kurchatov Institute», Russia;

Lifshits A. I. – Professor, SPbSUT, Russia;

Magomedbekov E. P. – Ph.D., RCTU, Russia;

Netskina O. V. – PhD, IC SB RAS, Russia

Pisarev A. A. – prof., NRU MEPhI;

Postnikov A. Yu. – Candidate of Technical Sciences, RFNC-VNIIEF, Russia;

Tazhibayeva I. L. – prof., IAE NNC RK, Kazakhstan;

Fateev V. N. – Doctor of Chemical Sciences, Professor, SIC «Kurchatov Institute», Russia;

Khapov A. S. – Candidate of Technical Sciences, N. L. Dukhov VNIIA, Russia

Yatsishina E. B. – Deputy Director for Scientific Work of the Kurchatov Institute Research Center, Russia.

#### **Secretary:**

Golubeva Anna Vladimirovna – Ph.D., Research Center «Kurchatov Institute», vol. 8 499 196 7100 (#6117) e-mail: Golubeva\_AV@nrcki.ru

#### **School topics:**

- Kinetics and thermodynamics of the interaction of hydrogen isotopes with solids, including the effects of radiogenic helium.
- Mechanical properties and structural transformations of structural materials in a hydrogen environment.
- Hydrides and hydride transformations.
- Equipment and research methods.

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В 2022 году мы проводим уже 15-ую Международную Школу по тематике «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM Junior». Следует отметить, что решение о проведении Международной Школы было принято в 2004 году в г. Саров в ходе Второго международного семинара с одноименным названием. Первые Международные Школы IHISM Junior были проведены в 2005 и 2006 годах на базе учебного центра «Урозеро» Карельского Государственного университета под Петрозаводском (председатель локального организационного комитета профессор Ю. В. Заика) и стали очень популярны в среде молодых ученых, занимающихся водородной тематикой. С 2008 года Школа носит имя великого ученого и организатора, профессора Санкт-Петербургского Государственного университета А. А. Курдюмова, стоявшего у истоков ее организации. Фиксированного места проведения Школы не существует – ее организаторами сразу же был выбран передвижной стиль проведения Школы. За это время Школа проводилась: в Петрозаводске (2005, 2006 и 2016 гг.), в Санкт-Петербурге (2007 г.), на теплоходе «Георгий Жуков» (2008 и 2012 г.), в Сарове (2009, 20014 и 2019 гг.), в Воронеже (2010 г.), в Звенигороде (2011 г.), в Москве (2015 г.), Протвино (2017 г.) и Гатчине (2021 г.).

На 15-й Международной Школе «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'22 Junior» будут представлены общеобразовательные и специальные лекции ведущих специалистов, а также доклады молодых ученых по широкому кругу вопросов, связанных с тематикой Школы.

Оргкомитет благодарит за помощь в организации конференции и спонсорскую поддержку ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» и Госкорпорацию «Росатом», Национальный центр физики и математики (НЦФМ), НИЦ «Курчатовский институт», Санкт – Петербургский институт ядерной физики (НИЦ «Курчатовский институт – ПИЯФ») за активное участие в организации Школы.

Желаем Вам успешной плодотворной работы, интересных встреч, приятного и полезного общения.

Оргкомитет

## FOREWORD

In 2022, The International school for young scientists «Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials. IHISM Junior» is already held for the 15<sup>th</sup> time.

It should be noted that the decision to hold the International school was made in 2004 in Sarov during the Second International Seminar of the same name. The first IHISM Junior International Schools were held in 2005 and 2006 on the basis of «Urozero» training center of Karelian State University near Petrozavodsk (chairman of the local organizing committee Professor Yu. V. Zaika) and became very popular among young scientists engaged in hydrogen topics. Since 2008, the School has been named after the great scientist and organizer Professor of St. Petersburg State University A. A. Kurdyumov being the institutor of its organization. There is no fixed location to hold the School – its organizers immediately chose the mobile style of holding the School. Over this period, the School was held: in Petrozavodsk (2005, 2006 and 2016), in Saint-Petersburg (2007), on the motor ship «Georgy Zhukov» (2008 and 2012), in Sarov (2009, 20014 and 2019), in Voronezh (2010), in Zvenigorod (2011), in Moscow (2015), in Protvino (2017) and in Gatchina (2021).

General and special lectures of leading specialists, as well as reports of young scientists on wide range of topics of the School will be presented at the 15<sup>th</sup> «Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials. IHISM Junior» International School.

The organizing committee thanks FSUE «RFNC-VNIIEF» and Rosatom State Corporation, the National Center for Physics and Mathematics (NCPM), National Research Center «Kurchatov Institute», Saint-Petersburg Institute of nuclear physics (NRC «Kurchatov Institute») for the assistance in organizing the conference and sponsorship support.

We wish you every success and efficient work, exciting meetings, pleasant and useful communications.

Organizing Committee

## СОДЕРЖАНИЕ

## CONTENTS

### **Общеобразовательные лекции**

#### **General lectures**

##### **A1. Юхимчук А. А.**

Научная программа проекта «Физика изотопов водорода»  
национального центра физики и математики ..... 24

*Yukhimchuk A. A.*

Scientific program of the «hydrogen isotopes physics» project  
of the national center for physics and mathematics ..... 25

##### **A2. Кутеев Б. В.**

Большой срыв в токамаках: физика и технологии смягчения  
Последствий ..... 27

*Kuteev B. V.*

Disruption in tokamaks: physics and mitigation technologies ..... 27

##### **A3. Коробцев С. В.**

Водородная энергетика ..... 28

*Korobtsev S. V.*

Hydrogen Energy ..... 28

##### **A4. Воронин В. В.**

Реакторный комплекс пик ..... 29

### **1. Кинетика и термодинамика взаимодействия**

#### **изотопов водорода с твердыми телами, включая эффекты радиоактивного гелия**

#### **1. Kinetics and thermodynamics of the interaction of hydrogen isotopes with solids, including the effects of radiogenic helium**

##### **В1. Денисов Е.**

Методы определения содержания и подвижности водорода  
в материалах ..... 32

*Denisov E.*

The methods for determining the hydrogen content and mobility  
in materials ..... 33

**В2. Голубева А. В.**

Взаимодействие изотопов водорода с материалами  
термоядерных реакторов ..... 35

*Golubeva A. V.*

Hydrogen isotopes interaction with materials of fusion reactors ..... 36

**В3. Крат С. А., Васина Я. А., Пришвицын А. С., Попков А. С.,  
Гаспарян Ю. М., Писарев А. А.**

Содержание дейтерия в соосажденных из плазмы литиевых слоях  
и способы его удаления из них ..... 38

*Krat S. A., Vasina Ya. A., Prishvitsyn A. S., Popkov A. S.,  
Gasparyan Yu. M., Pisarev A. A.*

Deuterium accumulation and removal from Li-D co-deposited layers ..... 40

**В4. Заика Ю. В.**

Оценка параметров быстрой водородопроницаемости сплава В1  
в эксперименте тройного прорыва ..... 42

*Zaika Yu. V.*

A estimation of the quick hydrogen permeability parameters  
for В1-alloy in triple breakthrough experiment ..... 42

**С1. Аскербеков С. К., Кульсартов Т. В., Заурбекова Ж. А.,  
Гордиенко Ю. Н., Понкратов Ю. В.**

Результаты реакторного эксперимента по исследованию параметров  
взаимодействия изотопов водорода с литиевой КПС ..... 43

*Askerbekov S. K., Kulsartov T. V., Zaurbekova Zh. A., Gordienko Yu. N.,  
Ponkratov Yu. V.*

Results of the reactor experiment to study the interaction parameters  
of hydrogen isotopes with lithium CPS ..... 44

**С2. Кулагин В. В., Гаспарян Ю. М.**

Моделирование лазерно-индуцированной десорбции водорода  
с поверхности вольфрама и бериллия ..... 46

*Kulagin V. V., Gasparyan Yu. M.*

Simulation of laser-induced desorption of hydrogen from tungsten  
and beryllium surfaces ..... 47

**С3. Анфимова Т. А., Голубева А. В.**

Изотопный эффект при взаимодействии водорода  
с материалами ТЯР ..... 49

*Anfimova T., Golubeva A.*

Isotope effect in the interaction of hydrogen with fusion  
reactor materials ..... 50

<b>С4.</b> <i>Фефелова Е. А., Крат С. А., Гаспарян Ю. М., Ефимов В. С., Зарипова М. М., Исаенкова М. Г., Писарев А. А.</i>	
Влияние гелия на накопление водорода в осажденных из плазмы вольфрамовых слоях .....	52
<i>Fefelova E. A., Krat S. A., Gasparyan Yu. M., Efimov V. S., Zaripova M. M., Isaenkova M. G., Pisarev A. A.</i>	
Effect of helium on the accumulation of deuterium in co-deposited tungsten layers .....	55
<b>С5.</b> <i>Бобырь Н. П., Анфимова Т. А., Дугин Д. С., Козлов Д. А., Розенкевич М. Б.</i>	
Исследование изотопного обмена водорода в бронзе CuCrZr .....	58
<i>Bobyry N., Anfimova T., Dugin D., Kozlov D., Rozenkevich M.</i>	
Investigation of the hydrogen isotopic exchange in bronze CuCrZr .....	59
<b>С6.</b> <i>Грачев В. А., Быстрова О. С., Сазонов А. Б.</i>	
Вклад топлива ВВЭР в накопление H-3 в теплоносителе первого контура .....	61
<i>Grachev V. A., Bystrova O. S., Sazonov A. B.</i>	
The contribution of VVER fuel to the accumulation of H-3 in the primary coolant .....	63
<b>С7.</b> <i>Аханов А. М., Айткулов М. Т., Шаймерденов А. А., Кульсартов Т. В., Аскербекоев С. К.</i>	
Газовыделение трития из однофазной литиевой керамики при высокотемпературном нейтронном облучении в реакторе ВВР-К .....	65
<i>Akhanov A. M., Aitkulov M. T., Shaimerdenov A. A., Kulsartov T. V., Askerbekov S. K.</i>	
Gas release of tritium from single-phase lithium ceramics during high-temperature neutron irradiation in a WWR-K reactor .....	66
<b>С8.</b> <i>Пивень В. А., Сидоров Н. И., Габис И. Е., Шипалов В. И.</i>	
Проницаемость водорода сквозь сплавы на основе палладия и ванадия .....	67
<i>Piven V. A., Sidorov N. I., Gabis I. E., Shipalov V. I.</i>	
Permeability of hydrogen through palladium and vanadium-based alloys .....	68
<b>С9.</b> <i>Кузенов С. Р., Алимов В. Н., Буснюк А. О., Лившиц А. И., Передистов Е. Ю.</i>	
Транспорт водорода через ОЦК-сплавы V-Fe .....	70
<i>Kuzenov S. R., Alimov V. N., Busnyuk A. O., Peredistov E. U., Livshits A. I.</i>	
The hydrogen transport through the BCC-Fe alloys .....	72

<b>C10.</b> <i>Демидов Д. Н., Бобырь Н. П., Ананьев С. С.</i> Определение энергетических и диффузионных параметров взаимодействия водорода с ловушками в ОЦК W: анализ термодесорбционных спектров .....	74
<i>Demidov D., Ananiev S., Bobyr N.</i> Determination of energy and diffusion parameters of interaction of hydrogen with traps in BCC W: analysis of thermal desorption spectra .....	75
<b>C11.</b> <i>Молочаев Я. С., Голубева А. В., Грашин С. А.</i> Графит SIGRAFINE как обращенный к плазме материал Т-15МД .....	77
<i>Molochaev Ya. S., Golubeva A. V., Grashin S. A.</i> SIGRAFINE graphite as plasma facing material T-15MD .....	78
<b>C12.</b> <i>Дугин Д. С., Бобырь Н. П., Черкез Д. И., Козлов Д. А.</i> Особенности пересчета показаний масс-спектрометров в экспериментах по термодесорбции изотопов водорода в абсолютные величины газовых потоков .....	80
<i>Dugin D. S., Bobyr N. P., Cherkez D. I., Kozlov D. A.</i> Peculiarities of recalculation of readings of mass spectrometers in experiments on thermal desorption of hydrogen isotopes into absolute values of gas flows .....	82
<b>C13.</b> <i>Бобырь Н. П., Дугин Д. С., Козлов Д. А., Федин П. А.</i> Исследование захвата дейтерия в стали ЭК 181 в присутствии дефектов структуры .....	84
<i>Bobyr N., Dugin D., Kozlov D., Fedin P.</i> Investigation of the deuterium retention in EK 181 in presence of structural defects .....	86
<b>C14.</b> <i>Хвостов Р. П., Шкурыгин Д. М., Голубева А. В.</i> Методика исследования водородо-проницаемости мембран при взаимодействии с газом .....	88
<i>Khvostov R. P., Shkurygin D. M., Golubeva A. V.</i> Methodology of studying the hydrogen permeability of membranes at interaction with gas .....	89
<b>C15.</b> <i>Степанов Н. О., Черкез Д. И.</i> Влияние градиента температуры на транспортные параметры изотопов водорода в стали ЧС-68 .....	91
<i>Stepanov N. O., Cherkez D. I.</i> Influence of temperature gradient on transportation parameters of hydrogen isotopes in the ChS-68 steel .....	94

<b>С16.</b> Постников А. Ю., Царев М. В., Забавин Е. В., Сисяев А. В., Симапов В. А., Половинкин П. Е., Мокрушин В. В., Забродина О. Ю., Царева И. А., Селезнева А. Д., Склярова Н. А.	
Изучение свойств алюмосиликатных микросфер и оценка коэффициента проницаемости стенок по гелию и водороду .....	97
<i>Postnikov A. Yu., Tsarev M. V., Zabavin E. V., Sisyayev A. V., Simanov V. A., Polovinkin P. E., Mokrushin V. V., Zabrodina O. Yu., Tsareva I. A., Selezneva A. D., Sklyarova N. A.</i>	
Investigation of properties of aluminum silicate microspheres and evaluation of the permeability coefficient of the walls for helium and hydrogen .....	99
<b>2. Механические свойства и структурные превращения конструкционных материалов в среде водорода</b>	
<b>2. Mechanical properties and structural transformations of structural materials in a hydrogen environment</b>	
<b>В5.</b> Беграмбеков Л. Б., Захаров А. М., Пунтаков Н. А.	
Развитие структур конусов и вискерсов на поверхностях твердых тел при ионном облучении .....	102
<i>Begrambekov L. B., Zakharov A. M., Puntakov N. A.</i>	
Development of structures of cones and whiskers on the surfaces of solids under ion irradiation .....	103
<b>В6.</b> Чуканов А. Н., <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Сергеев Н. Н.</span> , Сергеев А. Н., Терёшин В. А., Гвоздев А. Е., Яковенко А. А.	
Термодинамика деструкции и локального обезуглероживания сталей в ходе водородной стресс-коррозии .....	104
<i>Chukanov A. N., <span style="border: 1px solid black; padding: 2px;">Sergeev N. N.</span>, Sergeev A. N., Tereshin V. A., Gvozdev A. E., Yakovenko A. A.</i>	
Thermodynamics of destruction and local decarburization steels during hydrogen stress corrosion .....	106
<b>В7.</b> Селезнев А. А.	
Основы молекулярно-динамического моделирования свойств конденсированных материалов .....	108
<i>Seleznev A. A.</i>	
Fundamentals of molecular-dynamic simulation of condensed materials properties .....	110

<b>C17.</b> Ялышева А. В., Бойцов И.Е., Казимов М. В., Малков И. Л., Шевнин Е. В. Исследование кратковременного влияния водорода высокого давления на механические свойства и структуру титанового сплава BT20 .....	112
<i>Yalysheva A. V., Boytsov I. E., Kazimov M. V., Malkov I. L., Shevnin E. V.</i> Investigation of short-term influence of high pressure on mechanical properties and structure of BT20 titanium alloy .....	113
<b>3. Гидриды и гидридные превращения</b>	
<b>3. Hydrides and hydride transformation</b>	
<b>B8.</b> Нецкина О. В., Комова О. В. Гидриды бора как энергоемкие материалы .....	116
<i>Netskina O. V., Komova O. V.</i> Boron hydride as energy-rich materials .....	118
<b>B9.</b> Мусяев Р. К. Металлогидридные порошковые материалы в экспериментальной физике. Особенности подготовки и применения .....	120
<i>Musyayev R. K.</i> Metal hydride powder materials in experimental physics. Features of preparation and application .....	121
<b>B10.</b> Писарев А. А. Тонкие пленки для хранения водорода .....	123
<i>Pisarev A. A.</i> A thin films for hydrogen storage .....	123
<b>B11.</b> Голубков А. Н., Малков И. Л. Исследование свойств гидридов металлов при высоких давлениях водорода .....	124
<i>Golubkov A. N., Malkov I. L.</i> Investigation of metal hydrides properties at high pressures of hydrogen ...	125
<b>B12.</b> Митрохин С. В., Прохоренков М. А. Статистическая прогностическая модель подбора составов водородопоглощающих сплавов фазы Лавеса .....	126
<i>Mitrokhin S. V., Prokhorenkov M. A.</i> Statistical forecast model for tailoring Laves phase hydrogen absorbing alloys compositions .....	127

<b>C18.</b> Эльман Р. Р., Кудияров В. Н., Курдюмов Н. Е., Пушилина Н. С. Моделирование теплопереноса в системах металлгидридного хранения водорода .....	128
<i>Elman R. R., Kudiiarov V. N., Kurdyumov N. E., Pushilina N. S.</i> Simulation of heat transfer in metal-hydrides storage system .....	129
<b>C19.</b> Сомкина Е. В., Белова Ю. С., Тарасов А. А., Горелов А. М. Анализ процесса вакуумно-термической обработки прессованных образцов из гидрида лития .....	131
<i>Somkina E. V., Belova Yu. S., Tarasov A. A., Gorelov A. M.</i> A review of vacuum-thermal treatment of pressed lithium hydride specimens .....	132
<b>C20.</b> Курский Р. А., Забусов О. О., Рожков А. В. Формирование структуры гидридов в оболочках ТВЭЛОВ в условиях сухого хранения отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) ...	133
<i>Kurskiy R. A., Zabusov O. O., Rozhkov A. V.</i> Hydride structure formation in fuel claddings under dry storage conditions of the spent nuclear fuel (SNF) .....	134
<b>C21.</b> Прохоренков М. А., Митрохин С. В., Мовлаев Э. А. Гидриды ИМС фаз Лавеса с высоким давлением диссоциации .....	136
<i>Prokhorenkov M. A., Mitrokhin S. V., Movlaev E. A.</i> IMC hydrides of Laves phases with high dissociation pressure .....	137
<b>C22.</b> Курганская А. А., Терёшина И. С., Вербецкий В. Н. Влияние гидрирования на магнитные и магнитокалорические свойства систем RNi (R = Gd, Tb) .....	139
<i>Kurganskaya A. A., Tereshina I. S., Verbetsky V. N.</i> The influence of hydrogenation on magnetic and magnetocaloric properties of RNi (R = Gd, Tb) systems .....	140
<b>C23.</b> Веселова С. В., Вербецкий В. Н., Терёшина И. С. Влияние водорода на структуру и магнитные свойства интерметаллических соединений (Sm, R) <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub> , где R = Ho, Er .....	142
<i>Veselova S. V., Verbetsky V. N., Tereshina I. S.</i> Effect of hydrogen on the structure and magnetic properties of intermetallic compounds (Sm, R) <sub>2</sub> Fe <sub>17</sub> , where R = Ho, Er .....	145

<b>C24.</b> Шкандыбина В. В., Менишаров Р. М., Сияков М. В., Иванов Б. В.	
Исследование влияния наводороживания титановых коллекторов тока на характеристики электролизной ячейки с ТПЭ .....	146
<i>Shkandybina V. V., Mensharapov R. M., Sinyakov M. V., Ivanov B. V.</i>	
The study of hydrogenation effect of titanium current collectors on the characteristics of the electrolysis cell with PEM .....	148
<b>C25.</b> Сияков М. В., Засыпкина А. А., Спасов Д. Д., Менишаров Р. М., Алексеева О. К., Иванова Н. А.	
Соединения титана в качестве антикоррозионных покрытий для электродов твердополимерных электрохимических устройств .....	150
<i>Sinyakov M. V., Zasypkina A. A., Spasov D. D., Mensharapov R. M., Alekseeva O. K., Ivanova N. A.</i>	
Titanium compounds as corrosion-resistant coatings for electrodes of solid polymer electrochemical devices .....	152
<b>4. Аппаратура и методы исследования</b>	
<b>4. Equipment and research methods</b>	
<b>В13.</b> Лившиц А.И.	
Мембранные технологии для термоядерной и водородной энергетики ..	154
<i>Livshits A. I.</i>	
Membrane technologies for the nuclear fusion and hydrogen energy .....	155
<b>В14.</b> Максимкин И. П.	
Подходы к созданию тритиевых систем на примере тритиевой инфраструктуры фрагмент-сепаратора Акулина-2 .....	157
<i>Maksimkin I. P.</i>	
Approaches for development of tritium systems by the example of tritium infrastructure for the Akulina-2 fragment separator .....	158
<b>В15.</b> Варезжкин А. В.	
Использование мембранной технологии для извлечения водорода из технологических газовых смесей .....	159
<i>Varezhkin A.</i>	
Application of membrane technology to extract hydrogen from process gas mixtures .....	160
<b>В16.</b> Ананьев С. С., Иванов Б. В., Кутеев Б. В., Юхимчук А. А.	
Программа развития технологий топливного цикла ГССД в РФ .....	162
<i>Ananyev S., Ivanov B., Kuteev B., Yukhimchuk A.</i>	
Technologies development program of the FFHS fusion fuel cycle in RF ....	165

<b>V17.</b> <i>Розенкевич М. Б., Букин А. Н., Марунич С. А., Пак Ю. С., Перевезенцев А. Н.</i>	
Методы дитритизации технологических и сбросных газовых потоков рабочих помещений ядерных объектов .....	168
<i>Rozenkevich M. B., Bukin A. N., Marunich S. A., Pak Yu. S., A. N. Perevezentsev</i>	
Methods of detritiation of technological and waste gas flows of working rooms of nuclear industry .....	169
<b>V18.</b> <i>Воронина Т. В., Каверзина А. А., Климов М. Ю.</i>	
Автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды на реакторе ПИК .....	171
<i>Voronina T., Kaverzina A., Klimov M.</i>	
Automatic sampling and heavy water analysis system (ASSA HW) of PIK reactor .....	173
<b>V19.</b> <i>Бондаренко С. Д., Алексеев И. А., Васянина Т. В., Федорченко О. А.</i>	
Оборудование установки изотопной очистки тяжелой воды ПИЯФ. Опыт эксплуатации .....	174
<i>Bondarenko S. D., Alekseev I. A., Fedorchenko O. A., Vasyanina T. V.</i>	
Equipment for the heavy water isotope purification facility at PNPI. Operating experience .....	175
<b>C26.</b> <i>Передистов Е. Ю., Алимов В. Н., Буснюк А. О., Кузенов С. Р., Лившиц А. И.</i>	
Прямой внутренний рециклинг D/T в ТЯР с помощью сверхпроницаемых мембран .....	177
<i>Peredistov E. Yu., Alimov V. N., Busnyuk A. O., Kuzenov S. R., Livshits A. I.</i>	
Direct internal recycling of D/T to TR using superpermeable membranes ....	179
<b>C27.</b> <i>Иванов Б. В., Ананьев С. С.</i>	
Оценка уровня готовности технологий воспроизводства трития и обеспечения тритиевой безопасности в России на примере проекта ДЕМО-ТИН .....	181
<i>Ivanov B. V., Ananyev S. S.</i>	
Assessment of the technology readiness level for tritium production and tritium safety in Russia based on the DEMO-FNS project .....	183

<b>C28.</b> Кошлань В. И., Ананьев С. С. Моделирование топливного цикла ДЕМО-ТИН .....	185
<i>Koshlan V. I., Ananyev S. S.</i> Modeling of the fuel cycle DEMO-FNS .....	187
<b>C29.</b> Ананьев С. С., Иванов Б. В., Днестровский А. Ю., Кукушкин А. С. Выбор изотопного состава газа для инжекторов нейтральных пучков компактного источника термоядерных нейтронов ТИН-СТ .....	189
<i>Ananyev S., Ivanov B., Dnestrovskij A., Kukushkin A.</i> Choice of gas isotope composition for neutral beam injectors of the FNS-ST compact fusion neutron source .....	191
<b>C30.</b> Тивикова О. А., Юхимчук А. А., Максимкин И. П., Буряк Е. В., Балуев В. В., Мусяев Р. К., Кирдяшкин А. А., Першина В. М., Рыжухина А. В. Установка очистки газовой среды от трития .....	194
<i>Tivikova O. A., Yukhimchuk A. A., Maksimkin I. P., Buryak E. V., Baluev V. V., Musyaev R. K., Kirdyashkin A. A., Pershina V. M., Ryzhukhina A. V.</i> Installation for gas medium purification from tritium .....	195
<b>C31.</b> Кузьмин Д. А., Федорченко О. А., Брык А. А., Алексеев И. А. Исследование изотопных эффектов при использовании электрохимического водородного насоса .....	196
<i>Kuzmin D. A., Fedorchenko O. A., Bryk A. A., Alekseev I. A.</i> Study of isotope effects using an electrochemical hydrogen pump .....	197
<b>C32.</b> Спасов Д. Д., Иванова Н. А., Менишарпов Р. М., Засыпкина А. А., Серегина Е. А., Синяков М. В. Испытания электрохимического водородного насоса с твердым полимерным электролитом в различных условиях .....	198
<i>Spasov D. D., Mensharapov R. M., Zasypkina A. A., Seregina E. A., Sinyakov M. V., Ivanova N. A.</i> Tests of an electrochemical hydrogen pump with a PEM under various conditions .....	199

<b>С33.</b> <i>Иванова Н. А., Засыпкина А. А., Меншиаратов Р. М., Спасов Д. Д., Фатеев В. Н.</i>	
Электрокатализаторы реакций выделения водорода и кислорода и методы их исследования .....	201
<i>Ivanova N. A., Zasyпкиna A. A., Mensharapov R. M., Spasov D. D., Fateev V. N.</i>	
Electrocatalysts for hydrogen and oxygen evolution reactions (HER and OER) and their investigation methods .....	202
<b>С34.</b> <i>Жмуровский А. В., Буряк Е. В., Мусыев Р. К., Тихонов В. В., Рыжухина А. В.</i>	
Установка для определения коэффициента теплопроводности порошковых материалов при высоких температурах и давлениях .....	204
<i>Zhmurovsky A. V., Buryak E. V., Musyaev R. K., Tikhonov V. V., Ryzhukhina A. V.</i>	
Installation for determining the thermal conductivity coefficient of powder materials at high temperatures and pressures .....	205
<b>С35.</b> <i>Черкез Д. И., Степанов Н. О., Ананьев С. С., Спицын А. В.</i>	
Установка для изучения взаимодействия плазмы с материалами на основе ВЧ-источника геликонного типа: первые результаты .....	206
<i>Cherkez D. I., Stepanov N. O., Ananyev S. S., Spitsyn A. V.</i>	
Helicon-type RF facility for plasma-material interaction investigation: first results .....	208
<b>С36.</b> <i>Кудияров В. Н., Лидер А. М., Гаранин Г. В., Мурашкина Т. Л., Саквин И. С., Федоров В. В., Зарницын А. Ю., Пушилина Н. С., Эльман Р. Р., Курдюмов Н. Е., Семенов О. В.</i>	
Разработка автоматизированного комплекса и изучение процессов сорбции-десорбции водорода в композитах на основе металлических гидридов и металл-органических каркасных структур .....	210
<i>Kudiyarov V. N., Lider A. M., Garanin G. V., Murashkina T. L., Sakvin I. S., Fedorov V. V., Zarnitsin A. Yu., Pushilina N. S., Elman R. R., Kurdyumov N. E., Semenov O. V.</i>	
Development of the automated complex and study of hydrogen sorption-desorption processes in composites based on metal hydrides and metal-organic framework structures .....	211

**С37. Зарубина Е. Ю., Рогожина М. А.**

Оптическая диагностика слоя изотопов водорода в криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза ..... 213

*Zarubina E. Yu., Rogozhina M. A.*

Optical diagnostics of hydrogen isotopes layer in cryogenic target for laser thermonuclear fusion ..... 215

**С38. Зарубина Е. Ю., Рогожина М. А.**

Оптическая диагностика слоя изотопов водорода в криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза ..... 218

*Zarubina E. Yu., Rogozhina M. A.*

Optical diagnostics of hydrogen isotopes layer in cryogenic target for laser thermonuclear fusion ..... 220

**Авторский указатель** ..... 223

**A1–A4**

**ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ЛЕКЦИИ**

**GENERAL LECTURES**

**Юхимчук Аркадий Аркадьевич**  
Заместитель начальника отделения  
607189, ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
г. Саров Нижегородской обл.,  
проспект Мира, 37  
*Изотопы водорода*

**Yukhimchuk Arkadiy**  
Deputy head separation  
607189, FSUE «RFNC-VNIIEF»  
Mira Ave., 37, Sarov,  
Nyzhny Novgorod region, Russia  
*Hydrogen isotopes*  
arkad@triton.vniief.ru



## **НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ПРОЕКТА «ФИЗИКА ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА» НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ**

*А. А. Юхимчук*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

В 2021 г. постановление Правительства РФ от 27.08.2021 г. № 1416  
был создан Национальный центр физики и математики (НЦФМ). В рамках  
центра организована работа по десяти научным Проектам:

1. Национальный центр исследования архитектур суперкомпьютеров.
2. Математическое моделирование на супер-ЭВМ экса- и зеттафлоп-  
ной производительности.
3. Газодинамика и физика взрыва.
4. Физика высоких плотностей энергии.
5. Физика частиц и космология.
6. Ядерная и радиационная физика.
7. Исследования в сильных и сверхсильных магнитных полях.
8. Физика изотопов водорода.

9. Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах.

10. Экспериментальная лабораторная астрофизика и геофизика.

Проект № 8 «Физика изотопов водорода» напрямую касается тематики проводимой Школы. В рамках данного Проекта предполагается проведение исследований по следующим направлениям:

– фундаментальные и прикладные исследования в области взаимодействия изотопов водорода с твердым телом;

– измерение электромагнитных свойств нейтрино с использованием интенсивного тритиевого источника (анти)нейтрино;

– изучение свойств нейтронно-избыточных ядер, лежащих на границе нейтронной стабильности;

– создание национального центра коллективного пользования «Тритий».

В лекции приводится научная программа работ по Проекту, обсуждаются проблемные вопросы и возможные пути их решения.

## **SCIENTIFIC PROGRAM OF THE «HYDROGEN ISOTOPES PHYSICS» PROJECT OF THE NATIONAL CENTER FOR PHYSICS AND MATHEMATICS**

*A. A. Yukhimchuk*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»),  
Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

In 2021 the National Center for physics and Mathematics (NCPM) was founded on the basis of a decree of the Government of the Russian Federation of 27.08.2021 № 1416. Within the framework of the center, the following scientific projects were implemented:

1. National Center for supercomputer architecture research.
2. Mathematical simulation on supercomputers of exa- and zettaFLOPS performance.
3. Gas dynamics and explosion physics.
4. Physics of high energy densities.
5. Particle physics and cosmology.
6. Nuclear and radiation physics.

7. Research in intense and super intense magnetic fields.

8. Hydrogen isotopes physics.

9. Artificial intelligence and big data in technical, industrial, natural and social systems.

10. Experimental laboratory astrophysics and geophysics.

Project № 8 «Hydrogen isotopes physics» directly concerns the subject of the School. Within the framework of this Project, it is planned to conduct studies in the following cases:

– basic and applied research in the field of hydrogen isotopes interaction with a solid;

– measurement of neutrino electromagnetic properties using intensive tritium source of (anti) neutrino;

– study of neutron excess nuclei lying on the boundary of neutron stability;

– creation of «Tritium» national center for collective use.

The work provides a scientific program of work on the Project, a number of issues and their solutions are discussed.

**БОЛЬШОЙ СРЫВ В ТОКАМАКАХ: ФИЗИКА  
И ТЕХНОЛОГИИ СМЯГЧЕНИЯ ПОСЛЕДСТВИЙ**

*Б. В. Кутеев*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

**DISRUPTION IN TOKAMAKS: PHYSICS  
AND MITIGATION TECHNOLOGIES**

*B. V. Kuteev*

NRC «Kurchatov Institute», Moscow

**ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА***С. В. Коробцев*

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

**HYDROGEN ENERGY***S. V. Korobtsev*

NRC «Kurchatov Institute», Moscow

## РЕАКТОРНЫЙ КОМПЛЕКС ПИК.

*В. В. Воронин*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина, Россия  
e-mail: Voronin\_VV@npri.nrcki.ru

Будет представлен обзор параметров и состояния дел по созданию самого мощного источника нейтронов, предназначенного для работы на выведенных пучках, исследовательского реактора ПИК (НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ, Гатчина).

Реактор ПИК (пучковый исследовательский корпусной) представляет собой источник нейтронов с рекордными параметрами, призванный стать флагманом нейтронных исследований в России. Он представляет собой водо-водяной корпусной реактор, где легкая вода ( $H_2O$ ) используется как теплоноситель, а тяжелая вода ( $D_2O$ ) как отражатель и замедлитель нейтронов. Основные проектные характеристики реактора следующие [1]:

- Тепловая мощность – 100 МВт.
- Объем активной зоны – 50 л.
- Плотность потока тепловых нейтронов в отражателе –  $(0,1-1,2) \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>·с.

Для вывода нейтронного излучения из отражателя реактора ПИК, а также облучения образцов, реактор ПИК снабжен значительным числом экспериментальных каналов.

Центральный экспериментальный канал (ЦЭК) размещен, в водной полости активной зоны. Плотность потока тепловых нейтронов в полости –  $5 \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>·с.

- Горизонтальные экспериментальные каналы (ГЭК) – 9 шт.  
потоки тепловых нейтронов на донышках –  $(0,1-1,2) \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>·с  
потоки тепловых нейтронов на выходе –  $(0,2-3) \cdot 10^{11}$  н/см<sup>2</sup>·с  
диаметр каналов – 100–250 мм.
- Наклонные экспериментальные каналы (НЭК) – 6 шт.  
потоки тепловых нейтронов на донышках –  $(0,2-1) \cdot 10^{15}$  н/см<sup>2</sup>·с.

В настоящее время реактор ПИК выведен на энергетический режим работы, в марте 2022 г. достигнута тепловая мощность 7 МВт [2], ведутся плановые работы. Кроме этого, введены в эксплуатацию первые 5 станций

нейтронного рассеяния, проводятся первые эксперименты [3]. Начата реализация полномасштабной программы создания приборного парка для проведения экспериментальных исследований на выведенных пучках нейтронов [4].

Данная установка на несколько десятилетий определит стратегию развития нейтронных исследований в РФ и станет основой Международного центра нейтронных исследований.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ковальчук М. В., Смольский С. Л., Коноплев К. А. Кристаллография, 66 (2) 184–190 (2021).
2. Ковальчук М. В., Воронин В. В., Гаврилов С. В. и др. Реактор ПИК. Первые эксперименты, Кристаллография. 2023. 67. № 5. p. 785.
3. Grigoryev S., Voronin V. V., Gartvik A. et al. PIK research reactor put into megawatt-power operation, Neutron New, 2022 (in publication).
4. Kovalchuk, M. V., Voronin, V. V., Grigoriev, S. V. et al. Instrument Base of the Reactor PIK. Crystallogr. Rep. 66, 195–215 (2021).

**Секция 1**

**B1–B4, C1–C16**

**КИНЕТИКА И ТЕРМОДИНАМИКА  
ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ  
ВОДОРОДА С ТВЕРДЫМИ ТЕЛАМИ,  
ВКЛЮЧАЯ ЭФФЕКТЫ  
РАДИОГЕННОГО ГЕЛИЯ**

**Session 1**

**KINETICS AND THERMODYNAMICS  
OF THE INTERACTION OF HYDROGEN  
ISOTOPES WITH SOLIDS, INCLUDING  
THE EFFECTS OF RADIOGENIC HELIUM**

**Денисов Евгений Александрович**

Доцент

Санкт-Петербургский государственный  
университет, 199034, Россия, Санкт-Петербург,

Университетская набережная, д. 7–9

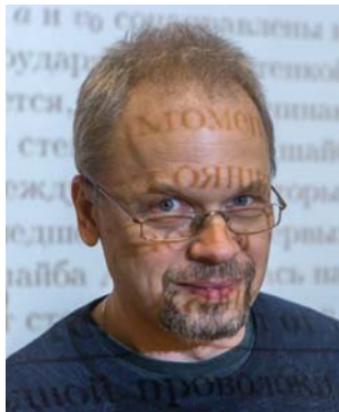
Исследования в области взаимодействия водорода  
с металлами, неметаллическими защитными  
покрытиями, углеродными материалами  
(в т. ч. наноструктурированными)

**Denisov Evgeny**

Assistant professor

Saint Petersburg State University, 7–9 Universitetskaya  
Embankment, St Petersburg, Russia, 199034

Research in the field of interaction of hydrogen  
with metals, non-metallic protective coatings, carbon  
materials (including nanostructured ones)  
e.denisov@spbu.ru



## **МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СОДЕРЖАНИЯ И ПОДВИЖНОСТИ ВОДОРОДА В МАТЕРИАЛАХ**

*Е. Денисов*

Санкт-Петербургский государственный университет

Известно, что накопление водорода в металлических конструкционных сплавах, контактирующих в процессе эксплуатации с водородосодержащими средами, может приводить к существенной деградации их механических свойств. Этот аспект, наряду с механическим и термическими нагрузками, является одним из основных, накладывающих ограничение на проектные сроки эксплуатации оборудования. В то же время, принципы экономической рентабельности наоборот требуют максимального увеличения периода безопасной работы, который может достигать нескольких лет. Очевидно, что определение этого важнейшего параметра невозможно без компьютерного моделирования с использованием адекватных физических моделей с заложенными в них кинетическими и термодинамическими параметрами. Эти параметры определяются, как пра-

вило, в результате обработки данных, полученных с помощью различных экспериментальных методик. В данном докладе представлен обзор физических методов, позволяющих определить кинетику накопления, скорость миграции, профили распределения и водорода в конструкционных материалах и другие параметры. Среди этих методов:

- метод водородопроницаемости,
- метод термодесорбции с программируемым нагревом,
- метод ядерного магнитного резонанса,
- нейтронная радиография,
- атомно-зондовая томография,
- вторичная ионная масс-спектропия,
- тритиевая авторыдиография/водородная микропечать
- и другие.

Основной задачей доклада является расширение кругозора молодых ученых, связанных с водородной тематикой, в области современных экспериментальных методик. Сравнительный анализ возможностей и областей применимости рассмотренных методов должен помочь рациональному выбору наиболее подходящих методик и критическому отношению к получаемым результатам.

## **THE METHODS FOR DETERMINING THE HYDROGEN CONTENT AND MOBILITY IN MATERIALS**

*E. Denisov*

Saint Petersburg State University

It is known that the hydrogen uptake in metallic structural materials contacting with hydrogen-containing media during operation can lead to a significant degradation of their mechanical properties. This aspect, along with mechanical and thermal loads, is one of the main ones that impose restrictions on the design operation life-time of the equipment. At the same time, the principles of economic profitability, on the contrary, require the maximum increase in the period of safe operation, which can reach several years. It is obvious that the determination of this most important parameter is impossible without computer simulation using adequate physical models with kinetic and thermodynamic parameters embedded in them. These parameters are determined, as a rule, as a result of processing data obtained using various experimental tech-

niques. This report presents an overview of physical methods to determine accumulation kinetics, migration rates, distribution and hydrogen profiles in structural materials, and other parameters. Among these methods:

- thermal desorption method with programmed heating,
- method of nuclear magnetic resonance,
- neutron radiography,
- нейтронная радиография,
- atom probe tomography,
- secondary ion mass spectroscopy,
- tritium autoradiography/hydrogen microprint technique
- and other.

The main goal of the report is to expand the horizons of young scientists related to hydrogen topics in the field of modern experimental techniques. A comparative analysis of the possibilities and areas of applicability of the considered methods should help rational choice of the most appropriate methods and a critical attitude to the results obtained.

**Голубева Анна Владимировна**

Начальник лаборатории

НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Водород, материалы, ТЯР

**Golubeva Anna Vladimirovna**

Head of laboratory

NRC Kurchatov Institute

Russia, Moscow, sq. Academician Kurchatov, 1

Hydrogen, materials, fusion

Golubeva\_av@nrcki.ru



## **ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ**

*А. В. Голубева*

НИЦ «Курчатовский институт»

К обращенным к плазме (ОПМ) и конструкционным материалам (КМ) термоядерных реакторов (ТЯР) выдвигаются требования высокой теплопроводности, стабильности термомеханических свойств в экстремальных условиях термоядерного реактора, а также быстрого спада наведенной активности. ОПМ, помимо этого, должны быть устойчивы при воздействии плазменного облучения и высоких температур, а их примесь в плазме, появляющаяся в результате распыления, не должна заметно охлаждать плазму. Перечисленным требованиям удовлетворяют очень немногие материалы. В качестве ОПМ в настоящий момент рассматривают Be, C и углеродные композитные материалы, Li, W, в качестве КМ – аустенитные стали, ферритно-мартенситные стали со сниженной активацией, сплавы V-Cr-Ti.

В камере термоядерных установок элементы конструкции находится в контакте с радиоактивным тритием. Материалы защитной облицовки

облучаются ионами пристеночной плазмы. Стенка камеры и элементы конструкции, не облучаемые плазмой, находятся в контакте с газообразным тритием. Изотопы водорода могут быть захвачены в материалах, а также проникать сквозь материалы конструкции. С целью обеспечения радиационной безопасности, а также по экономическим соображениям потери трития должны быть минимизированы и хорошо прогнозируемы. Поэтому термоядерным сообществом накоплена внушительная база информации о параметрах взаимодействия водорода с материалами ТЯР.

Данная работа ставит целью суммирование основных характеристик взаимодействия изотопов водорода с материалами ТЯР. Проводится сравнение захвата и водородопроницаемости материалов ТЯР различных классов.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

## **HYDROGEN ISOTOPES INTERACTION WITH MATERIALS OF FUSION REACTORS**

*A. V. Golubeva*

NRC «Kurchatov Institute»

The plasma-facing materials (PFM) and structural materials of fusion reactors (FR) are required to have high thermal conductivity, stability of thermomechanical properties in extreme conditions of a thermonuclear reactor, as well as a rapid decline of an induced activity. PFMs, in addition, should be stable under plasma irradiation at high temperatures, and their admixture in the plasma produced by spattering should not drastically cool the plasma. Very few materials meet the listed requirements. At the moment, carbon and carbon composite materials, lithium and W are considered as PFMs, and austenitic steels, ferritic-martensitic steels with reduced activation, V-Cr-Ti alloys are considered as structural materials.

In a chamber of fusion reactor, the elements of construction are in contact with radioactive tritium. The materials of the protective tiles are irradiated with near-wall plasma ions. The chamber wall and elements that are not irradiated by plasma are in contact with gaseous tritium. Hydrogen isotopes can be trapped in materials, as well as penetrate through materials. In order to ensure radiation safety, as well as for economic reasons, tritium losses should be min-

imized and well predicted. Therefore, the fusion community has accumulated an impressive database of information about the parameters of the interaction of hydrogen with materials for fusion.

This work aims to summarize the main characteristics of hydrogen isotopes interaction with FR materials. A comparison of the capture and hydrogen permeability is carried out for fusion reactors materials.

This work was supported by NRC «Kurchatov Institute».

**Крат Степан Андреевич**

Старший научный сотрудник  
НИЯУ МИФИ

г. Москва, Каширское шоссе 31  
Накопление изотопов водорода  
в осажденных из плазмы  
металлических слоях

**Stepan Krat**

Senior researcher  
NRNU MEPHI

Moscow, Kashirskoe shosse 31  
Hydrogen isotope accumulation in metal  
layers co-deposited from plasma  
sakrat@mephi.ru



## СОДЕРЖАНИЕ ДЕЙТЕРИЯ В СООСАЖДЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ ЛИТИЕВЫХ СЛОЯХ И СПОСОБЫ ЕГО УДАЛЕНИЯ ИЗ НИХ

*С. А. Крат, Я. А. Васина, А. С. Пришвицын, А. С. Попков,  
Ю. М. Гаспарян, А. А. Писарев*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Литий является многообещающим материалом для обращенных к плазме элементов термоядерных установок. Из-за его низкого атомного номера и способности поглощать водород он хорошо совместим с термоядерной плазмой. Использование жидких литиевых элементов приводит к улучшению удержания плазмы, уменьшению эффективного заряда плазмы и может уменьшить рециклинг водорода. Недостатком низкого атомного номера и низкой температуры плавления лития является то, что от элементов, обращенных к плазме, можно ожидать высоких потоков лития из-за испарения и эрозии. Переосаждение лития вместе с водородом может привести к образованию толстых, насыщенных водородом соосажденных слоев, потенциально содержащих твердые гидридные фазы, что опасно как с точки зрения радиационной безопасности, так и с точки зрения технологии жидкометаллических стенок. Все это делает необходимым изучение накопления водорода в соосажденных Li-D слоях и мето-

дов удаления из них по крайней мере тяжелых изотопов водорода. Результаты таких исследований представлены в данной работе.

Поскольку Li является очень химически активным металлом, он и соосажденные слои на основе Li вступают в реакцию с атмосферными газами, включая азот [1]. Это означает, что требуются специализированные лабораторные установки, где можно проводить как соосаждение, так и анализ слоя, не подвергая соосажденный слой воздействию атмосферного воздуха [2]. Установка в этом исследовании использует магнетронное распыление Li катода на основе капиллярно-пористой системы с дейтериевой плазмой и термодесорбционную спектроскопию (ТДС), дополненную измерением скорости испарения Li в качестве метода анализа.

Было обнаружено, что Li-D слои, соосажденные на поверхность при комнатной температуре, содержат ~20 ат. % D [3]. Это значение увеличивается с повышением температуры до ~50 ат. % при температурах осаждения 400–500 К. При температурах выше ~550 К наблюдается сильное снижение содержания D. Спектры ТДС дейтерия демонстрируют, что дейтерий выделяется в основном в одном пике при ~700 К, связанном с разложением дейтерида лития, которое происходит после того, как большая часть металлического лития уже испарилась из соосажденной пленки. Однако наблюдалась некоторая десорбция при более высоких температурах до ~1000 К. Высокотемпературные пики десорбции более заметны при более высоких температурах осаждения и вероятно связаны с поверхностями соосажденных слоев – либо поверхностью слой-вакуум, либо поверхностью слой-подложка, и могут быть результатом взаимодействия совместно нанесенного слоя с фоновыми вакуумными газами.

Поскольку нагрев термоядерных установок до ~1000 К не является технически реализуемым решением, были исследованы методы низкотемпературного удаления водорода из слоев Li-D. В качестве метода удаления тяжелых изотопов водорода было показано, что воздействие атмосферы легкого водорода (протия) при температуре до ~473 К является эффективным, при этом эффективность удаления D достигает ~96 % после одной ночи воздействия [4]. В дополнение к этому, воздействие жесткого ультрафиолетового излучения с длиной волны ~200 нм было продемонстрировано как многообещающий способ устранения десорбции D при  $T > 700$  К.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gasparyan Y. M. Y. M., Popkov A. S., Krat S. A., Pisarev A. A., Vasina Y. A. Y. A., Lyublinski I. E., Vertkov A. V. Deuterium release from Li-D films exposed to atmospheric gases, *Fusion Eng. Des.* 117 (2017) 163–167. doi:10.1016/j.fusengdes.2016.07.025.

2. Krat S. A., Popkov A. S., Gasparyan Y. M., Vasina Y. A., Prishvitsyn A. S., Pisarev A. A. A setup for study of co-deposited films, *J. Instrum.* 15 (2020) P01011–P01011. doi:10.1088/1748-0221/15/01/P01011.

3. Krat S. A., Gasparyan Y. M., Popkov A. S., Pisarev A. A. Deuterium release from lithium-deuterium films, deposited in the magnetron discharge, *Vacuum.* 105 (2014) 111–114. doi:10.1016/j.vacuum.2014.01.006.

4. Krat S., Vasina Y., Prishvitsyn A., Gasparyan Y., Pisarev A. Isotope exchange in Li-D co-deposited layers at temperatures below 200 °C, *J. Nucl. Mater.* (2020) 152064. doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152064.

## DEUTERIUM ACCUMULATION AND REMOVAL FROM Li-D CO-DEPOSITED LAYERS

*S. A. Krat, Ya. A. Vasina, A. S. Prishvitsyn, A. S. Popkov,  
Yu. M. Gasparyan, A. A. Pisarev*

National Research Nuclear University MEPhI

Lithium is a promising material for plasma-facing components in fusion devices. Because of its low atomic number, and ability to absorb hydrogen it is well compatible with fusion plasma. Use of liquid lithium elements leads to improved plasma confinement, decrease of effective plasma charge, and can decrease hydrogen recycling. The downside of low atomic number and melting point is high lithium is that high fluxes of lithium can be expected from plasma facing elements due to evaporation and erosion. Redeposition of eroded lithium with hydrogen can lead to formation of thick hydrogen-rich co-deposited layers, potentially containing solid hydride inclusions, which is dangerous both from the perspective of radiation safety and from the perspective of liquid metal wall technology. All this makes it necessary to study hydrogen accumulation in Li-D co-deposited layers and methods of removing at least heavy hydrogen isotopes from them. The results of such studies are presented in this work.

Because Li is a very chemically active metal, it, and Li-based co-deposited layers react with atmospheric gases, including nitrogen [1]. This means, that specialized laboratory setups are required, where both co-deposition and layer analysis can be performed without exposing co-deposited layer to atmospheric air [2]. The setup in this study uses magnetron sputtering of a capillary-porous system based Li cathode with deuterium plasma and a thermal desorption spectroscopy (TDS) augmented with measurement of Li evaporation rate as the analysis method.

It was found that Li-D layers co-deposited on near room temperature surface contain ~20 at. % D [3]. This value increases with temperature up to ~50 at. % for deposition temperatures 400–500 K. At temperatures above ~550 K a strong reduction of D content is observed. TDS spectra of deuterium demonstrate that deuterium is released mainly in one peak at ~700 K, associated with lithium deuteride decomposition, which happens after most metal lithium has already evaporated from the co-deposited film. However, some desorption at higher temperatures up to ~1000 K was observed. High temperature desorption peaks are more prominent at higher deposition temperatures, likely associated with co-deposited layer interfaces, either layer-vacuum interface or the layer-substrate interface, and might be the result of the co-deposited layer interacting with background vacuum gases.

Because heating fusion devices up to ~1000 K is not a feasible solution, methods of low temperature hydrogen removal from Li-D layers were investigated. As a method of removing heavy hydrogen isotopes, exposure to light hydrogen (protium) atmosphere at temperature of up to ~473 K was shown to be effective, with D removal efficiency up to ~96% after one night of exposure [4]. In addition to that, exposure to hard UV light at ~200 nm wavelength was demonstrated as a promising way of removing D desorption at  $T > 700$  K.

## REFERENCES

1. Gasparyan Y. M. Y. M., Popkov A. S., Krat S. A., Pisarev A. A., Vasina Y. A. Y. A., Lyublinski I. E., Vertkov A. V. Deuterium release from Li-D films exposed to atmospheric gases, *Fusion Eng. Des.* 117 (2017) 163–167. doi:10.1016/j.fusengdes.2016.07.025.
2. Krat S. A., Popkov A. S., Gasparyan Y. M., Vasina Y. A., Prishvitsyn A. S., Pisarev A. A. A setup for study of co-deposited films, *J. Instrum.* 15 (2020) P01011–P01011. doi:10.1088/1748-0221/15/01/P01011.
3. Krat S. A., Gasparyan Y. M., Popkov A. S., Pisarev A. A. Deuterium release from lithium-deuterium films, deposited in the magnetron discharge, *Vacuum.* 105 (2014) 111–114. doi:10.1016/j.vacuum.2014.01.006.
4. Krat S., Vasina Y., Prishvitsyn A., Gasparyan Y., Pisarev A. Isotope exchange in Li-D co-deposited layers at temperatures below 200 °C, *J. Nucl. Mater.* (2020) 152064. doi:10.1016/j.jnucmat.2020.152064.

**ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ БЫСТРОЙ  
ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТИ СЛАВА В1  
В ЭКСПЕРИМЕНТЕ ТРОЙНОГО ПРОРЫВА**

*Ю. В. Заика*

ФИЦ «Карельский научный центр РАН», Петрозаводск  
zaika@krc.karelia.ru

**A ESTIMATION OF THE QUICK HYDROGEN PERMEABILITY  
PARAMETERS FOR B1-ALLOY IN TRIPLE BREAKTHROUGH  
EXPERIMENT**

*Yu. V. Zaika*

Karelian Research Centre, Russian Academy of Sciences, Petrozavodsk  
zaika@krc.karelia.ru

**Аскербеков Саулет Каныбекулы**  
МНС

Институт прикладных наук  
и информационных технологий  
Казахстан, Алматы, ул. Байзакова, д. 280, 050040  
Ядерная физика

**Askerbekov Saulet**

Institute of Applied Sciences  
and Information Technology  
Kazakhstan, Almaty, Bayzakova street, building 280  
Nuclear physics  
E-mail: saulet@list.ru



---

## **РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАКТОРНОГО ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ИССЛЕДОВАНИЮ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА С ЛИТИЕВОЙ КПС**

*С. К. Аскербеков<sup>1,2</sup>, Т. В. Кульсартов<sup>1,2</sup>, Ж. А. Заурбекова<sup>1,2</sup>,  
Ю. Н. Гордиенко<sup>3</sup>, Ю. В. Понкратов<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>Институт прикладных наук и информационных технологий,  
г. Алматы, Казахстан

<sup>2</sup>Казахстанско-Британский технический университет,  
г. Алматы, Казахстан

<sup>3</sup>Филиал «Институт атомной энергии» НЯЦ РК, г. Курчатов, Казахстан

Литий и соединения на его основе рассматриваются в качестве три-тиввоспроизводящих материалов бридерного бланкета разрабатываемых термоядерных установок. В большинстве случаев реализация преимущества лития по сравнению с другими материалами основано на использовании литиевой капиллярно-пористой системы (КПС), принципиально нового материала, в котором жидкий литий стабилизирован в матрице твердого пористого материала капиллярными силами.

Необходимым условием использования таких систем в термоядерных реакторах является возможность их детритизации. Поэтому, исследование процессов взаимодействия изотопов водорода с литиевой КПС в условиях

реакторного облучения позволит получить новые экспериментальные данные.

В настоящей работе приводятся результаты таких исследований, а именно испытание литиевой КПС на уровнях стационарной тепловой мощности реактора ИВГ.1М (г. Курчатов): 1 МВт; 3 МВт и 6 МВт.

Эксперименты проводились на реакторной ампуле содержащий исследуемый образец литиевой КПС методом динамической сорбции. Были определены квазиравновесные уровни давления дейтерия в системе при различных температурах образца (в диапазоне до 700 °С) и разных уровни потоков дейтерия, подаваемого в непрерывно откачиваемую ампулу с исследуемым образцом.

Научная новизна полученных результатов состоит в новых экспериментальных данных: температурной зависимости изменения газового состава в камере с литиевой КПС, при подаче разных уровней потоков дейтерия в условиях реакторного облучения.

## **RESULTS OF THE REACTOR EXPERIMENT TO STUDY THE INTERACTION PARAMETERS OF HYDROGEN ISOTOPES WITH LITHIUM CPS**

*S. K. Askerbekov<sup>1,2</sup>, T. V. Kulsartov<sup>1,2</sup>, Zh. A. Zaurbekova<sup>1,2</sup>,  
Yu. N. Gordienko<sup>3</sup>, Yu. V. Ponkratov<sup>3</sup>*

<sup>2</sup>Institute of Applied Sciences and Information Technology,  
Almaty, Kazakhstan

<sup>1</sup>Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan

<sup>3</sup>Branch «Institute of Atomic Energy» of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Lithium and compounds based on it are considered as tritium-producing materials of the breeder blanket of fusion plants under development. In most cases, the realization of the advantage of lithium over other materials is based on the use of the lithium capillary porous system (CPS), a fundamentally new material in which liquid lithium is stabilized in a matrix of solid porous material by capillary forces.

A necessary condition for the use of such systems in fusion reactors is the possibility of their detritalization. Therefore, the study of the interaction of hy-

drogen isotopes with lithium CPS under reactor irradiation conditions will provide new experimental data.

This paper presents the results of such studies, namely the testing of the lithium CPS at the steady-state thermal power levels of the IVG.1M reactor (Kurchatov): 1 MW; 3 MW and 6 MW.

Experiments were carried out on the reactor ampoule containing the sample of lithium CPS under study by dynamic sorption. Quasi-equilibrium pressure levels of deuterium in the system at different temperatures of the sample (in the range up to 700 °C) and different levels of deuterium flows fed into the continuously pumped ampoule with the studied sample were determined.

The scientific novelty of the results obtained consists in new experimental data: the temperature dependence of the change in the gas composition in the chamber with lithium CPS, when supplied with different levels of deuterium fluxes under reactor irradiation conditions.

**Кулагин Владимир Владимирович**

Аспирант, м.н.с.

Национальный Исследовательский Ядерный  
Университет «МИФИ»

Каширское шоссе, 31, 115409, Москва, Россия

Взаимодействие плазмы с поверхностью,  
магнитное удержание плазмы, диагностика  
поверхности обращенных к плазме элементов**Vladimir Kulagin**

Ph.D. student, Junior researcher

National Research Nuclear University MEPHI

Kashirskoe shosse, 31, 115409 Moscow, Russia

Plasma-wall interaction, magnetic confinement

of burning plasma, diagnostics

of plasma-facing components

vvkulagin@mephi.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ЛАЗЕРНО-ИНДУЦИРОВАННОЙ  
ДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА С ПОВЕРХНОСТИ ВОЛЬФРАМА  
И БЕРИЛЛИЯ***В. В. Кулагин, Ю. М. Гаспарян*Национальный Исследовательский Ядерный Университет «МИФИ»,  
Москва, Россия

Использование смеси дейтерия (D) и трития (T) в будущих термо-ядерных установках, типа Международного Термоядерного Экспериментального Реактора (ИТЭР), накладывает ограничения на содержание радиоактивного трития в стенках вакуумной камеры. На данный момент измерения содержания захваченного T проводятся на основе баланса напускаемого и откачиваемого газа, а также путем анализа элементов стенки, извлеченных после экспериментов. Для локального *in situ* мониторинга рассматривается совокупность лазерно-индуцированных методов [1]. Одним из них является анализ лазерно-индуцированной десорбции (ЛИД) захваченного газа. Диагностика ЛИД основана на локальном нагреве по-

верхности и последующем масс-спектрометрическом (ЛИД-МС) или спектроскопическом (ЛИДС) анализе вышедшего газа [2].

В данной работе представлены результаты численного моделирования десорбции водорода с поверхности вольфрама и бериллия при лазерном нагреве с наносекундной и миллисекундной длительностью импульса. Результаты были получены на основе макроскопической реакционно-диффузионной модели транспорта водорода в металлах [3, 4]. Показано, что наибольшая эффективность десорбции достигается вблизи температуры плавления при тепловой нагрузке с миллисекундной длительностью импульса. Отдельное внимание было уделено оценке атомарной фракции в потоке десорбированного водорода, вклад от которой обычно не рассматривается. Прямая десорбция атомов потенциально возможна при интенсивном нагреве поверхности до высоких температур ( $>2000$  К) [5]. Образование атомов во время десорбции может привести к росту погрешности измерений при интерпретации результатов ЛИДС/ЛИД-МС. Было определено, что атомарная фракция составляет заметную часть от полного потока десорбированного водорода только при длительном нагреве до температуры плавления материала. В остальных случаях атомарная фракция не превышает 10% от полного потока с поверхности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Philipps V. et al. Nucl. Fusion 093002 (2013) 53.
2. Zlobinski M. et al. Fusion Eng. Des. 1332–1335 (2011) 86.
3. Schmid K. et al. Phys. Scr. 014037 (2017) T170.
4. Hodille E. A. et al. J. Nucl. Mater. 424–431 (2015) 467.
5. Tschersich K.G. J. Appl. Phys. 2565–2573 (2000) 87.

## **SIMULATION OF LASER-INDUCED DESORPTION OF HYDROGEN FROM TUNGSTEN AND BERYLLIUM SURFACES**

*V. V. Kulagin, Yu. M. Gasparyan*

National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

The use of deuterium-tritium (D-T) mixture in future fusion devices, like International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), limits the amount

of radioactive tritium in the vacuum vessel. At present, measurements of the T content are based on the gas-balance method and the analysis of wall elements extracted from the installation. Various laser-induced techniques are suggested for the local *in situ* monitoring [1]. Laser-induced desorption (LID) is one of such diagnostics. This technique involves local heating of the surface followed by the mass-spectrometric (LID-MS) or spectroscopic (LIDS) analysis of the desorbed gas [2].

The current study presents the results of numerical simulations on hydrogen desorption from tungsten and beryllium surfaces under laser heat loads with nanosecond and millisecond duration. The results are obtained using a macroscopic reaction-diffusion model of hydrogen transport in metals [3, 4]. It is shown that the highest efficiency of hydrogen desorption is achieved at temperatures near the melting point after heat loads with millisecond duration. A particular attention is devoted to the estimation of an atomic fraction in the desorption flux of hydrogen. Atomic desorption is usually neglected in the simulations, although it is possible under intense heating of the surface to high temperatures ( $>2000$  K) [5]. The appearance of atoms in the desorption flux can probably introduce an additional error when interpreting the results of LIDS/LID-MS measurements. According to the results, the atomic fraction noticeably contributes to the desorption flux only under long-term heating to the near-melting temperatures. Under other conditions, it is found to constitute less than 10% of the total desorption flux from the surface.

## REFERENCES

1. Philipps V. et al. Nucl. Fusion 093002 (2013) 53.
2. Zlobinski M. et al. Fusion Eng. Des. 1332–1335 (2011) 86.
3. Schmid K. et al. Phys. Scr. 014037 (2017) T170.
4. Hodille E. A. et al. J. Nucl. Mater. 424–431 (2015) 467.
5. Tschersich K.G. J. Appl. Phys. 2565–2573 (2000) 87

**Анфимова Татьяна Александровна**  
Лаборант – исследователь  
НИИ «Курчатовский институт»  
123182, пл. Ак. Курчатова, 1  
Термоядерный синтез, изотопы водорода

**Anfimova Tatyana**  
Research assistant  
NRC Kurchatov institute  
Ac. Kurchatov sq., 1, Moscow RU-123182  
Fusion, hydrogen isotopes  
anfimova\_t\_a@mail.ru



## **ИЗОТОПНЫЙ ЭФФЕКТ ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ ВОДОРОДА С МАТЕРИАЛАМИ ТЯР**

*Т. А. Анфимова<sup>1,2</sup>, А. В. Голубева<sup>1</sup>,*

<sup>1</sup>НИИ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>Российский химико-технологический университет  
им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

Одним из ключевых вопросов термоядерной энергетики является выбор материалов термоядерного реактора в соответствии с жесткими условиями их эксплуатации и требованиями безопасности. К важным критериям выбора материалов, обращенных к плазме, а также конструкционных материалов, не подвергающихся воздействию плазмы, относятся благоприятные характеристики взаимодействия изотопов водорода с материалом. Воздействие интенсивных потоков изотопов водорода на материалы первой стенки реактора и конструкционные материалы будет приводить к захвату дейтерия и трития в этих материалах и проникновению изотопов водорода сквозь эти материалы за пределы камеры реактора. Для обеспечения безопасности термоядерного реактора необходимо контролировать и насколько возможно снизить потери радиоактивного трития за счет потоков через стенки камеры реактора. Также учет трития имеет особое значение для организации топливного цикла термоядерного реактора.

Характеристики взаимодействия изотопов водорода с материалами чаще всего определяют в экспериментах с дейтерием и тритием. Поскольку тритий радиоактивен, организовать эксперименты с ним значительно сложнее. Изотопный эффект проявляется в отличии параметров взаимодействия протия, дейтерия и трития с материалами. Понимание механизмов удержания водорода в материалах и изучение изотопного эффекта позволят предсказать параметры взаимодействия трития с материалами на основании данных, полученных с более легкими изотопами водорода.

Целью данной работы является суммирование и анализ имеющихся данных по изотопному эффекту при взаимодействии изотопов водорода с обращенными к плазме и конструкционными материалами ТЯР.

В работе рассмотрены транспортные характеристики изотопов водорода – коэффициенты диффузии, проницаемости и растворимости в ряде металлов и сплавов (W, Вe, ферритно-мартенситные стали, аустенитные нержавеющие стали, сплав CuCrZr). Согласно классической теории диффузии можно ожидать, что коэффициенты диффузии и проницаемости изотопов водорода соотносятся как корень из обратного отношения масс соответствующих изотопов. В работе продемонстрировано, что экспериментальные данные не всегда согласуются с предположениями, основанными на классической теории диффузии. Для предсказания потоков трития через металлы требуется более детальный анализ.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

## ISOTOPE EFFECT IN THE INTERACTION OF HYDROGEN WITH FUSION REACTOR MATERIALS

*T. Anfimova<sup>1,2</sup>, A. Golubeva<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow (Russia)

<sup>2</sup>Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow (Russia)

A choice of fusion reactor materials in accordance with the harsh conditions of operation and safety requirements is one of the most important issues of fusion energy. Favorable interaction characteristics with hydrogen isotopes are important criteria for selecting the plasma-facing and structural materials. The impact of the intense flows of hydrogen isotopes on the reactor first wall and structural materials can lead to the retention of deuterium and tritium in these materials and the penetration of hydrogen isotopes outside the reactor

chamber. To ensure the safety of a fusion reactor, it is necessary to control and, as far as possible, reduce the loss of radioactive tritium through the walls of the reactor chamber. Also accounting for tritium is of a particular importance for the organization of a fusion fuel cycle.

Characteristics of the interaction of hydrogen isotopes with materials are often determined from experiments with deuterium and protium. It is much more difficult to organize experiments with radioactive tritium. The isotope effect is manifested in the difference between the parameters of the interaction of hydrogen, deuterium and tritium with materials. Understanding the mechanisms of hydrogen retention in materials and studying the isotope effect will make possible to predict the parameters of the interaction of tritium with materials based on known parameters for light isotopes.

The purpose of this work is to summarize and analyze the available data on the isotope effect at the interaction of hydrogen isotopes with plasma-facing and structural materials of fusion reactor.

The paper considers diffusivity, permeability and solubility of hydrogen isotopes in metals and alloys (W, Be, ferritic/martensitic steels, austenitic stainless steels, CuCrZr alloy) for fusion. According to the classical rate theory, it can be expected that the diffusivities of hydrogen isotopes correlate as the root of the inverse ratio of the isotope masses. It is shown that the experimental data are not always consistent with the classical rate theory. A more detailed analysis is required in order to predict tritium fluxes through metals.

This work was supported by the National Research Center «Kurchatov Institute».

**Фефелова Елена Алексеевна**

Инженер, магистрант

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Каширское ш., 31, Москва, 115409

Влияние гелия на накопление и удержание водорода в со-осажденных из плазмы металлических слоях и их свойства

**Elena Fefelova**

Engineer, master student

Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI)

Kashirskoe sh., 31, Moscow, 115409

Effect of Helium on the accumulation and retention of Hydrogen in plasma co-deposited metal layers and their properties  
eafefelova98@yandex.ru**ВЛИЯНИЕ ГЕЛИЯ НА НАКОПЛЕНИЕ ВОДОРОДА  
В ОСАЖДЕННЫХ ИЗ ПЛАЗМЫ ВОЛЬФРАМОВЫХ СЛОЯХ***Е. А. Фефелова, С. А. Крат, Ю. М. Гаспарян, В. С. Ефимов,  
М. М. Зарипова, М. Г. Исаенкова, А. А. Писарев*

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Накопление трития в материалах термоядерных установок является проблемой с точки зрения радиационной безопасности. Максимальное допустимое содержание трития в главной вакуумной камере ИТЭР в любой момент времени составляет 700 г [1]. Одним из основных механизмов накопления изотопов водорода в реакторе является соосаждение с материалами обращенных к плазме элементов [2, 3]. В ИТЭР в качестве материала наиболее нагруженной области первой стенки – дивертора, выбран вольфрам. Понимание процесса соосаждения изотопов водорода с этим металлом необходимо для количественной оценки удержания трития в обращенных к плазме элементах.

Гелий является результатом термоядерной реакции дейтерия с тритием, примесь гелия в плазме может влиять на содержание водорода в со-

осажденных металлических слоях. В результате внедрения гелия образуются дополнительные дефекты, которые могут быть заполнены водородом [4]. Можно предположить, что наличие гелия приведет к изменению накопления трития в соосажденных слоях из-за изменения структуры по сравнению с накоплением, предсказываемым для металлических слоев, соосажденных без его примеси в газовой смеси. В экспериментах по соосаждению в Ag-D<sub>2</sub> было обнаружено влияние морфологии на накопление водорода [5]. Необходимо изучить влияние гелия на соосаждение трития с материалами стенки камеры для дальнейшей оценки удержания трития в материалах ИТЭР.

В рамках данной работы проводились две серии экспериментов по соосаждению дейтерия с вольфрамом на экспериментальной установке MP-2 [6], предназначенной для нанесения металлических пленок методом магнетронного распыления. Она состоит из двух отдельно откачиваемых камер – камеры осаждения и камеры ТДС. Планарный магнетрон постоянного тока был использован для распыления вольфрамовой пластины в качестве рабочего газа Ag-D<sub>2</sub>-He. Примесь гелия в газовой смеси составляла 0, 5 и 20% от давления дейтерия. В камере осаждения остаточное давление составляло  $3 \cdot 10^{-5}$  Па, рабочее давление составляло  $6,0 \pm 0,2$  Па, а парциальное давление Ag составляло 2,8 Па. Напряжение, ток и мощность разряда составляли ~600 В, ~0,3 А и 200 Вт соответственно. В камере ТДС остаточное давление составляло примерно  $10^{-7}$  Па.

В первой серии осаждение проводилось для диапазона температур от 400 до 800 К. Для полученных образцов был проведен по методу термодесорбционной спектрометрии (ТДС) *in vacuo*. Анализ показал, что присутствие гелия в целом подавляет накопление дейтерия в пленке. Это может быть объяснено тем, что гелий и дейтерий конкурируют за одни и те же типы ловушек. При этом гелий при соосаждении в смеси с дейтерием, по большей части десорбируется в области низких температур. Однако ТДС анализ проводился до температуры 1400 К, гелий может десорбироваться при более высоких температурах.

Во второй серии осаждение проводилось для трех температур 400, 500 и 800 К. Полученные образцы исследовались методом растровой электронной микроскопии (РЭМ) с использованием микроскопа модели Vega 3 Tescan. Все изображения были получены в отраженных электронах, это позволяет так же получить дополнительную информацию распределении электронной плотности на поверхности образца, а значит и об атомарном составе. Образцы не имели развитого рельефа поверхности, присутствовали единичные дефекты в виде трещин и пылинок, не превышающих

размеры 20 мкм. В [7] при сосаждении вольфрама в чисто гелиевой плазме были обнаружены пузырьки размером до 20 нм. Разрешающая способность микроскопа Vega 3 Tescan не позволяет увидеть дефекты таких размеров.

Так же был проведен рентгеновский анализ фазового состава полученных во второй серии экспериментов вольфрамовых пленок. Запись дифракционных спектров для определения фазового состава образцов и оценки их структурного состояния проводилась на дифрактометре Bruker D8 Discover при использовании  $\text{Cu K}_\alpha$  излучения и позиционно-чувствительного детектора LynxEye. Покрyтия преимущественно имеют ОЦК-решетку, мелкодисперсны и имеют постоянную решетки больше, чем для монокристаллического вольфрама. Большая постоянная решетки может быть объяснена большим количеством атомов газа в сосажденной пленке.

Образцы второй серии экспериментов были исследованы методом термодесорбционной спектроскопии уже *post mortem*. Полученные ТДС-пики структурно схожи с ТДС-пиками, полученными без выноса на атмосферу. Гелий так же высвобождается при температурах от 1800 до 2000 К. Однако для образцов, осажденных в дейтерий-гелиевой смеси, количество гелия, десорбирующегося при этих температурах, падает. Это так же означает, что гелий не будет значительно препятствовать отжигу дефектов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Roth J. et al. *J. Nucl. Mater.*, vol. 390–391, no. 1, p. 1–9, Jun. 2009.
2. Roth J. et al. *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 50, no. 10, p. 103001, Oct. 2008.
3. Widdowson A. et al. *Nucl. Fusion*, vol. 57, no. 8, 2017.
4. Bernard E. et al. *Nucl. Mater. Energy*, vol. 19, no. August 2018, p. 403–410, 2019.
5. Alimov V. K. et al. *J. Nucl. Mater.*, vol. 420, no. 1–3, p. 519–524, 2012.
6. Krat S. A. et al. *J. Instrum.*, vol. 15, no. 1, 2020.
7. Katayama K. et al. *Fusion Sci. Technol.*, vol. 1055, 2017.

## **EFFECT OF HELIUM ON THE ACCUMULATION OF DEUTERIUM IN CO-DEPOSITED TUNGSTEN LAYERS**

*E. A. Fefelova, S. A. Krat, Yu. M. Gasparyan, V. S. Efimov, M. M. Zaripova,  
M. G. Isaenkova, A. A. Pisarev*

Moscow Engineering Physics Institute (MEPhI)

The accumulation of tritium in the materials of fusion devices is a radiation safety issue. The maximum content of tritium within the main vacuum chamber of ITER at any time is 700 grams [1]. One of the main mechanisms of hydrogen isotopes accumulation in the reactor is their co-deposition with plasma-facing materials (PFM) [2, 3]. In ITER, tungsten was chosen as the divertor material. Understanding the process of co-deposition of hydrogen isotopes and tungsten is necessary for a quantitative retention analysis of tritium in PFM.

Helium is the result of a fusion reaction of deuterium with tritium. The admixture of helium in plasma can affect the hydrogen content in co-deposited metal layers. As a result of the helium implantation, additional defects can be formed, which can be filled with hydrogen [4]. It may be assumed that the presence of helium will change how tritium accumulates in the co-deposited layers due to a change in the structure compared to how tritium accumulates in metal layers co-deposited without its admixture in the plasma. Co-deposition experiments with Ar-D<sub>2</sub> plasma have shown the influence of morphology on the accumulation of hydrogen [5]. It is necessary to study the effect of helium on the co-deposition of tritium and with plasma-facing materials in order to further evaluate the retention of tritium in ITER materials.

In this work, two series of experiments were carried out on deuterium co-deposition with tungsten using the MD-2 experimental setup [6], designed for co-deposition of metal films by magnetron sputtering. It consists of two separately evacuated chambers – the co-deposition chamber and the TDS chamber. A planar DC magnetron was used to sputter a tungsten plate in an Ar-D<sub>2</sub>-He gas mixture. The helium admixture in the gas was 0, 5, and 20% of the deuterium pressure. In the co-deposition chamber, the residual pressure was  $3 \cdot 10^{-5}$  Pa, the operating pressure was  $6.0 \pm 0.2$  Pa, and the Ar partial pressure was 2.8 Pa. The voltage, current, and discharge power were  $\sim 600$  V,  $\sim 0.3$  A, and 200 W, respectively. In the TDS chamber, the residual pressure was approximately  $10^{-7}$  Pa.

In the first series, the deposition was carried out for the temperature range from 400 to 800 K. For the samples obtained, thermal desorption analysis was carried out *in-vacuo*. The analysis showed that the presence of helium generally suppresses the accumulation of deuterium in the film. This can be explained by the fact that helium and deuterium compete for the same types of traps. In this case, helium, when co-deposited with deuterium, for the most part desorbs at low temperatures. However, the TDS analysis was carried out only up to 1400 K; helium can desorb at higher temperatures.

In the second series, the deposition was carried out for temperatures: 400, 500 and 800 K. The samples were examined via scanning electron microscopy (SEM) using a Vega 3 Tescan microscope. All images were obtained from backscattered electrons, which also makes it possible to obtain additional information on the distribution of electron density on the surface of the sample, and hence on the atomic composition. The samples did not have a developed surface relief; there were single defects in the form of cracks and dust particles not exceeding 20  $\mu\text{m}$  in size. In [7], during the co-deposition of tungsten in pure helium plasma, bubbles up to 20 nm in size were observed. The resolution of the Vega 3 Tescan microscope does not allow us to see defects of this size.

An X-ray analysis of the phase composition of the co-deposited tungsten films was also carried out. Diffraction spectra of the phase composition of the samples were recorded via Bruker D8 Discover diffractometer using  $\text{Cu K}\alpha$  radiation and a LynxEye position-sensitive detector for and used for assessment of their structural state. The films predominantly have a bcc lattice, are finely dispersed, and have a lattice constant greater than single-crystal tungsten. The large lattice constant can be explained by the large number of gas atoms in the co-deposited film.

Second series samples were studied via thermal desorption spectroscopy after the removal from the vacuum chamber. The resulting TDS peaks are structurally similar to the TDS peaks obtained post mortem. Helium is also released at temperatures from 1800 to 2000 K. However, for samples deposited in a deuterium-helium mixture, the amount of helium desorbed at these temperatures decreases. This means that helium does not significantly interfere with defect annealing.

## REFERENCES

1. Roth J. et al. *J. Nucl. Mater.*, vol. 390–391, no. 1, p. 1–9, Jun. 2009.
2. Roth J. et al. *Plasma Phys. Control. Fusion*, vol. 50, no. 10, p. 103001, Oct. 2008.
3. Widdowson A. et al. *Nucl. Fusion*, vol. 57, no. 8, 2017.
4. Bernard E. et al. *Nucl. Mater. Energy*, vol. 19, no. August 2018, p. 403–410, 2019.
5. Alimov V. K. et al. *J. Nucl. Mater.*, vol. 420, no. 1–3, p. 519–524, 2012.
6. Krat S. A. et al. *J. Instrum.*, vol. 15, no. 1, 2020.
7. Katayama K. et al. *Fusion Sci. Technol.*, vol. 1055, 2017.

**Анфимова Татьяна Александровна**

Лаборант – исследователь

НИЦ «Курчатовский институт»

123182, пл. Ак. Курчатова, 1

Термоядерный синтез, изотопы водорода

**Anfimova Tatyana**

Research assistant

NRC Kurchatov institute

Ac. Kurchatov sq., 1, Moscow RU-123182

Fusion, hydrogen isotopes

anfimova\_t\_a@mail.ru



## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНОГО ОБМЕНА ВОДОРОДА В БРОНЗЕ CuCrZr**

*Н. П. Бобырь<sup>1,2</sup>, Т. А. Анфимова<sup>1,3</sup>, Д. С. Дугин<sup>1</sup>,  
Д. А. Козлов<sup>1</sup>, М. Б. Розенкевич<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт  
неорганических материалов имени академика А. А. Бочвара»,  
Москва, Россия

<sup>3</sup>Российский химико-технологический университет  
им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

Применение трития в качестве одного из компонентов топлива в термоядерном реакторе привлекает особое внимание к безопасности его эксплуатации. Способность изотопов водорода проникать через твердые материалы, особенно при ожидаемых в процессе работы реактора температурах, может приводить к существенному накоплению трития в материалах. Существующий риск возникновения аварийной ситуации, повреждения элементов реактора, загрязнения тритием теплоносителя, а также безусловная необходимость технического обслуживания установки и уменьшения количеств захораниваемых радиоактивных отходов делают задачу снижения активности материалов реактора одной из приоритетных. Помимо вопросов безопасности и экологии извлечение трития из материалов

актуально также и с точки зрения экономики – высокая стоимость и ограниченность ресурсов трития приводит к необходимости снижения его безвозвратных потерь и повторного использования. В настоящее время в реакторе ИТЭР в качестве основного метода детритизации рассматривается вакуумный отжиг первой стенки реактора при 513 К и дивертора при 623 К [1]. Однако эксперименты в ходе кампании JET ITER-Like Wall показали, что данный метод не является высокоэффективным [2].

Метод изотопного обмена, основанный на замещении тяжелых изотопов в материале легкими изотопами водорода, может стать перспективной альтернативой вакуумному отжигу или использоваться в качестве метода доочистки элементов вакуумной камеры. В рамках данной работы было проведено исследование изотопного обмена дейтерия в одном из материалов ТЯР – бронзе CuCrZr с водородом из газовой фазы. Для исследования использовались образцы бронзы, насыщенные дейтерием при температуре 400 °С и давлении 1 атм. Часть образцов предварительно облучалась ионами Fe<sup>2+</sup> для наработки дефектов в структуре образцов. В работе представлены результаты серии экспериментов, целью которых было сравнить эффективность изотопного обмена в предварительно облученных и необлученных образцах, а также оценить влияние температуры на эффективность изотопного обмена дейтерия из твердой фазы с газообразным водородом.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Nobuta Yu. et al. *Fusion Engineering and Design*. 111703 (2020) 157.
2. Temmerman G. De. et al. *Nuclear Materials and Energy*. 267–272 (2017) 12.

## **INVESTIGATION OF THE HYDROGEN ISOTOPIC EXCHANGE IN BRONZE CuCrZr**

*N. Bobyr<sup>1,2</sup>, T. Anfimova<sup>1,3</sup>, D. Dugin<sup>1</sup>, D. Kozlov<sup>1</sup>, M. Rozenkevich<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow (Russia)

<sup>2</sup>Stock Company «A. A. Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials», Moscow (Russia)

<sup>3</sup>Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow (Russia)

The use of tritium as fuel component in a fusion reactor requires special attention to the safety of operation. The ability of hydrogen isotopes to penetrate solid materials, especially at reactor temperatures, can lead to tritium retention in the reactor materials. The risk of an accident and incident, as well as the need for maintenance of the facility and reduction of the amount of radioactive waste make the task of reducing the activity of reactor materials one of the priorities. The tritium removal from materials is also important from the point of view of economics. The high cost and limited tritium resources lead to the need to reduce irretrievable losses and reuse. Vacuum annealing of the first wall of the reactor at 513 K and of the divertor at 623 K is considered as the main detritization method in the ITER reactor [1]. However, experiments during the ITER-Like Wall campaigns showed that this method is not highly efficient [2].

The isotope exchange method can become a promising alternative to vacuum annealing. Also this method can be used for additional cleaning vacuum chamber elements. The isotope exchange method is based on the replacement of heavy isotopes in the material with light hydrogen isotopes. A study was made of the isotopic exchange of deuterium in bronze CuCrZr with hydrogen from the gas phase was made. Bronze specimens were saturated with deuterium at 400 °C and pressure 1 atm. Some specimens were preliminarily irradiated with ions  $\text{Fe}^{2+}$  to induce defects in the sample structure. The paper presents the results of comparing the efficiency of isotopic exchange in pre-irradiated and non-irradiated specimens and the results of a study of the temperature effect on efficiency of isotopic exchange of deuterium from the solid phase with hydrogen from the gas phase.

This work was supported by the National Research Center «Kurchatov Institute».

## REFERENCES

1. Nobuta Yu. et al. Fusion Engineering and Design. 111703 (2020) 157.
2. Temmerman G.De. et al. Nuclear Materials and Energy. 267–272 (2017) 12.

**Грачев Василий Алексеевич**

Младший научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт»  
123182 Россия, Москва,  
пл. Академика Курчатова, д. 1  
Радиационная химия,  
ВХР первого контура, третий

**Grachev Vasilii Alexeevich**

Junior research scientist  
NRC «Kurchatov Institute»  
123182 Russia, Moscow,  
Akademika Kurchatov sq, 1  
Radiation chemistry,  
primary circuit WCM, tritium  
Grachev\_VA@nrcki.ru



**ВКЛАД ТОПЛИВА ВВЭР В НАКОПЛЕНИЕ Н-3  
В ТЕПЛОНОСИТЕЛЕ ПЕРВОГО КОНТУРА**

*В. А. Грачев, О. С. Быстрова, А. Б. Сазонов*

НИЦ «Курчатовский институт», г. Москва

Основной вклад в образование  $^3\text{H}$  (трития) в активной зоне ВВЭР вносят процессы тройного деления ядер урана и плутония (более 95%), а также реакция  $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$ , идущая в теплоносителе первого контура. При работе реактора на мощности большая часть трития удерживается твэлами. Процент удержания до настоящего времени остается предметом споров. Среднюю величину выхода трития в теплоноситель принято считать равной 0,1% [1]. Тем не менее, хорошо известно, что факторами, влияющими на выход  $^3\text{H}$  из топлива, являются вид ядерного топлива, глубина выгорания, линейная тепловая мощность твэлов и проницаемость материала их оболочек. В связи с увеличением мощности ВВЭР-1000, продолжительности топливных циклов, а также ввиду перспектив использования MOX- и REMIX-топлива и оболочек из материалов иных, нежели традиционные циркониевые сплавы, значение выхода  $^3\text{H}$  требует пересмотра для каждого случая в отдельности.

В настоящей работе выход трития из топлива в теплоноситель определяли на основании моделирования его переноса по следующей схеме: «топливная матрица – газовый зазор – оболочка – теплоноситель». Распределение трития в объеме топливных таблеток рассчитывается полуэмпирически, с привлечением имеющихся экспериментальных данных. Независимыми параметрами при этом служат время и зависящее от времени температурное поле. При этом перенос трития из топливной матрицы в газовый зазор описывается как химическая реакция разложения. Скорость разложения определяет поток атомов  $^3\text{H}$  в зазор, где распределение трития становится однородным. Принимается, что накопления  $^3\text{H}$  на межфазной границе «газ – твердое тело» не происходит. Перенос трития через оболочку описывается классической моделью одномерной диффузии атомов, растворенных в твердом теле.

Расчеты были проведены для «стандартного» варианта топлива реакторов: матрица  $\text{UO}_2$ , оболочка из сплава  $\text{Zr}$  и т. п. Получены значения выхода  $^3\text{H}$  в теплоноситель в диапазоне от 0,3 до 0,5% в зависимости от условий работы твэла. Сравнение этих результатов с данными по активности  $^3\text{H}$  в сбросах и выбросах кипящих реакторов (BWR) [2] говорит об адекватности проведенной расчетной оценки. Результаты аналогичных расчетов для оболочек из сплавов хрома и никеля демонстрируют высокую проницаемость последних для трития.

Таким образом, расчетные значения выхода  $^3\text{H}$  из топлива в теплоноситель через оболочку неповрежденных твэлов оказываются выше, чем традиционно принятые 0,1%. Более того, в среднем они даже выше значения, принимаемого с учетом проектной негерметичности твэлов (0,32%). Для ВВЭР с борным регулированием такие различия не проявляют себя на практике, так как сбросы и выбросы трития определяются его многократно большим образованием из  $^{10}\text{B}$ . Однако для тех разработок, где борное регулирование не предусмотрено, вклад топлива в утечки трития в окружающую среду становится определяющим и должен оцениваться с учетом полученных результатов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Bonka H. Production and emission of tritium from nuclear facilities, and the resulting problems. Behavior of Tritium in the Environment. Processing of the International symposium, San Francisco, 16–20 October, 1978. IAEA, Vienna, 1979. P. 105–123.

2. Scoping Study: Discharges from Boiling Water Reactors. Report – SC130018/R // Evidence. Bristol, Environment Agency, 2015.

## **THE CONTRIBUTION OF VVER FUEL TO THE ACCUMULATION OF H-3 IN THE PRIMARY COOLANT**

*V. A. Grachev, O. S. Bystrova, A. B. Sazonov*

NRC «Kurchatov Institute», Moscow

The main contribution into formation of  $^3\text{H}$  (tritium) in the VVER core is made by the processes of triple fission of uranium and plutonium nuclei (more than 95%), as well as the  $^{10}\text{B}(n, 2\alpha)^3\text{H}$  reaction occurring in the primary coolant. When the reactor is operating at power generation mode, most of the  $^3\text{H}$  is retained by fuel rods. The percentage of retention remains a subject of controversy to date. The average value of  $^3\text{H}$  release into the coolant is considered to be equal to 0.1% [1]. Nevertheless, it is well known that the factors affecting release of  $^3\text{H}$  are the type of nuclear fuel and its burnup, linear thermal power of fuel rods, and permeability of their shell material. Due to the increase in both power of VVER-1000 and duration of fuel cycles, as well as in view of the prospects for using MOX and REMIX fuels and shells made of materials other than traditional zirconium alloys, the value of the  $^3\text{H}$  yield requires revision for each case separately.

In this paper, the release of  $^3\text{H}$  from the fuel into the coolant was determined based on the simulation of its transfer according to the following scheme: «fuel matrix – gas-filled gap – cladding – coolant». Spatial distribution of  $^3\text{H}$  in the fuel pellets was calculated semi-empirically, using available experimental data. Time and time-dependent temperature field were considered as independent parameters. Transfer of  $^3\text{H}$  from the fuel matrix to the gas-filled gap is described as a chemical decomposition reaction. The rate of decomposition determines the flow of  $^3\text{H}$  atoms into the gap, where the  $^3\text{H}$  distribution becomes homogeneous. It is assumed that the accumulation of  $^3\text{H}$  at the gas – solid interface does not occur. The transfer of  $^3\text{H}$  through the shell is described by the classical model of one-dimensional diffusion of atoms dissolved in a solid.

Calculations were performed for a typical version of the reactor fuel:  $\text{UO}_2$  matrix, Zr-alloy cladding, etc. The values of the  $^3\text{H}$  release to the coolant in the range from 0.3 to 0.5%, depending on the operating conditions of the fuel element, were obtained. Comparison of these results with data on the activity of  $^3\text{H}$  in discharges and emissions of boiling reactors (BWR) [2] indicates the adequacy of estimates done. The results of similar calculations for claddings

made of chromium-nickel alloys demonstrate high permeability of the latter for  $^3\text{H}$ .

Thus, calculated values of  $^3\text{H}$  release from the fuel into the coolant through claddings of the intact fuel rods are higher than traditionally accepted 0.1%. Moreover, on average, they are even higher than the value assumed taking into account the design leakiness of fuel rods (0.32%). For VVER with boron control, such differences are insignificant, since the discharges and emissions of  $^3\text{H}$  are determined by its many times larger formation of  $^{10}\text{B}$ . However, for those developments where boron control is not applied, the contribution of fuel to  $^3\text{H}$  leaks into the environment becomes crucial and should be evaluated with taking into account the results obtained.

**Аханов Асыл Максатулы**

Инженер лаборатории проблем безопасности  
атомной энергии  
Республиканское государственное предприятие  
«Институт ядерной физики»  
Министерство энергетики Республика Казахстан  
Республика Казахстан, г. Алматы, Ибрагимова 1  
Ядерная физика, реакторные испытания,  
термоядерные реакторы



**Akhanov Assyl Maksatuly**

Engineer of the laboratory of safety problems  
of atomic energy  
Republican state enterprise  
«Institute of nuclear physics»  
Ministry of energy Republic of Kazakhstan  
Republic of Kazakhstan, Almaty city, Ibragimova 1  
Nuclear physics, reactor tests,  
thermonuclear reactors  
aakhanov@inp.kz, assyl\_akhanov@list.ru

**ГАЗОВЫДЕЛЕНИЕ ТРИТИЯ ИЗ ОДНОФАЗНОЙ ЛИТИЕВОЙ  
КЕРАМИКИ ПРИ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОМ НЕЙТРОННОМ  
ОБЛУЧЕНИИ В РЕАКТОРЕ ВВР-К**

*А. М. Аханов, М. Т. Айткулов, А. А. Шаймерденов, Т. В. Кульсартов,  
С. К. Аскербек*

Институт ядерной физики, Республика Казахстан

В реакторе ВВР-К проведено высокотемпературное облучение пэбблов из метатитаната лития до флюенса тепловых нейтронов  $1,8 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-2}$ . В процессе облучения проводилось измерение газовыделения из пэбблов методом вакуумной экстракции. Регистрация газовой компоненты проводилась масс-спектрометрическим методом на установке CIRRA. В результате были получены экспериментальные данные об особенностях газовыделения из метатитаната лития при его нагреве в условиях реакторного облучения. Выделение трития происходило в виде двух

молекул (HT и T<sub>2</sub>). Доля выделенной тритиевой воды менее 5% от общего количества выделенного трития. Показано, что доля трития, выделенного из керамики в виде молекулы HT снижается с 85 до 70% за один облучательный цикл (21 день). При этом, доля выделяемого трития в виде молекулы T<sub>2</sub>, существенно растет со временем облучения.

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства образования и науки Республики Казахстан (грант № AP13068172).

## **GAS RELEASE OF TRITIUM FROM SINGLE-PHASE LITHIUM CERAMICS DURING HIGH-TEMPERATURE NEUTRON IRRADIATION IN A WWR-K REACTOR**

*A. M. Akhanov, M. T. Aitkulov, A. A. Shaimerdenov, T. V. Kulsartov,  
S. K. Askerbekov*

Institute of Nuclear Physics, Republic of Kazakhstan

High-temperature irradiation of lithium metatitanate pebbles to an accumulate the thermal neutron fluence of  $1.8 \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-2}$  was carried out in the WWR-K reactor. The in-situ gas release from the pebbles was measured by the vacuum extraction method. The registration of the gas component was carried out by the mass spectrometric method at the CIRRA facility. As a result, experimental data were obtained on the peculiarities of gas release from lithium metatitanate when it is heated under reactor irradiation conditions. The tritium release occurred as two molecules (HT and T<sub>2</sub>). The proportion of tritium water released is less than 5% of the total amount of tritium released. It has been shown that the fraction of tritium released from the ceramics as a HT molecule decreases from 85 to 70% in one irradiation cycle (21 days). In this case, the proportion of tritium released as a T<sub>2</sub> molecule increases significantly with irradiation time.

This research is funded by the Science Committee of the Ministry of Education and Science of the Republic of Kazakhstan (Grant No. AP13068172).

**Пивень Владимир Алексеевич**

Доцент кафедры физики и электротехники  
Краснодарское высшее военное авиационное  
училище летчиков

Россия, г. Краснодар,

ул. Дзержинского, 135, 350090

Кинетика и термодинамика взаимодействия  
водорода с твердыми телами.

Гидриды и гидридные превращения

E-mail: piven-avia@mail.ru



**ПРОНИЦАЕМОСТЬ ВОДОРОДА СКВОЗЬ СПЛАВЫ НА ОСНОВЕ  
ПАЛЛАДИЯ И ВАНАДИЯ**

*В. А. Пивень<sup>1</sup>, Н. И. Сидоров<sup>2</sup>, И. Е. Габис<sup>3</sup>, В. И. Шупалов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков,  
Россия, 350090, Краснодар, Дзержинского 135

<sup>2</sup>Институт металлургии УрО РАН, Россия,  
620016, Екатеринбург, Амундсена 101

<sup>3</sup>Физический факультет, СПбГУ, Россия,  
198504, С-Петербург, Ульяновская 3

Нынешний интерес к развитию водородной энергетики в основном обусловлен истощением углеводородных ресурсов. В то же время в связи с развитием водородной энергетики возникла растущая потребность в водороде высокой чистоты (>99,9999%), извлечение которого из различных водородосодержащих газовых смесей возможно с помощью мембран из палладиевых сплавов. Однако, поскольку Pd является дорогостоящим металлом, желательно разработать недорогие и высокоэффективные сплавы для проникновения водорода и его изотопов, отличные от сплавов на основе палладия. К тому же, как оказалось, в зависимости от условий применения мембран на основе Pd они подвержены водородному охрупчиванию, что снижает их производительность.

Альтернативой палладиевым мембранным сплавам являются более дешевые сплавы на основе металлов 5-ой группы V, Nb и Ta. В чистом виде эти металлы подвержены водородному охрупчиванию, что связано с высокой растворимостью водорода. Помимо охрупчивания, высокая концентрация растворенного водорода может приводить к заметному расширению решетки и, в результате, «неидеальной диффузии» водорода [1]. Другой проблемой использования металлов V, Nb и Ta является то, что их поверхность легко покрывается оксидными пленками из-за большого сродства к кислороду этих металлов.

Ванадий вызывает наибольшее внимание из-за своей способности сохранять ОЦК структуру в более широком композиционном диапазоне, чем Ta и Nb.

Целью работы является комплексный сравнительный анализ адсорбционных и диффузионных процессов проникновения водорода сквозь мембраны из бинарных сплавов палладия (Pd-Y) и ванадия (V-Me, Me = Ni, Ti, Co) в температурном интервале 350–500 °С.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Flanagan T.B., Wang D., Shanahan K.L. Scripta Mater. 261–263 (2007) 56.

## PERMEABILITY OF HYDROGEN THROUGH PALLADIUM AND VANADIUM-BASED ALLOYS

*V. A. Piven<sup>1</sup>, N. I. Sidorov<sup>2</sup>, I. E. Gabis<sup>3</sup>, V. I. Shipalov<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots, Russia, 350090, Krasnodar, Dzerzhinsky 135

<sup>2</sup>Institute of Metallurgy of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Russia, 620016, Yekaterinburg, Amundsen 101

<sup>3</sup>Faculty of Physics, St. Petersburg State University, Russia, 198504, St. Petersburg, Ulyanovsky 3

The current interest in the development of hydrogen energy is mainly due to the depletion of hydrocarbon resources. At the same time, due to the development of hydrogen energy, there is a growing need for high purity hydrogen

(>99.9999%), the extraction of which from various hydrogen-containing gas mixtures is possible with the help of palladium alloy membranes. However, since Pd is an expensive metal, it is desirable to develop inexpensive and highly efficient alloys for the penetration of hydrogen and its isotopes, other than palladium-based alloys. In addition, as it turned out, depending on the conditions of use of Pd-based membranes, they are subject to hydrogen embrittlement, which reduces their performance.

An alternative to palladium membrane alloys are cheaper alloys based on metals of the 5th group V, Nb and Ta. In their pure form, these metals are subject to hydrogen embrittlement, which is due to the high solubility of hydrogen. In addition to embrittlement, a high concentration of dissolved hydrogen can lead to a noticeable expansion of the lattice and, as a result, "imperfect diffusion" of hydrogen [1]. Another problem with the use of metals V, Nb and Ta is that their surface is easily covered with oxide films due to the high affinity for oxygen of these metals.

Vanadium attracts the most attention because of its ability to preserve the BCC structure in a wider compositional range than Ta and Nb.

The aim of the work is a comprehensive comparative analysis of the adsorption and diffusion processes of hydrogen penetration through membranes made of binary alloys of palladium (Pd-Y) and vanadium (V-Me, Me = Ni, Ti, Co) in the temperature range 350–500 °C.

#### REFERENCE

1. Flanagan T.B., Wang D., Shanahan K.L. Scripta Mater. 261–263 (2007) 56.

**Кузенов Сергей Ризабекович**

Аспирант

СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Россия, г. Санкт-Петербург,

пр. Большевиков д. 22/1

Водородная энергетика, физическая химия

**Sergei Kuzenov**

PhD student

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State

University of Telecommunications

Russia, Saint-Petersburg

Hydrogen Energy, Physical chemistry

skuzenov@ya.ru

**ТРАНСПОРТ ВОДОРОДА ЧЕРЕЗ ОЦК-СПЛАВЫ V-Fe***С. Р. Кузенов, В. Н. Алимов, А. О. Буснюк, А. И. Лившиц,**Е. Ю. Передистов*

СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича, Россия, г. Санкт-Петербург

Металлические мембраны, выполненные из ОЦК-сплавов ванадия имеют в разы большую производительность по водороду по сравнению с мембранами из палладия и его сплавов [1–3]. В частности, из ОЦК-сплавов замещения V-Pd удалось создать высокопроизводительные мембраны трубчатой формы, способные извлекать сверхчистый водород из продуктов паровой конверсии углеводородных топлив [4]. Такой высокой производительности мембран удалось достичь в основном благодаря двум экспериментально обнаруженным эффектам: во-первых, Pd как легирующий элемент, значительно подавляет растворимость H в V, таким образом решая проблему водородной хрупкости при эксплуатации мембран из ванадиевых сплавов, во-вторых коэффициент диффузии H в ОЦК-сплавах замещения V-Pd соизмерим с коэффициентом диффузии H в чистом ванадии. Однако, в работах [5, 6] было описано, что Fe как легирующий элемент подавляет растворимость H в ванадии равносильно Pd, но кроме того, в тех же работах сообщалось о необычайно высоком значении коэффициента диффузии водорода D в неупорядоченных ОЦК сплавах V-Fe: даже выше, чем в чистом V!

В связи с этим неожиданным эффектом, был интерес продолжить исследование транспорта H через мембраны трубчатой формы из ОЦК сплавов V-Fe в диапазоне давлений, который может быть использован в практической эксплуатации данных мембран, например в условиях паровой конверсии углеводородных топлив.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Yukawa H., Nambu T., Matsumoto Y. V-W alloy membranes for hydrogen purification, *J. Alloys Compd.* 509 (2011) 881–884, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.161>.
2. Alimov V. N., Busnyuk A. O., Notkin M. E., Livshits A. I. Hydrogen transport through V-Pd alloy membranes: hydrogen solution, permeation and diffusion, *J. Membr. Sci.* 481 (2015) 54–62.
3. Paglieri S. N., Wermer J. R., Buxbaum R. E., Ciocco M. V., Howard B. H., Morreale B. D. Development of membranes for hydrogen separation: Pd coated V-10Pd. *Energy Mater* 2008;3:169-76.
4. Alimov V. N., Bobylev I. V., Busnyuk A. O., Kolgatin S. N., Kuzenov S. R., Peredistov E. Yu., Livshits A. I. EXTRACTION OF ULTRAPURE HYDROGEN WITH V-ALLOY MEMBRANES: FROM LABORATORY STUDIES TO PRACTICAL APPLICATIONS. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. T. 43. N 29. C. 13318–13327.
5. Suzuki A., Yukawa H., Nambu T., Matsumoto Y., Murata Y. Quantitative Evaluation of Hydrogen Solubility and Diffusivity of V-Fe Alloys toward the Design of Hydrogen Permeable Membrane for Low Operative Temperature. *Materials Transactions*, Vol. 57, No. 10 (2016), p. 1823 to 1831.
6. Asuka Suzuki, Hiroshi Yukawa. Quantitative Evaluations of Hydrogen Diffusivity in V-X (X = Cr, Al, Pd) Alloy Membranes Based on Hydrogen Chemical Potential Membranes, *Membranes* 2021, 11(1), 67. <https://doi.org/10.3390/membranes11010067>.

**THE HYDROGEN TRANSPORT THROUGH THE BCC-Fe ALLOYS**

*S. R. Kuzenov, V. N. Alimov, A.O. Busnyuk, E.U. Peredistov, A.I. Livshits*

Bonch-Bruevich Saint-Petersburg State University of Telecommunications,  
St. Petersburg, Russia  
skuzenov@ya.ru

The membranes of bcc V-alloys have significantly higher hydrogen performance compared to membranes made of palladium and its alloys [1–3]. In particular, from V-Pd substitution BCC alloys have been created tubular membranes capable of extracting with high productivity ultrapure hydrogen from the products of steam conversion of hydrocarbon fuels [4].

Such high performance for this membranes was achieved mainly due to two experimentally discovered effects: firstly, Pd as an alloying element, significantly suppressing the solubility of H in V, thus solving the problem of hydrogen brittleness during the operation of vanadium alloy membranes, and secondly, in BCC substitution alloys V-Pd the diffusion coefficient of H is near with the coefficient diffusion of H in pure vanadium. However, in articles [5, 6] it was described that Fe as an alloying element suppresses the solubility of H in vanadium as same as of Pd, but in addition, in the same works was reported about an unusually high value of the hydrogen diffusion coefficient  $D$  in disordered BCC V-Fe alloys: even higher than in pure V!

This unexpected effect have great of interest to continue studying the transfer of H through tubular membranes made of BCC V-Fe alloys in the pressure range that can be used in the practical operation of these membranes, for example, in the conditions of steam conversion of hydrocarbon fuels.

**REFERENCE**

1. Yukawa H., Nambu T., Matsumoto Y. V-W alloy membranes for hydrogen purification, *J. Alloys Compd.* 509 (2011) 881–884, <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2010.09.161>.
2. Alimov V. N., Busnyuk A. O., Notkin M. E., Livshits A. I. Hydrogen transport through V-Pd alloy membranes: hydrogen solution, permeation and diffusion, *J. Membr. Sci.* 481 (2015) 54–62.

3. Paglieri S. N., Wermer J. R., Buxbaum R. E., Ciocco M. V., Howard B. H., Morreale B. D. Development of membranes for hydrogen separation: Pd coated V-10Pd. *Energy Mater* 2008;3:169-76.

4. Alimov V. N., Bobylev I. V., Busnyuk A. O., Kolgatin S. N., Kuzenov S. R., Peredistov E. Yu., Livshits A. I. EXTRACTION OF ULTRAPURE HYDROGEN WITH V-ALLOY MEMBRANES: FROM LABORATORY STUDIES TO PRACTICAL APPLICATIONS. *International Journal of Hydrogen Energy*. 2018. T. 43. N 29. C. 13318–13327.

5. Suzuki A., Yukawa H., Nambu T., Matsumoto Y., Murata Y. Quantitative Evaluation of Hydrogen Solubility and Diffusivity of V-Fe Alloys toward the Design of Hydrogen Permeable Membrane for Low Operative Temperature. *Materials Transactions*, Vol. 57, No. 10 (2016), p. 1823 to 1831.

6. Asuka Suzuki, Hiroshi Yukawa. Quantitative Evaluations of Hydrogen Diffusivity in V-X (X = Cr, Al, Pd) Alloy Membranes Based on Hydrogen Chemical Potential Membranes, *Membranes* 2021, 11(1), 67. <https://doi.org/10.3390/membranes11010067>.

**Демидов Дмитрий Николаевич**

Инженер исследователь

НИЦ «Курчатовский институт»

г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1, 123098

Компьютерное моделирование,

радиационные процессы

и явления в твердых телах

**Dmitry Demidov**

Research engineer

NRC «Kurchatov Institute»

1 Kurchatov Square, Moscow, 123098, Russia

Computer modeling,

radiation processes and phenomena in solids

Demidov\_DN@nrcki.ru



## **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ДИФфуЗИОННЫХ ПАРАМЕТРОВ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА С ЛОВУШКАМИ В ОЦК W: АНАЛИЗ ТЕРМОДЕСОРБИЦИОННЫХ СПЕКТРОВ**

*Д. Н. Демидов, Н. П. Бобырь, С. С. Ананьев*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»

С использованием ранее разработанной модели [1], позволяющей рассчитывать транспортные характеристики водорода и его накопление в вакансиях в ОЦК (Fe, W), ГЦК (Cu), ГПУ (Be) металлах при непрерывном повреждении нейтронным облучением, предложена методика проведения анализа термодесорбиционных данных для образцов вольфрама, в том числе содержащих различные легирующие примеси, и позволяющая рассчитывать энергетические и кинетические параметры изотопов водорода в W.

С помощью данной методики рассчитаны энергии связи атомов дейтерия с ловушками различных типов в W, проведено численное моделирование влияния наличия таких ловушек на кинетические характеристики (коэффициент диффузии, проникающий поток через материал) дейтерия в W.

В докладе будут представлены результаты анализа экспериментальных данных и их сравнение с ранее проведенными в рамках модели [1] теоретическими оценками для кинетических характеристик водорода в материале с ловушками, а также с литературными данными о энергетических параметрах ловушек водорода в W.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (грант № 18-72-10162 в НИЦ Курчатовский институт).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ананьев С. С., Демидов Д. Н., Суслин С. В. Транспорт водорода и его накопление в вакансиях в процессе повреждающего нейтронного облучения в ОЦК-металлах Fe и W // ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез, 2020. Т. 43, вып. 2, С. 13–24 DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-13-24.

### **DETERMINATION OF ENERGY AND DIFFUSION PARAMETERS OF INTERACTION OF HYDROGEN WITH TRAPS IN BCC W: ANALYSIS OF THERMAL DESORPTION SPECTRA**

*D. Demidov, S. Ananiev, N. Bobyr*

NRC «Kurchatov Institute»

Using the previously developed model [1], which makes it possible to calculate the transport characteristics of hydrogen and hydrogen accumulation in vacancies in bcc (Fe, W), fcc (Cu), and hcp (Be) metals under damaging neutron irradiation, a method for analyzing thermal desorption data for tungsten samples, has been developed. With this method, it became possible to take into account the influence various allowing dopants and calculate of the energy and kinetic parameters of hydrogen isotopes in W.

Using this technique, the binding energies of deuterium atoms with traps of various types in W have been calculated, and the traps influence on the kinetic characteristics (diffusion coefficient, penetrating flux through the material) of deuterium in W has been numerically simulated.

The report will present the results of the analysis of the experimental data and their comparison with the theoretical estimates previously made within the framework of the model [1] for the kinetic characteristics of hydrogen in a ma-

terial with traps, as well as with the literature data on the energy parameters of hydrogen traps in W.

This work has been partially supported by the Russian Science Foundation (grant no. 18-72-10162 at the NRC Kurchatov Institute).

#### REFERENCE

1. Ananiev S. S., Demidov D. N., Suslin S. V. Hydrogen transport and inventories in vacancies in the damaging neutron irradiation process in bcc metals Fe and W // PAS&T/TF, 2020. Vol. 43, is. 2, p. 13–24 DOI: 10.21517/0202-3822-2020-43-2-13-24.

**Молочаев Ярослав Сергеевич**

Лаборант-исследователь

НИЦ «Курчатовский институт»

Россия, Москва, пл. Академика Курчатова, д. 1

Графит, токамаки, захват

**Molochaev Yaroslav**

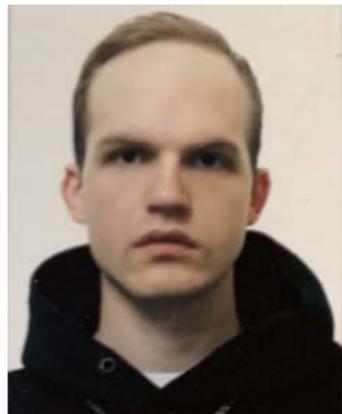
Research laboratory assistant

NRC Kurchatov Institute

Russia, Moscow, sq. Academician Kurchatov, 1

Graphite, tokamaks, capture

kill669966@gmail.com



## ГРАФИТ SIGRAFINE КАК ОБРАЩЕННЫЙ К ПЛАЗМЕ МАТЕРИАЛ Т-15МД

*Я. С. Молочаев<sup>1,2</sup>, А. В. Голубева<sup>1</sup>, С. А. Грашин<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Российская Федерация

<sup>2</sup>НИУ МЭИ, Москва, Российская Федерация

Программа исследований на токамаке Т-15МД нацелена на решение наиболее актуальных проблем термоядерных реакторов, таких как механизм формирования и поддержания транспортных барьеров, стационарная генерация неиндукционного тока, нагрев и удержание горячей плазмы, управление процессами на первой стенке и в диверторе, подавление глобальных неустойчивостей и др.

В данный момент графит марки SIGRAFINE R6510P100D01 используется в качестве материала лимитера в токамаке Т-15МД. В ближайшем будущем графитовые плитки будут установлены двумя поясами внутри камеры. В дальнейшем рассматривается возможность полностью облицевать графитом внутреннюю поверхность камеры Т-15МД.

Используя материал в качестве обращенного к плазме (ОПМ) в термоядерной установке, необходимо знать параметры захвата изотопов водорода в ОПМ и стойкость ОПМ под нагрузками. В отношении графита SIGRAFINE данные исследования планируется проводить по результатам

облучения в токамаке Т-15МД, для чего внутри камеры будет установлено несколько десятков держателей с образцами графита и кремниевыми подложками для сбора продуктов эрозии. Ближайший пуск установки Т15-МД запланирован на осень 2022 года. Предварительно информацию о захвате водорода в графите SIGRAFINE можно получить в лабораторных экспериментах при воздействии на материал газообразного водорода и плазменного облучения.

Целью данной работы является исследование характеристик графита SIGRAFINE и его взаимодействия с дейтерием. Были исследованы микроструктура, плотность и пористость данного материала. Методом ТДС исследован захват дейтерия в данный графит после выдержки образцов в газообразном дейтерии в течение 4 ч при температурах 473–873 К и давлении  $10^3$  Па. Спроектирован узел для облучения образцов в плазме тлеющего разряда.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

## **SIGRAFINE GRAPHITE AS PLASMA FACING MATERIAL T-15MD**

*Ya. S. Molochaev<sup>1,2</sup>, A. V. Golubeva<sup>1</sup>, S. A. Grashin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russian Federation

<sup>2</sup>NRU MPEI

The research program on the T-15MD tokamak is aimed at solving the most pressing problems of the fusion reactors, such as the mechanism of formation and maintenance of transport barriers, stationary generation of non-induction current, heating and retention of hot plasma, control of processes at the first wall and in the divertor, suppression of global instabilities, etc.

At the moment, graphite of the SIGRAFINE R6510P100D01 grade is used as a limiter material in the tokamak T-15MD. In the near future, graphite tiles will be installed in two belts inside the chamber. Further the possibility of completely coating the inner surface of the T-15MD chamber with graphite is being considered.

Using the material as a plasma-facing (PFM) in a fusion installation, it is necessary to know the parameters of hydrogen isotopes retention in the PFM and a stability of the PFM under loads. With regard to graphite SIGRAFINE, these studies are planned to be carried out based on the results of irradiation in the tokamak T-15MD. For this several dozen holders with graphite samples

and with silicon substrates for collecting erosion products will be installed inside the chamber. The next launch of the T15-MD installation is scheduled for Autumn 2022. Preliminary information about the capture of hydrogen in the graphite SIGRAFINE can be obtained in laboratory experiments when the material is exposed to hydrogen gas and plasma irradiation.

The purpose of this work is to study the characteristics of graphite SIGRAFINE and its interaction with deuterium. The microstructure, density and porosity of this material were investigated. The capture of deuterium into this graphite after exposure samples in gaseous deuterium for 4 hours at temperatures of 473–873 K and a pressure of  $10^3$  Pa was investigated by the TDS method. A module has been designed for irradiating samples with a glow discharge plasma.

This work was supported by the National Research Center «Kurchatov Institute».

**Дугин Дмитрий Сергеевич**

Лаборант-исследователь

НИЦ «Курчатовский институт» г. Москва,  
пл. Академика Курчатова, д. 1, 123182  
ИТЭР, термодесорбционная спектроскопия,  
конструкционные материалы

**Dugin Dmitriy**

Laboratory assistant-researcher

NRC «Kurchatov Institute»

Moscow, Akademika Kurchatova sq., 1, 123182

ITER, thermal desorption spectroscopy,

construction materials

dmitrydugin@gmail.com



## **ОСОБЕННОСТИ ПЕРЕСЧЕТА ПОКАЗАНИЙ МАСС-СПЕКТРОМЕТРОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ ПО ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В АБСОЛЮТНЫЕ ВЕЛИЧИНЫ ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ**

*Д. С. Дугин, Н. П. Бобырь, Д. И. Черкез, Д. А. Козлов*

НИЦ «Курчатовский институт»

Количественный анализ накопления изотопов водорода в материалах является важной исследовательской фундаментальной и прикладной задачей для ряда отраслей промышленности, науки и техники. Термодесорбционная спектроскопия (ТДС) является надежным и информативным методом исследования захвата изотопов водорода материалами, основанным на десорбции водорода из исследуемого материала в процессе линейного нагрева, в виде газового потока регистрируемого масс-анализатором. Чаще всего в ходе проведения экспериментов, образец находится в высоком вакууме при непрерывной откачке десорбирующегося из него газа. Для корректной интерпретации экспериментальных данных, полученных с помощью масс-спектрометра необходимо провести пересчет его относительных показаний в абсолютные значения измеряемых газовых потоков (калибровка по газовым потокам). В данной работе калибровку проводили с использованием известной течи малой проводимости [1], по индивидуальным газам путем одновременной регистрации масс-спектра в откачки-

ваемой камере регистрации и абсолютного давления газа в объеме перед течью, затем определяют коэффициенты абсолютной чувствительности. В данной работе исследовались некоторые особенности пересчета показаний масс-спектрометров в экспериментах по термодесорбции изотопов водорода в абсолютные величины газовых потоков. В качестве рассматриваемых газов использовались  $H_2$ , HD,  $D_2$ , как основных, регистрируемых в процессе термодесорбции. Для проведения калибровки по HD была приготовлена смесь со значительным содержанием HD, путем смешения в объеме равных долей газов  $H_2$  и  $D_2$  с их последующей выдержкой при  $450\text{ }^\circ\text{C}$  в течении 4 ч. Для проведения исследования использовался специализированный стенд ТДС с системой калибровки [2], подобной описанной в работе [1]. В ходе исследования на основании экспериментальных данных были получены зависимости калибровочных коэффициентов для всех исследуемых газов от величин давления перед течью, ионных токов масс-анализатора. Получены необходимые для корректного пересчета показаний масс-анализатора в газовые потоки калибровочные коэффициенты для  $H_2$ , HD,  $D_2$ , оценены границы их применимости и погрешности полученных коэффициентов. Проанализировано влияние калибровочных коэффициентов на интерпретацию спектров термодесорбции.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Пат. 2616927 Российская Федерация, МПК H01J 49/00 G01N 27/62. Стенд для калибровки устройства для масс-спектрометрического измерения газовых потоков / С. С. Ананьев, А. В. Спицын, Д. И. Черкез, А. А. Медников; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное учреждение «Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт». № 2015156993; заявл. 30.12.15; опубл. 18.04.17, Бюл. № 11.
2. Дугин Д. С. Исследование процесса накопления дейтерия в сплаве CuCrZr методом термодесорбционной спектроскопии / Н. П. Бобырь, Д. С. Дугин, А. А. Медников // Вестник МЭИ. 2021. № 6. С. 31–36.

## PECULIARITIES OF RECALCULATION OF READINGS OF MASS SPECTROMETERS IN EXPERIMENTS ON THERMAL DESORPTION OF HYDROGEN ISOTOPES INTO ABSOLUTE VALUES OF GAS FLOWS

*D. S. Dugin, N. P. Bobyr, D. I. Cherkez, D. A. Kozlov*

NRC «Kurchatov Institute»

Quantitative analysis of the accumulation of hydrogen isotopes in materials is an important research fundamental and applied problem for a number of branches of industry, science and technology. Thermal desorption spectroscopy (TDS) is a reliable and informative method for studying the capture of hydrogen isotopes by materials, based on the desorption of hydrogen from the material under study during linear heating, in the form of a gas flow recorded by a mass analyzer. Most often, during experiments, the sample is in a high vacuum with continuous pumping of the gas desorbed from it. For a correct interpretation of the experimental data obtained with a mass spectrometer, it is necessary to recalculate its relative readings into the absolute values of the measured gas flows (calibration by gas flows). In this work, calibration was carried out using a known leak of low conductivity [1], for individual gases by simultaneous recording of the mass spectrum in the evacuated recording chamber and the absolute pressure of the gas in the volume before the leak, then the absolute sensitivity coefficients are determined. In this work, some features of the conversion of mass spectrometer readings in experiments on the thermal desorption of hydrogen isotopes into the absolute values of gas flows were studied.  $H_2$ , HD,  $D_2$  were used as the considered gases, as the main gases recorded in the process of thermal desorption. To carry out HD calibration, a mixture with a significant HD content was prepared by mixing equal parts of  $H_2$  and  $D_2$  gases in volume, followed by holding them at 450 °C for 4 hours. To conduct the study, a specialized TDS stand with a calibration system [2] similar to that described in [1] was used. In the course of the study, on the basis of experimental data, the dependences of the calibration coefficients for all the studied gases on the values of pressure before the leak, ion currents of the mass analyzer were obtained. The calibration coefficients for  $H_2$ , HD,  $D_2$  necessary for the correct conversion of mass analyzer readings into gas flows were obtained, the limits of their applicability and the errors of the obtained coefficients were estimated. The effect of calibration coefficients on the interpretation of thermal desorption spectra is analyzed.

## REFERENCE

1. Anan'ev S. S., Spitsyn A. V., Cherkez D. I., Mednikov A. A., Stand dlya kalibrovki ustroystva dlya mass-spektricheskogo izmereniya gazovykh potokov [Stand for calibrating device of mass-spectrometric gas flow measurements]. Patent RF, № 2015156993, 2017.
2. Bobyr' N. P., Dugin D. S., Mednikov A. A. Studying the Deuterium Accumulation Process in CuCrZr Alloy Using the Thermal Desorption Spectroscopy Method. *Bulletin of MPEI*. 2021; 6: 31–36. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-6-31-36.

**Бобырь Николай Павлович**

Научный сотрудник

НИЦ «Курчатовский институт»

г. Москва, пл. Академика Курчатова, 1, 123098

Изотопы водорода

Материалы термоядерных реакторов

**Bobyry Nikolay**

Researcher

NRC «Kurchatov Institute»

1 Kurchatov Square, Moscow, 123098, Russia

Hydrogen isotopes

Fusion reactor materials

Bobyry\_NP@nrcki.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАХВАТА ДЕЙТЕРИЯ В СТАЛИ ЭК 181  
В ПРИСУТСТВИИ ДЕФЕКТОВ СТРУКТУРЫ***Н. П. Бобырь<sup>1,2</sup>, Д. С. Дугин<sup>1</sup>, Д. А. Козлов<sup>1</sup>, П. А. Федин<sup>1</sup>*<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия<sup>2</sup>АО «Высокотехнологический научно-исследовательский институт неорганических материалов им. акад. А. А. Бочвара», Москва, Россия

Низкоактивируемые ферритно-мартенситные стали являются современными кандидатными конструкционными материалами для создания будущих термоядерных реакторов с большими потоками нейтронов, такими как ДЕМО или Термоядерный источник нейтронов (ТИН) [1]. Большие нейтронные, тепловые и плазменные потоки будут приводить к повреждению структуры материала. Это может сильно повлиять на способность материалов накапливать изотопы водорода. В настоящей работе исследовалась российская сталь с быстрым спадом наведенной активности ЭК 181 (Русфер) разработанная в ОАО «ВНИИНМ» (Москва, Россия).

Экспериментальные образцы стали ЭК 181 были подвергнуты воздействию различных факторов: облучение ионами  $W^{6+}$  с энергией 20 МэВ до уровня 1 сна и облучение ионами  $Fe^{2+}$  с энергией 5,6 МэВ до уровней 0,05-0,15-0,5-1,5 сна (флюенс на образцы составил

$1\text{-}3\text{-}10\text{-}30 \cdot 10^{14}$  частиц/см<sup>2</sup>) для имитации повреждений создаваемых нейтронами.

Для изучения накопления изотопов водорода в поврежденных и неповрежденных образцах Русфера производилось насыщение всех образцов в газообразном дейтерии в интервале температур 300–800 К и давлений  $10^4\text{--}10^5$  Па на специализированном высоковакуумном стенде в НИЦ «Курчатовский институт».

Для определения количества поглощенного дейтерия и его распределения применялся метод ядерных реакций. В ходе исследования образец последовательно облучается высокоэнергетичными ионами He<sup>3</sup> в диапазоне 0,69–4,5 МэВ и происходит регистрация протонов образованных в ходе реакции  $D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$ . Метод позволяет узнать распределение дейтерия по глубине образца вплоть до 8 мкм.

Для определения накопления трития использовался метод β- и рентгеновской люминесценции. Метод основан на эффекте радиоактивности трития и способности испускать электроны.

Основная часть образцов анализировалась методом термодесорбционной спектроскопии (ТДС) на специализированном высоковакуумном стенде со скоростью нагрева 0,5 К/с до температуры 1250 К.

В работе показано, что количество дейтерия в образцах поврежденных ионами W<sup>6+</sup> возросло примерно в 2 раза по сравнению с неповрежденными образцами в поврежденной области. Накопление трития в поврежденной области так же увеличилось.

Будут так же представлены ТДС спектры стали ЭК 181 после экспозиции в газе.

Коллектив авторов выражает особую благодарность Матею Майеру (Институт физики плазмы им. Макса Планка, Гархинг, Германия), Юджи Хатано (Исследовательский центр изотопов водорода, Университет Тоямы, Тояма, Япония), Вячеславу М. Чернову (ОАО «ВНИИНМ», Москва, Россия).

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Компаниец Т. Н. К проблеме выбора сталей для реактора ДЕМО // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Термоядерный синтез. 2009. № 3. С. 16–24

## INVESTIGATION OF THE DEUTERIUM RETENTION IN EK 181 IN PRESENCE OF STRUCTURAL DEFECTS

*N. Bobyr<sup>1,2</sup>, D. Dugin<sup>1</sup>, D. Kozlov<sup>1</sup>, P. Fedin<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>National Research Centre «Kurchatov Institute», Moscow (Russia)

<sup>2</sup>Stock Company «A. A. Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials», Moscow (Russia)

Reduced-activation ferritic-martensitic steels (RAFMS) are possible advanced structural materials for the construction of future fusion reactors with high fluxes of neutrons, such as DEMO or a Fusion Neutron Source (FNS). Neutrons are responsible for displacement damage, while high heat fluxes may create high thermal stresses (and as consequence cracks, fracture), or molten/resolidified areas in the materials. High neutron and/or high heat or plasma fluxes may therefore strongly influence the hydrogen retention properties of the materials. In the present work Russian type of RAFMS EK-181 (Rusfer) was investigated.

Irradiation with 20 MeV W<sup>6+</sup> ions was used as proxy for displacement damage created by neutrons. Rusfer samples were irradiated to a damage level of 1 dpa at the damage peak. 5,6 MeV Fe<sup>2+</sup> ions was used for irradiation Rusfer samples to a damage level of 0,05-0,15-0,5-1,5 dpa at the damage peak.

To study the accumulation of hydrogen isotopes in damaged and undamaged Rusfer samples, all samples were saturated in gaseous deuterium in the temperature range of 300–800 K and pressures of 10<sup>4</sup>–10<sup>5</sup> Pa on a specialized high-vacuum stand.

Trapping of deuterium in the damage zone was examined by the D(<sup>3</sup>He, p)<sup>4</sup>He nuclear reaction with 3He energies between 0.69 and 4.5 MeV allowing determination of the D concentration up to a depth of 8 μm.

Trapping of tritium was examined using an imaging plate (IP) and β-ray induced X-ray spectrometry (BIXS). The method is based on the effect of tritium radioactivity and the ability to emit electrons.

The main part of the samples was analyzed by thermal desorption spectroscopy (TDS) on a specialized high-vacuum stand with a heating rate of 0.5 K/s to a temperature of 1250 K.

The amount of deuterium retained in undamaged Rusfer steel increases with increasing temperature. Generation of ion-induced displacement damage and subsequent exposure to D<sub>2</sub> gas significantly increases the D concentration in the damage zone.

For Rusfer samples will be presented TDS results after gas exposure.

The team of authors is particularly grateful to M. Mayer (Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching, Germany), Y. Hatano (Hydrogen Isotope Research Center, University of Toyama, Toyama, Japan), V. M. Chernov (A. A. Bochvar High-technology Research Institute of Inorganic Materials (VNINM), Moscow, Russia).

This work was supported by the National Research Centre «Kurchatov Institute».

**Хвостов Ростислав Павлович**

Лаборант-исследователь

НИЦ «Курчатовский институт»

123182, пл. Ак. Курчатова, 1

Термоядерный синтез, изотопы водорода

**Khvostov Rostislav**

Research assistant

NRC Kurchatov institute

Ac. Kurchatov sq., 1, Moscow RU-123182

Fusion, hydrogen isotopes

ultra27082014@gmail.com

**МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТИ  
МЕМБРАН ПРИ ВЗАИМОДЕЙСТВИИ С ГАЗОМ***Р. П. Хвостов<sup>1,2</sup>, Д. М. Шкурыгин<sup>1</sup>, А. В. Голубева<sup>1</sup>*<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт»<sup>2</sup>НИУ «МЭИ»

Термоядерные и гибридные реакторы в обозримой перспективе будут работать на смеси тяжелых изотопов водорода D и T. Поскольку тритий радиоактивен, весьма важно знать, как он будет проникать через материалы за пределы камеры реактора. Для предсказания потоков изотопов водорода сквозь слой материала необходимо знать коэффициенты диффузии, проницаемости, растворимости водорода в материале в зависимости от условий, а также влияние состояния поверхности на перенос водорода через материал. Эту информацию можно получить в экспериментах, в которых одна из поверхностей мембраны контактирует с водородом (в виде газа, ионного пучка или потока ионов из плазмы), и измеряется поток водорода, десорбировавшийся с обратной поверхности мембраны. Исследования переноса водорода сквозь материалы весьма актуальны не только для термоядерной и гибридной, но и для ядерной и водородной энергетики, поскольку для этих отраслей непрерывно разрабатываются новые материалы с улучшенными характеристиками.

Стенд ГДП создан для исследования водородопроницаемости материалов при контакте с газообразным водородом, поскольку в газовом эксперименте проще обеспечить длительную стабильность условий при взаимодействии водорода с материалами.

Исследуемая мембрана разделяет два сверхвысоковакуумных объема – камеру экспозиции и камеру регистрации. В камеру экспозиции напускается рабочий газ до фиксированного давления в диапазоне от 100 до  $10^5$  Па. Температура мембраны в ходе эксперимента может поддерживаться в интервале от комнатной до 873 К. Поток водорода или дейтерия, проходящий сквозь мембрану, измеряется в камере регистрации при помощи квадрупольного масс-спектрометра, откалиброванного по потоку газа через диафрагму известной проводимости.

Доклад посвящен экспериментальной методике исследования проницаемости. Представлены экспериментальные данные по потокам, коэффициентам диффузии и проницаемости для ряда конструкционных материалов в диапазоне давлений дейтерия 100– $10^5$  Па и температур 575–773 К.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

## **METHODOLOGY OF STUDYING THE HYDROGEN PERMEABILITY OF MEMBRANES AT INTERACTION WITH GAS**

*R. P. Khvostov<sup>1,2</sup>, D. M. Shkurygin<sup>1</sup>, A. V. Golubeva<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute»

<sup>2</sup>NRU «MEI»

The fusion and hybrid reactors in the foreseeable future will operate on a using a mixture of heavy hydrogen isotopes D and T. Since tritium is radioactive, it is very important to know how it will penetrate through materials outside the reactor chamber. To predict the fluxes of hydrogen isotopes through a material layer, it is necessary to know the coefficients of diffusion, permeability, solubility of hydrogen in the material, depending on the conditions, as well as the effect of the surface state on the transport of hydrogen through the material. This information can be obtained in experiments when one of the membrane surfaces is in contact with hydrogen (gas, an ion beam, or ions from plasma), and the hydrogen flux desorbed from the back membrane surface is measured. Studies of hydrogen transport through materials are very relevant not only for fusion and hybrid reactors, but also for nuclear and hydrogen energy,

since new materials with improved characteristics are continuously being developed for these industries.

The GDP stand was created to study the hydrogen permeability of materials in contact with hydrogen gas, since in the gas experiment it is easier to ensure long-term stability of conditions of hydrogen interaction with material.

A membrane under study separates two ultra – high vacuum volumes - the exposure chamber and the registration chamber. The working gas is injected into the exposure chamber to a fixed pressure in the range of 100–10<sup>5</sup> Pa. The temperature of the membrane during the experiment can be maintained in the range from room temperature up to 873 K. The flux of hydrogen or deuterium permeating through the membrane is measured in the registration chamber using a quadrupole mass spectrometer calibrated by the gas flux through a diaphragm of known conductivity.

The report is devoted to the experimental methodology of permeability research. Experimental data on fluxes, diffusion coefficients and permeability coefficients for a number of structural materials in the range of deuterium pressures 100–105 Pa and temperatures 575–773 K are presented.

The work was carried out with the support of the NRC «Kurchatov Institute».

**Степанов Никита Олегович**

Лаборант-исследователь

НИЦ «Курчатовский институт»

Пл. Академика Курчатова, 1, Москва, 123098

Кинетика взаимодействия изотопов водорода  
с материалами ТЯР

**Nikita Stepanov**

Research laboratory assistant

NRC «Kurchatov institute»

1, Akademika Kurchatova pl., Moscow,

123182, Russia

Kinetics of interaction of hydrogen isotopes

with TNR materials

6121591@gmail.com



## **ВЛИЯНИЕ ГРАДИЕНТА ТЕМПЕРАТУРЫ НА ТРАНСПОРТНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В СТАЛИ ЧС-68**

*Н. О. Степанов, Д. И. Черкез*

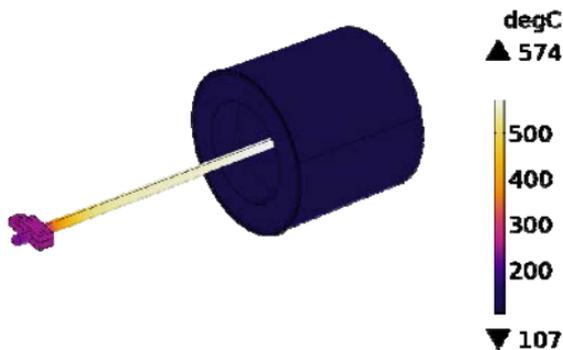
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва

Управляемый термоядерный синтез (УТС) – один из кандидатов в источники энергии будущего, в качестве топлива в котором планируют использовать смесь тяжелых изотопов водорода (ИВ): дейтерий и тритий. Радиоактивность второго накладывает ряд ограничений на выбор конструкционных (КМ) и обращенных к плазме материалов (ОПМ). Во время работы термоядерного реактора (ТЯР) протекает множество процессов связанных с взаимодействием ИВ с КМ, такие как: внедрение, отражение и захват, а также утечки изотопов водорода в теплоноситель. В настоящий момент продолжается поиск новых перспективных конструкционных материалов, рассматривают: аустенитные и ферритно-мартенситные стали, ванадиевые сплавы и материалы на основе карбида кремния, при этом взаимодействие ИВ с ними изучено недостаточно, из-за чего необходимо проведение исследований в этом направлении.

Одним из ключевых измеряемых параметров в экспериментах по взаимодействию ИВ с материалами, оказывающих существенное влияние на кинетику процессов, является температура, ввиду зачастую аррениусовской природы процессов. Ранее в НИЦ «Курчатовский институт» на стенде «ПИМ» [1, 2] в экспериментах по проникновению дейтерия через аустенитную сталь 06X16H15M2Г2ТФР (ЧС-68) определялись основные транспортные параметры дейтерия – константа проницаемости и коэффициент диффузии. Экспериментальный образец представлял собой трубку, сваренную в вакуумный фланец с одного конца и заплуженную и заваренную с другого. Прогрев трубки осуществлялся прямым пропусканием тока, при этом к свободному концу трубки подсоединялась медная клемма, а стороны фланца располагался отражающий экран, выполняющий также роль плазменного (см. рисунок). В результате нагрева образца в ходе экспериментов (выдержке образца в вакууме или экспозиции его в дейтерии) наблюдался существенный перепад температуры по длине трубки, обусловленного наличием, как отражающего экрана, так и значительного стока тепла через медный электрический контакт. Кроме того, существенное влияние на распределение температуры оказывали и эффекты, связанные с конвекционными потерями с поверхности трубки. Позднее в экспериментах массивная медная клемма была заменена на нержавеющую, меньшего размера и сопоставимого с исследуемой трубкой сечения, что позволило снизить теплоток со свободного конца и в результате уменьшить перепад температуры.

В представленной работе описано проведение численного решения задачи нахождения профиля температуры по длине экспериментального образца, выполненного из реакторной стали ЧС-68, и определения степени его влияния на транспортные параметры дейтерия, а также уточнения оценок коэффициентов диффузии, проницаемости и растворимости, сделанных ранее. Температурный градиент был определен численно в среде COMSOL Multiphysics, осуществлялось моделирование нагрева прямым пропусканием тока, теплопроводности в твердом теле, теплообмена излучением и конвективного теплообмена. Для решения модельной задачи была построена трехмерная модель образца и части держателя замененные тетраэдрической расчетной сеткой. Теплофизические и электрические свойства материалов задавались функциями температуры, на основании литературных данных [3]. Таким образом, при моделировании единственным подбираемым параметром был коэффициент излучения. Его подбор был необходим ввиду динамически изменяющегося состояния поверхности – в ходе длительного нагрева экспериментального образца в вакууме

на его поверхности образовывались различные структуры (вероятно, окислы), непосредственно влияющие на значение коэффициента серости. При обработке результатов численного моделирования была установлена корреляция между изменением значения коэффициента излучения и времени выдержки образца в газе или вакууме. Также отмечено, что периодически производимая чистка лицевой поверхности в разряде аргона, приводит к снижению коэффициента излучения. На рисунке представлена трехмерная модель экспериментального образца и трехмерный график распределения температуры.



Трехмерный график распределения температуры

Анализ представленных в работе профилей температуры свидетельствует о необходимости его учета при обработке экспериментов по определению транспортных параметров водорода в металлах при подобной постановке эксперимента. Целесообразным является использование материалов с низкими значениями теплопроводности для обеспечения электрического контакта, а также стремиться уменьшить его геометрические размеры.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Голубева А. В., Черкез Д. И., Спицын А. В., Янченков С. В. Установка для исследования проницаемости материалов при плазменном облучении. Журнал «Приборы и техника эксперимента. Сер.: Общая экспериментальная техника» 2017, вып. 6, с. 67–77.

2. Черкез Д. И. Исследование проникновения изотопов водорода через низкоактивируемые материалы. Диссертация на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, Москва 2018.

3. Гаджиев Г. Г., Омаров З. М., Абдуллаев Х. Х., Билалов А. Р., Магомедов М-Р. М., Магомедов Я. Б. Тепловые и электрические свойства сталей ЧС-68. 2018.

## **INFLUENCE OF TEMPERATURE GRADIENT ON TRANSPORTATION PARAMETERS OF HYDROGEN ISOTOPES IN THE ChS-68 STEEL**

*N. O. Stepanov, D. I. Cherkez*

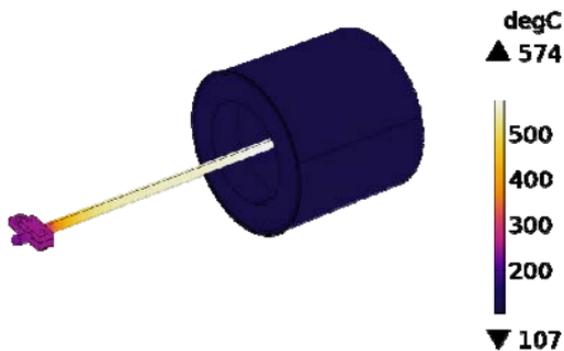
National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

Controlled thermonuclear fusion (CTF) is one of the candidates for the energy sources of the future; it is planned to use a mixture of heavy hydrogen isotopes (HI): deuterium and tritium as fuel. The radioactivity of the latter imposes a number of restrictions on the choice of structural (SM) and plasma-facing materials (PM). During the operation of a thermonuclear reactor (TNR), many processes occur associated with the interaction of the HI with the SM, such as: introduction, reflection and capture, as well as leakage of hydrogen isotopes into the coolant. At the moment, the search for new promising structural materials continues, they consider: austenitic and ferritic-martensitic steels, vanadium alloys and materials based on silicon carbide, while the interaction of HI with them has not been studied enough, which is why it is necessary to conduct research in this direction.

One of the key measured parameters in experiments on the interaction of HI with materials that have a significant effect on the kinetics of processes is temperature, due to the Arrhenius nature of the processes. Previously, at the NRC «Kurchatov Institute» at the «PIM» stand [1, 2], in experiments on the penetration of deuterium through austenitic steel 06Kh16N15M2G2TFR (ChS-68), the main transport parameters of deuterium were determined – the permeability constant and the diffusion coefficient. The experimental sample was a vacuum-sealed tube. The tube was heated by direct current flow, with a copper terminal attached to the free end of the tube, and a reflective screen was placed on the sides of the flange, which also served as a plasma screen (figure). As a result of heating the sample, a significant temperature drop was observed

along the length of the tube, due to the presence of a reflective screen and a significant heat sink through the copper electrical contact. Later, the terminal was replaced with a smaller stainless steel one, which reduced the temperature gradient.

The present work describes the numerical solution of the problem of finding the temperature profile along the length of an experimental sample made of reactor steel ChS-68 and determining the degree of its influence on the transport parameters of deuterium, as well as refining the estimates of diffusion coefficients, permeability and solubility made earlier. The temperature gradient was determined numerically in COMSOL Multiphysics, modeling direct current heating, thermal conduction in a solid, radiative heat transfer, and convective heat transfer. To solve the problem numerically, a three-dimensional model of the sample and parts of the holder were built, later replaced by a tetrahedral computational grid. The thermophysical and electrical properties [3] of materials were given by temperature functions taken from the literature, and the only selected parameter was the emissivity. Its selection was necessary due to the dynamically changing state of the surface; during prolonged heating of the experimental sample, various structures formed on its surface, directly affecting the value of the grayness coefficient. When processing the results of numerical simulation, a correlation was established between the change in the value of the emissivity and the heating time. On figure shows a three-dimensional model of the experimental sample and a three-dimensional graph of the temperature distribution.



Three-dimensional graph of temperature

An analysis of the temperature profiles presented in this work indicates the need to take it into account when processing experiments to determine

the transport parameters of hydrogen in metals with a similar setup of the experiment. It is advisable to use materials with low thermal conductivity to ensure electrical contact, and also to strive to reduce its geometric dimensions.

This work was supported by the National Research Center «Kurchatov Institute» (order from September 29, 2020 No. 1953).

#### REFERENCE

1. Golubeva A. V., Cherkez D. I., Spitsyn A. V., Yanchenkov S. V. Installation for studying the permeability of materials under plasma irradiation. Journal «Instruments and Experimental Technique. Series: General Experimental Technique» 2017, no. 6, p. 67–77.

2. Cherkez D. I. Investigation of the penetration of hydrogen isotopes through low-activated materials, dissertation for the degree of candidate of physical and mathematical sciences, Moscow, 2018.

[3] Gadzhiev G. G., Omarov Z. M., Abdullaev Kh. Kh., Bilalov A. R., Magomedov M. R. M., Magomedov Ya. B. Thermal and electrical properties of ChS-68 steels. 2018 Nov.

**Селезнева Анастасия Дмитриевна**

Инженер-исследователь

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, Россия, г. Саров, пр. Мира, д.37

Изучение свойств пиротехнических составов  
и их компонентов

**Selezneva Anastasia Dmitrievna**

Research engineer

RFNC-VNIIEF

Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia, 607188

Research of properties of pyrotechnic

compositions and their components

arkad@triton.vniief.ru

## **ИЗУЧЕНИЕ СВОЙСТВ АЛЮМОСИЛИКАТНЫХ МИКРОСФЕР И ОЦЕНКА КОЭФФИЦИЕНТА ПРОНИЦАЕМОСТИ СТенок ПО ГЕЛИЮ И ВОДОРОДУ**

*А. Ю. Постников, М. В. Царев, Е. В. Забавин, А. В. Сисяев, В. А. Симанов,  
П. Е. Половинкин, В. В. Мокрушин, О. Ю. Забродина, И. А. Царева,  
А. Д. Селезнева, Н. А. Склярова*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл., проспект Мира, 37  
tsarev@dep19.vniief.ru

В настоящей работе проведено микроскопическое исследование алюмосиликатных микросфер, ранее исследованных, например, в работе [1], с использованием современного аналитического оборудования. Определен фракционный состав данного материала, изучена морфология индивидуальных частиц, измерена толщина их стенок, проведена оценка элементного состава микросфер методом рентгеновского спектрального микроанализа.

Для проверки литературных данных о высокой избирательной проницаемости гелия через алюмосиликатное стекло [2, 3] в данной работе проведены сравнительные эксперименты по оценке коэффициентов проницаемости исследуемого материала по гелию и водороду. Результаты опытов подтверждают более высокую диффузию гелия через стенки микросфер по сравнению с водородом, а кинетические параметры процесса могут быть описаны математической моделью, использованной в работах [2, 3]. Полученные в работе данные могут представлять интерес при использовании алюмосиликатных микросфер для селективного выделения гелия из газовых смесей.

Авторы выражают благодарность сотрудникам технологического подразделения РФЯЦ-ВНИИЭФ за предоставление образцов для проведения исследований.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Веселов А. В., Изгородин В. М., Комлева Г. В и др. Исследование проницаемости стекла полых микросфер для изотопов водорода // Сборник докладов Второго международного семинара «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами «IHISM-04»», 12–17 апреля 2004. Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2005, с. 158–164.

2. Верещагин А. С., Фомин В. М. Оценка скорости заполнения колонки с микросферами гелием // Вестн. Новосиб. Гос. Ун-та. Серия: Физика. 2007. Т. 2, вып. 4. с. 45–48.

3. Верещагин А. С., Зиновьев В. Н., Пак А. Ю. и др. Оценка коэффициента проницаемости стенок микросфер // Вестник НГУ. Серия: Физика, 2010. Т. 5, с. 8–16.

**INVESTIGATION OF PROPERTIES OF ALUMINUM SILICATE  
MICROSPHERES AND EVALUATION OF THE PERMEABILITY  
COEFFICIENT OF THE WALLS FOR HELIUM AND HYDROGEN**

*A. Yu. Postnikov, M. V. Tsarev, E. V. Zabavin, A. V. Sisyayev, V. A. Simanov,  
P. E. Polovinkin, V. V. Mokrushin, O. Yu. Zabrodina, I. A. Tsareva,  
A. D. Selezneva, N. A. Sklyarova*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»),  
Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia  
tsarev@dep19.vniief.ru

Microscopic investigation of aluminum silicate microspheres which were previously investigated, for example, in the work [1], using modern analytical equipment, has been performed in this work. The fractional composition of this material has been determined, morphology of individual particles has been studied, thickness of their walls has been measured, and elemental composition of microspheres has been assessed by X-ray spectral microanalysis.

To verify the literature data on the high selective permeability of helium through aluminum silicate glass [2, 3], comparative experiments to assess the permeability coefficients of the test material for helium and hydrogen have been carried out in this work. The experimental results confirm a higher diffusion of helium through the walls of microspheres compared to hydrogen, and the kinetic parameters of the process can be described by the mathematical model used in the works [2, 3]. The data obtained in the work may be of interest when using aluminum silicate microspheres for selective extraction of helium from gas mixtures.

The authors thank the employees of the technology department of FSUE-RFNC for providing of samples for investigation.

REFERENCES

1. Veselov A. V., Izgorodin V. M., Komleva G. V et al. Investigation of permeability of hollow microspheres glass for hydrogen isotopes // Abstracts of the Second international seminar «Interaction of hydrogen isotopes with structural materials «IHISM-04»», 12–17 April 2004, Sarov: RFNC-VNIIEF, 2005, p. 158–164.

2. Vereschagin A. S., Fomin V. M. Assessment of the velocity of filling the column with microspheres with helium // Herald of State Novosibirsk University. Series: Physics. 2007. Vol. 2, issue. 4, p. 45–48.

3. Vereschagin A. S., Zinoviev V. N., Pak A. Yu. et al. Assessment of the permeability coefficient of microspheres walls // Herald of State Novosibirsk University. Series: Physics. 2010. Vol 5, p. 8–16.

**Секция 2**

**B5–B7, C17**

**МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
И СТРУКТУРНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ  
КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ  
В СРЕДЕ ВОДОРОДА**

**Session 2**

**MECHANICAL PROPERTIES  
AND STRUCTURAL TRANSFORMATIONS  
OF STRUCTURAL MATERIALS  
IN A HYDROGEN ENVIRONMENT**

**Беграмбеков Леон Богданович**

Профессор

НИЯУ МИФИ

115409, Россия, Москва, Каширское шоссе, д. 31

**Leon Begrambekov**

Professor

NRNU MEPHI

115409, Moscow, Kashirskoe shosse 31

lbbegrambekov@mephi.ru

## **РАЗВИТИЕ СТРУКТУР КОНУСОВ И ВИСКЕРОВ НА ПОВЕРХНОСТЯХ ТВЕРДЫХ ТЕЛ ПРИ ИОННОМ ОБЛУЧЕНИИ**

*Л. Б. Беграмбеков, А. М. Захаров, Н. А. Пунтаков*

Национальный исследовательский ядерный университет (МИФИ)

Развитие рельефа поверхности часто происходит при ионном облучении и при осаждении покрытий. В некоторых случаях именно развитие рельефа является целью эксперимента или технологического процесса. Однако, чаще всего такое последствие воздействия на поверхность нежелательно, и для избавления от него затрачивается большое количество времени и разнообразных методов: варьируется температура облучаемой поверхности параметры облучающего потока, скорость и состав осаждаемых на поверхность компонентов формируемого покрытия и т. п.

Одним из часто проявляющихся вариантов развития рельефа при ионной бомбардировке является формирование конических выступов и кристаллов (вискеров). В появлении и развитие этих поверхностных образований процессы, приводящие к развитию рельефа, проявляются с наибольшей полнотой. Знакомство с условиями появления, закономерностями и механизмами их развития окажется полезным для часто предпринимаемых попыток использования этого интересного явления, а также для определения способов подавления или развития рельефа на облучаемой ионами и плазмой поверхности.

В Работе рассматриваются причины, условия облучения и состояния поверхности, способствующие зарождению конусов и вискерсов на металлах, углеграфитовых материалах, диэлектриках. Рассматриваются процессы в приповерхностных слоях поверхности, способствующие их развитию. Описываются специфические условия их появления при облучении поверхности интенсивными потоками ионов в условиях термоядерных установок

## **DEVELOPMENT OF STRUCTURES OF CONES AND WHISKERS ON THE SURFACES OF SOLIDS UNDER ION IRRADIATION**

*L. B. Begrambekov, A. M. Zakharov, N. A. Puntakov*

National Research Nuclear University (MEPhI)

The development of the surface relief often occurs during ion irradiation and during the deposition of coatings. In some cases, it is the development of the relief, that is the goal of the experiment or the technological process.

However, most often, such a consequence of exposure to the surface is undesirable, and a large amount of time and various methods are spent to get rid of it: the temperature of the irradiated surface, the parameters of the irradiating flow, the speed and composition of the components of the formed coating deposited on the surface, etc. vary. One of the frequently manifested variants of relief development during ion bombardment is the formation of conical protrusions and crystals (whiskers). In the appearance and development of these surface formations, the processes leading to the development of the relief are most fully manifested. Familiarity with the conditions for the appearance, regularities and mechanisms of their development will be useful for frequently undertaken attempts to use this interesting phenomenon, as well as for determining methods for suppressing or developing a relief on a surface irradiated by ions and plasma.

The paper considers the causes, conditions of irradiation and surface conditions that contribute to the emergence of cones and whiskers on metals, carbon-graphite materials, and dielectrics. The processes in the near-surface layers of the surface that contribute to their development are considered. The specific conditions for their appearance during surface irradiation with intense ion fluxes, under the conditions of thermonuclear installations are described.

**Чуканов Александр Николаевич**

Ведущий научный сотрудник  
ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л. Н. Толстого»  
Россия, г. Тула, пр-т Ленина 125, 300026  
Деградация и деструкция сталей и сплавов  
при внешнем воздействии  
различной физической природы  
e-mail: alexchukanov@yandex.ru

**Chukanov Alexander Nikolaevich**

Leading Researcher  
L. N. Tolstoy TSPU  
125 Lenin Ave., 300026, Tula, Russia  
Degradation and destruction of steels and alloys  
under external influence of various physical nature  
e-mail: alexchukanov@yandex.ru

## **ТЕРМОДИНАМИКА ДЕСТРУКЦИИ И ЛОКАЛЬНОГО ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЯ СТАЛЕЙ В ХОДЕ ВОДОРОДНОЙ СТРЕСС-КОРРОЗИИ**

*А. Н. Чуканов, Н. Н. Сергеев, А. Н. Сергеев, В. А. Терёшин,  
А. Е. Гвоздев, А. А. Яковенко*

ФГБОУ ВО «Тульский государственный педагогический университет  
им. Л. Н. Толстого»

### *Введение*

В рамках развивающегося многоуровневого иерархического подхода к изучению эволюции дефектной структуры (повреждения) сталей изучена связь эволюции разномасштабных дефектов поврежденности с локальным обезуглероживанием высокопрочных низколегированных сталей при низкотемпературной электролитической водородной стресс-коррозии. Термодинамически обосновано образование метана в несплошностях сталей в процессе их обезуглероживания. Разработана кинетическая схема процесса совместного накопления водорода и метана. Цель данного исследования – уточнение механизмов локализованного низкотемператур-

ного обезуглероживания упрочненных конструкционных сталей, а также термодинамическая оценка и разработка кинетической схемы реакций образования метана в несплошностях этих сталей в ходе водородной стресс-коррозии.

### *Методика исследований*

Исследовали низколегированные конструкционные стали с ферритно-перлитой и бейнитной структурой. Анализировали деградацию механических свойств и изменение микро- и субструктуры сталей в ходе деформирования и электролитического наводороживания (катодная поляризация в кислых электролитах при плотностях тока 2,6–60 А/м<sup>2</sup>). С помощью механической спектроскопии уточняли механизм локального обезуглероживания на субструктурном уровне. Термодинамическая оценка включала анализ изменения парциальной свободной энергии системы «пора с газом + матрица» в условиях меняющегося давления газов. Ее изменение учитывали в кинетической схеме для детализации состава продуктов и длительности процесса обезуглероживания. Использовали данные металлографического анализа. Количественные характеристики (количество и размеры ее элементов и дефектов: микротрещин, пор, обезуглероженных зон). На их основе контролировали диффузионный путь атомов углерода к водородным коллекторам, размеры обезуглероженных зон, эволюцию ансамбля микротрещин, объемную долю феррита и перлита. Оценку энергии Гиббса  $\Delta G$  и парциальной свободной энергии  $\Delta F$  выполняли с помощью методики Владимирова Л. П. Значения энтальпии и энтропии (H, S) реакций в стандартных условиях заменяли безразмерными параметрами M и N.  $M = -0,21858 H^0_{298}$ ;  $N = 0,21858 S^0_{298}$ . Где «298» – температура в К.  $0,21858 = (1/R \cdot 2,3)$ , ( $R = 1.989$  кал/моль·град).

### *Выводы*

1. Показали, что в низколегированных конструкционных сталях в ходе электролитической водородной стресс-коррозии реализуется локализованное обезуглероживание с образованием и накоплением метана в микропустотах. Движущей силой является разность между равновесным и текущим значениями парциальной свободной энергии в реакциях образования метана.

2. Получили уравнения кинетики реакций, сопровождающих обезуглероживание. Выполнили оценку длительности процесса и размера обезуглероженной зоны.

3. Установили параметр, характеризующий интенсивность наводороживания ( $\omega_K$ ). Определили его пороговое значение, связанное с предельно возможным потоком атомов углерода.

4. Установили, что при малых интенсивностях наводороживания ( $\omega_K \ll$  порогового значения), преобладающим в обезуглероживании является процесс накопления метана.

## **THERMODYNAMICS OF DESTRUCTION AND LOCAL DECARBURIZATION STEELS DURING HYDROGEN STRESS CORROSION**

A. N. Chukanov, N. N. Sergeev, A. N. Sergeev, V. A. Tereshin,  
A. E. Gvozdev, A. A. Yakovenko

Tula State Pedagogical University named after L.N. Tolstoy

### *Introduction*

Within the framework of the developing multilevel hierarchical approach to the study of the evolution of the defective structure (damage) of steels, the relationship of the evolution of multi-scale damage defects with local decarburization of high-strength low-alloy steels under low-temperature electrolytic hydrogen stress corrosion has been studied. The formation of methane in the discontinuities of steels during their decarburization is thermodynamically justified. A kinetic scheme of the process of joint accumulation of hydrogen and methane has been developed. The purpose of this study is to clarify the mechanisms of localized low-temperature decarburization of hardened structural steels, as well as thermodynamic evaluation and development of a kinetic scheme of methane formation reactions in the discontinuities of these steels during hydrogen stress corrosion.

### *Research methodology*

Low-alloy structural steels with ferrite-perlite and bainite structure were studied. The degradation of mechanical properties and changes in the micro- and substructure of steels during deformation and electrolytic hydrogenation (cathodic polarization in acidic electrolytes at current densities of 2.6–60 A/m<sup>2</sup>) were analyzed. Mechanical spectroscopy was used to refine the mechanism of local decarburization at the substructural level. The thermodynamic assessment included an analysis of changes in the partial free energy of the «pore with gas-

es + matrix» system under conditions of changing gas pressure. Its change was taken into account in the kinetic scheme to detail the composition of the products and the duration of the decarburization process. Metallographic analysis data were used. Quantitative characteristics (the number and size of its elements and defects: microcracks, pores, decarbonized zones). They were used to control the diffusion path of carbon atoms to hydrogen reservoirs, the size of decarbonized zones, the evolution of the ensemble of microcracks, the volume fraction of ferrite and perlite. The Gibbs energy  $\Delta G$  and partial free energy  $\Delta F$  were evaluated using the Vladimirova L. P. technique. The values of enthalpy and entropy (H, S) of reactions under standard conditions were replaced by dimensionless parameters M and N.  $M = -0.21858 H_{298}^0$ ;  $N = 0.21858 S_{298}^0$ . Where «298» is the temperature in K.  $0.21858 = (1/R \cdot 2,3)$ , ( $R = 1.989 \text{ cal/mol deg}$ ).

### Conclusions

1. It was shown that localized decarburization with the formation and accumulation of methane in micro-voids is realized in low-alloy structural steels during electrolytic hydrogen stress corrosion. The driving force is the difference between the equilibrium and current values of the partial free energy in methane formation reactions.

2. The equations of kinetics of reactions accompanying decarburization were obtained. We evaluated the duration of the process and the size of the decarbonized zone.

3. Set the parameter characterizing the intensity of flooding ( $\omega K$ ). We determined its threshold value associated with the maximum possible flow of carbon atoms.

4. It was found that at low rates of hydrogenation ( $\omega < K_0$  the threshold value), the process of methane accumulation is predominant in decarburization.

**Селезнев Александр Аркадьевич**

Начальник лаборатории  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, Россия, г. Саров, пр. Мира, д. 37  
Водород, высокое давление,  
молекулярная динамика, уравнение состояния

**Selezenev Aleksander**

Division head  
RFNC-VNIIEF  
607188, Russia, Sarov, Nizhny Novgorod region  
Hydrogen, high pressure, molecular dynamic,  
equation of state  
sel@dep19.vniief.ru

**ОСНОВЫ МОЛЕКУЛЯРНО-ДИНАМИЧЕСКОГО  
МОДЕЛИРОВАНИЯ СВОЙСТВ КОНДЕНСИРОВАННЫХ  
МАТЕРИАЛОВ**

*А. А. Селезнев*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

В докладе рассмотрено теоретическое обоснование применимости метода молекулярной динамики (МД) для расчета свойств конденсированных материалов. Представлены потенциалы межатомного взаимодействия, которые широко используются для описания свойств конденсированных материалов. Рассмотрены методы определения параметров межатомных потенциалов и методы МД расчета свойств конденсированных материалов.

В докладе также дано краткое описание молекулярно-динамического кода SAGE\_MD [1]. Отличительной особенностью представляемого кода является его направленность на моделирование свойств конденсированных материалов с различными типами химических связей (металлическая,

ковалентная, ионная). Код написан на языке FORTRAN 90, часть кода написана на языке MS VC++. Разработанный код дополнен дружественным интерфейсом пользователя. Интерфейс пользователя позволяет задавать все исходные данные для кода с помощью диалогов и меню. Результат всех операций с кристаллической решеткой, при формировании начальной геометрии МД ячейки, отображается на дисплее, позволяя пользователю кода контролировать правильность своих действий.

Используя код SAGE MD можно проводить моделирование свойств материалов при постоянной температуре и/или при постоянном давлении, а также моделировать поведение кристаллической решетки материала при воздействии внешних напряжений растяжения или сжатия. В коде реализованы расчеты функции радиального распределения атомов (Radial distribution function, RDF) и расчет коэффициентов диффузии атомов внедрения. При моделировании можно использовать различных типы граничных условий: периодические граничные условия, свободные поверхности. В код SAGE\_MD инкорпорированы различные типы межатомных потенциалов для моделирования свойств материалов с ионными, ковалентными и металлическими типами химических связей. В настоящее время в коде реализована возможность расчёта сил межатомного взаимодействия на основе *ab initio* подхода. Тестирование кода проводилось посредством сравнения результатов МД моделирования по коду SAGE\_MD с результатами МД моделирования по другим кодам, а также с известными экспериментальными значениями физических характеристик материалов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Selezenev A. A., Aleynikov A. Yu., Gantchuk N. S., Yermakov P. V., Labanovski J. K., Korkin A. A. SageMD: molecular-dynamic software package to study properties of materials with different models for interatomic interactions // *Computational Material Science*, 2003. Vol. 28. P. 107–124.

## **FUNDAMENTALS OF MOLECULAR-DYNAMIC SIMULATION OF CONDENSED MATERIALS PROPERTIES**

*A. A. Selezenev*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»)

The report considers the theoretical justification of the applicability of the molecular dynamics (MD) method for calculating the condensed materials properties. The interatomic interaction potentials, which are widely used to describe the properties of condensed materials, are presented. Methods of determination of the interatomic potentials parameters and methods of MD calculation of the condensed materials properties are considered.

The report also gives a brief description of the SAGE\_MD [1] molecular dynamic code. A distinctive feature of the presented code is its focus on simulating the condensed materials properties with various types of chemical bonds (metal, covalent, ionic). The code is written in FORTRAN 90 language, and some part of the code is written in the MS VC++ language. The developed code is supplemented with a friendly user interface. The user interface allows you to specify all source data for the code using dialogs and menus. The result of all crystal lattice operations, when forming the initial geometry of the MD cell, is displayed on the monitor allowing the code user to monitor the accuracy of his actions.

Using the SAGE MD code, you can simulate the properties of materials at constant temperature and/or at constant pressure, as well as simulate the behavior of the material crystal lattice when exposed to external tensile or compression stresses. The code implements calculations of the radial distribution function (RDF) and calculation of diffusion coefficients of interstitial atoms. During simulation you can use various types of boundary conditions: periodic boundary conditions, free surfaces. Various types of interatomic potentials are incorporated into the SAGE\_MD code to simulate the material properties with ionic, covalent and metal types of chemical bonds. Currently, the code implements the means of calculating the interatomic interaction forces on the basis of *ab initio* approach. The code has been tested by comparison of the results of the MD simulation according to the SAGE\_MD code with the results of MD simu-

lation according to other codes, as well as with known experimental values of physical characteristics of materials.

## REFERENCES

1. Selezenev A. A., Aleynikov A. Yu., Gantchuk N. S., Yermakov P. V., Labanovski J. K., Korokin A. A. SageMD: molecular-dynamic software package to study properties of materials with different models for interatomic interactions // *Computational Material Science*, 2003. Vol. 28. P. 107–124.

**Ялышева Анастасия Васильевна**

Инженер-исследователь

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл.,  
проспект Мира, 37Водородное охрупчивание, титановый сплав VT20,  
механические свойства, микроструктура**Yalysheva Anastasiya**

Engineer-researcher

RFNC-VNIIEF

607188, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

Hydrogen embrittlement? VT20 titanium alloy,  
mechanical properties, microstructure

arkad@triton.vniief.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ КРАТКОВРЕМЕННОГО ВЛИЯНИЯ ВОДОРОДА  
ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА  
И СТРУКТУРУ ТИТАНОВОГО СПЛАВА VT20***А. В. Ялышева, И. Е. Бойцов, М. В. Казимов, И. Л. Малков, Е. В. Шевнин*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

В настоящее время перспективным направлением в области энергетики является развитие водородной энергетики. В связи с этим актуальной задачей материаловедения является изучение закономерностей влияния водорода на свойства конструкционных материалов (КМ). Известно, что воздействие водорода на КМ приводит к снижению их пластичности, так называемому «водородному охрупчиванию», вследствие которого может происходить непредсказуемое разрушение конструкций. Из титановых сплавов наиболее склонными к «водородному охрупчиванию» являются псевдо- $\alpha$ -сплавы, что связано с большей растворимостью водорода в  $\beta$ -фазе. К сожалению, на сегодняшний день вопрос «водородного охрупчивания» полностью не изучен, поэтому необходимо проводить исследования КМ в условиях непосредственного воздействия водорода.

На основании вышесказанного было проведено исследование влияния кратковременного (до 10 минут) воздействия газообразного водорода высокого давления на механические свойства и структуру титанового псевдо- $\alpha$ -сплава BT20.

Водородостойкость титанового сплава BT20 оценивалась сравнением его характеристик механических свойств, полученных при испытании цилиндрических образцов типа IV, № 9 ГОСТ 1497-84 на растяжение в среде гелия и в среде водорода при давлении 80 МПа и температурах: 20, 200 и 300 °С. Исследование микроструктуры материала образцов проводилось как до воздействия на них водорода, так и после него. Перед испытаниями заготовки образцов отжигались при температуре  $(820 \pm 10)$  °С в течение  $(25 \pm 2)$  мин.

Результаты исследования показали, что влияние водорода на механические свойства и структуру сплава BT20 не обнаружено.

## **INVESTIGATION OF SHORT-TERM INFLUENCE OF HIGH PRESSURE ON MECHANICAL PROPERTIES AND STRUCTURE OF BT20 TITANIUM ALLOY**

*A. V. Yalysheva, I. E. Boytsov, M. V. Kazimov, I. L. Malkov, E. V. Shevnin*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»)

Currently, the development of hydrogen energy is a promising area in the field of energy. In this regard, the urgent task of material science is the investigation of the laws of the hydrogen influence on structural materials properties (SM). It is known that the effect of hydrogen on SM leads to a decrease in their plasticity, the so-called «hydrogen embrittlement», as result of which unpredictable destruction of structures can occur. Pseudo- $\alpha$ -alloys (within the titanium alloys) are mostly subject to «hydrogen embrittlement» that is associated with greater solubility of hydrogen in the  $\beta$ -phase. Unfortunately, at present the issue of «hydrogen embrittlement» has not been fully studied, therefore it is necessary to conduct SM studies in the conditions of direct exposure to hydrogen.

Based on the above mentioned, the short-term influence (up to 10 minutes) of high pressure gaseous hydrogen on mechanical properties and structure of BT20 titanium pseudo- $\alpha$ -alloy has been investigated.

The BT20 Titanium alloy resistance to hydrogen has been evaluated by comparing its characteristics of mechanical properties obtained when testing cylindrical samples of type IV, № 9 GOST 1497-84 for tension in helium and hydrogen at a pressure of 80 MPa and temperatures of 20, 200 and 300 °C. The microstructure of the sample material was studied both before and after exposure to hydrogen. Before tests the sample blanks have been annealed at temperature of  $(820 \pm 10)$  °C for  $(25 \pm 2)$  min.

The results of the study showed that the influence of hydrogen on the mechanical properties and structure of BT20 titanium alloy had not been discovered.

**Секция 3**

**B8–B12, C18–C25**

**ГИДРИДЫ И ГИДРИДНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ**

**Session 3**

**HYDRIDES AND HYDRIDE  
TRANSFORMATIONS**

**Нецкина Ольга Владимировна**

Руководитель научно-трудоового коллектива по синтезу и исследованию гидридов, ведущий научный сотрудник  
Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН  
630090, г. Новосибирск,  
пр. Академика Лаврентьева, д. 5  
Область научных интересов: синтез и каталитические превращения гидридных соединений

**Olga Netskina**

Head of scientific workforce on the synthesis and investigation of hydrides,  
Boreskov Institute of Catalysis SB RAS  
Leading Researcher  
630090, Novosibirsk, Lavrentiev Ave. 5  
Fields of interest: catalytic conversions of hydrides, e-mail: netskina@catalysis.ru

**ГИДРИДЫ БОРА КАК ЭНЕРГОЕМКИЕ МАТЕРИАЛЫ**

*О. В. Нецкина, О. В. Комова*

Институт катализа им. Г. К. Борескова СО РАН, Новосибирск

Состав гидридных соединений бора весьма разнообразен [1], но все они характеризуются высокой водородной емкостью и большой теплотой сгорания. Следовательно, наиболее перспективно их использование в качестве компактных источников водорода и энергоемких добавок к топливам. Однако при выборе гидрида для конкретной области применения следует учитывать его стабильность, поскольку этот класс соединений бора весьма реакционноспособен.

Анализ литературы [2, 3] показал, что основными кандидатами для создания компактных водородгенерирующих композиций на основе гидридов бора выступают амминборан ( $\text{NH}_3\text{BH}_3$ ) и боргидрид натрия ( $\text{NaBH}_4$ ). Их практическое использование, как носителей водорода, предполагает разные принципы организации процесса газогенерации.

Для амминборана наиболее приемлемым способом получения водорода является термолиз [4], температуру которого необходимо снизить ниже 100 °С. Для достижения этой цели варьируют дисперсность гидрида, дефектность кристаллической решетки, вводят добавки, выполняющие роль центров адсорбции/десорбции и спилловера водорода [5]. В отдельных работах [6] предлагается расширить спектр гидридных соединений со связью N-B для получения водорода путем термолиза. Например, таким соединением выступает этилендиамин(бис)боран [7], который взаимодействуя с этилендиамином в присутствии платинового катализатора может генерировать водород уже при комнатной температуре [8].

Следует отметить, что борсодержащие гидриды энергично взаимодействуют с водой с выделением большого количества тепла, что позволяет создать водородгенерирующие системы для Арктической зоны. Тем не менее, для их безопасной эксплуатации следует выбрать гидрид с приемлемым тепловым эффектом. Таким соединением является боргидрид натрия, но для его полной конверсии требуются присутствие катализаторов [9]. Традиционно используют кобальт как самый активный среди переходных металлов. Однако стоит задача заменить кобальт на никель, поскольку его стоимость существенно возросла из-за востребованности в производстве литий-ионных аккумуляторов. Равноценной замены кобальта на никель сделать нельзя, поскольку никель существенно менее активный металл в гидролизе боргидрида натрия. В настоящий момент разрабатываются подходы к повышению активности никеля.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Михайлов Б. М. Химия бороводородов. М.: Наука. 1967.
2. Wang P., X. Rang Dalton Trans. 40 (2008) 5400.
3. Fakioglu E. et al. Int. J. Hydrog. Energy. 29 (2004) 1371.
4. Akbayrak S., Özkar S. Int. J. Hydrog. Energy. 40 (2018) 18592.
5. Frankcombe T. J. Chem. Rev. 112 (2012) 2164.
6. Ja'o A. M. et al. J. Phys. Chem. A 123 (2019) 7104.
7. Sahler S. et al. Int. J. Hydrog. Energy. 38 (2013) 3283.
8. Zhang G. et al. Angew. Chem. Int. Ed. 60 (2021) 11725.
9. Brack P. et al. Energy Sci. Eng. 3 (2015) 174.

**BORON HYDRIDE AS ENERGY-RICH MATERIALS***O. V. Netskina, O. V. Komova*

Boreskov Institute of Catalysis SB RAS, Novosibirsk

The composition of borohydride compounds is very diverse [1]. All of them are characterized by high hydrogen capacity and high heat of combustion. So, using borohydrides as compact hydrogen sources and energy-intensive additives to fuels is most promising. However, stability should be taken into account when selecting a hydride for a specific application since this class of boron compounds is highly reactive.

Analysis of the literature [2, 3] shows that ammonia borane ( $\text{NH}_3\text{BH}_3$ ) and sodium borohydride ( $\text{NaBH}_4$ ) are the main candidates for the creation of compact hydrogen-generation compositions based on boron hydrides. Their practical use, as hydrogen carriers, implies different concepts of organization of the gas generation process.

For ammonia borane, the most appropriate method to produce hydrogen is thermolysis [4], the temperature of which should be reduced below 100 °C. To do this, the hydride dispersion and crystal lattice defectiness are varied, and additives that act as centers of adsorption/desorption and hydrogen spillover are introduced [5]. In separate works [6], it is proposed to expand the range of hydride compounds with an N-B bond for hydrogen production by thermolysis. One such compound is ethylenediamine(bis)borane [7], which, when interacting with ethylenediamine over a Pt/C catalyst, can generate hydrogen even at ambient temperature [8].

It should be noted that boron-containing hydrides react intensely with water, releasing a lot of heat. This makes it possible to develop hydrogen-generating systems for the Arctic zone. However, for safe use, a hydride with an acceptable thermal effect should be chosen. Such a compound is sodium borohydride, but its complete conversion requires the presence of catalysts [9]. Cobalt is traditionally used because it is the most active of the transition metals. However, its cost has increased significantly due to its demand in the production of lithium-ion batteries. For this reason, it is suggested that cobalt should be replaced with nickel. Unfortunately, an equivalent replacement is impossible since nickel is a much less active metal in the hydrolysis of sodium borohydride. Approaches to increasing nickel activity are currently being developed.

## REFERENCES

1. Mikhailov B. M., The Chemistry of Borohydrides [in Russian], Nauka (1967).
2. Wang P. X. Rang Dalton Trans. 40 (2008) 5400.
3. Fakioglu E. et al. Int. J. Hydrog. Energy. 29 (2004) 1371.
4. Akbayrak S. S. Özkar Int. J. Hydrog. Energy. 40 (2018) 18592.
5. Frankcombe T. J. Chem. Rev. 112 (2012) 2164.
6. Ja'o A. M. et al. J. Phys. Chem. A 123 (2019) 7104.
7. Sahler S. et al. Int. J. Hydrog. Energy. 38 (2013) 3283.
8. Zhang G. et al. Angew. Chem. Int. Ed. 60 (2021) 11725.
9. Brack P. et al. Energy Sci. Eng. 3 (2015) 174.

**Мусяев Рафаэль Камилевич**

Ведущий научный сотрудник  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607190, Россия, г. Саров, пр. Мира, д. 37  
Тритиевые технологии,  
гидриды металлов, физика плазмы,  
изотопы водорода

**Musyaev Rafael**

Leading Researcher  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian  
Research Institute of Experimental Physics  
(RFNC-VNIIEF)  
Sarov, Nizhny Novgorod region, RU, 607190  
Tritium technology, hydride of metals,  
plasma physic, hydrogen isotopes  
RKMusyaev@vniief.ru



## **МЕТАЛЛОГИДРИДНЫЕ ПОРОШКОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ В ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ ФИЗИКЕ. ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ И ПРИМЕНЕНИЯ**

*Р. К. Мусяев*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

Рассмотрены практические подходы и экспериментальные методы измерения различных физических характеристик и параметров систем на базе металлгидридных порошков, используемых в качестве геттера – поглотителя изотопов водорода. На основе обобщенной математической модели исследуемого объекта обосновывается постановка модельного эксперимента (условия проведения опыта, диапазон изменения термодинамических величин и т. д.) и способы измерения необходимых физических величин.

В зависимости от применения металлгидридной системы на основе порошка (получение технических/рабочих характеристик или измерение

физических коэффициентов сплошной среды) используются особые процедуры подготовки образцов (прессование, измерение газопроницаемости, термическая активация) с целью получения ряда исходных физических, механических и кинетических параметров исследуемого объекта. Взаимодействие изотопов водорода с гидридообразующим металлом, описываемое кинетическим уравнением, при определенных условиях в рамках модели сплошной, пористой и проницаемой среды, описываемой системой уравнений баланса тепла, импульса и вещества, имеет свои особенности, которые могут привести к значительному отличию расчетного и реального значения измеряемой физической величины. Поэтому правильная постановка экспериментов, с учетом особенностей сплошной среды порошковых материалов, и подбор необходимого измерительного оборудования, с учетом критериев их применимости, имеет большое значение в экспериментальной физике.

Использование современных средств обработки экспериментальных данных и специализированного ПО позволяет качественно смоделировать поведение исследуемой системы на базе геттерных порошковых материалов или получить необходимые коэффициенты различными расчетными методами с использованием экспериментальных результатов измерений (решения обратной задачи, метод наименьших квадратов и т. п.). Применение специальных программных пакетов типа САПР позволяет, при необходимости, внести коррективы в математическую модель объекта исследований и провести «виртуальный» эксперимент, сравнивая, в дальнейшем, результаты расчетов с опытными данными.

## **METAL HYDRIDE POWDER MATERIALS IN EXPERIMENTAL PHYSICS. FEATURES OF PREPARATION AND APPLICATION**

*R. K. Musyaev*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»)

Practical approaches and experimental methods of measuring various physical characteristics and parameters of systems based on metal hydride powders used as getter – hydrogen isotope absorber, are considered. Based on the generalized mathematical model of the object under study, a model experi-

ment (test conditions, range of changes in thermodynamic values, etc.) and methods of measurements of the required physical values are justified.

Depending on the use of metal hydride system based on powder (obtaining technical/performance characteristics or measuring physical coefficients of a continuous medium), special procedures for preparing samples are used (pressing, gas permeability measurement, thermal activation) in order to obtain a number of initial physical, mechanical and kinetic parameters of the investigated object. Interaction of hydrogen isotopes with a hydride-forming metal, described by the kinetic equation, under certain conditions within the model of a continuous, porous and permeable medium, described by the system of equations of the heat, impulse and matter balance, has its own characteristics, which can lead to a significant difference in the calculated and real value of the measured physical quantity. Therefore the correct setting up of the experiments, taking into account the peculiarities of the continuous medium of powder materials, and the selection of the necessary measurement equipment, taking into account the criteria for their applicability, is of great importance in experimental physics.

The use of modern means of processing experimental data and specialized software allows you to simulate qualitatively the behavior of the system under study on the basis of getter powder materials or obtain the necessary coefficients by various calculation methods using experimental measurement results (inverse problem solution, Ordinary Least Squares method, etc.). The use of special software packages such as CAD allows, if necessary, to make adjustments to the mathematical model of the research object and conduct a «virtual» experiment, comparing, in the future, the results of calculations with the experimental data.

**ТОНКИЕ ПЛЕНКИ ДЛЯ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА**

*A. A. Писарев*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

**A THIN FILMS FOR HYDROGEN STORAGE**

*A. A. Pisarev*

National Research Nuclear University MEPHI

**Голубков Александр Николаевич**

Ведущий научный сотрудник  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, Россия, г. Саров, пр. Мира, д. 37  
Водород, высокое давление, гидриды металлов,  
источники водорода, аппаратура

**Golubkov Aleksandr**

Leading Researcher

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian  
Research Institute of Experimental Physics  
(RFNC-VNIIEF)

Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia, 607188  
Hydrogen, high pressure, hydride of metal,  
sources of hydrogen, equipment  
arkad@triton.vniief.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ГИДРИДОВ МЕТАЛЛОВ ПРИ  
ВЫСОКИХ ДАВЛЕНИЯХ ВОДОРОДА**

*А. Н. Голубков, И. Л. Малков*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

В лекции рассмотрены конструктивные особенности установок, предназначенных для синтеза и последующего исследования свойств гидридов металлов при высоком давлении изотопов водорода. Приведены примеры исполнения реакционных сосудов с исследуемым веществом, коммутирующей аппаратуры, датчиков давления, источников изотопов водорода. Рассмотрен круг сталей и сплавов, которые могут быть использованы для изготовления элементов установок.

Проведен краткий обзор параметров, которые чаще всего регистрируются при исследованиях свойств гидридов металлов при высоком давлении изотопов водорода. Более подробно будут рассмотрены особенности исследования Р-Т-С соотношений, построению фазовых диаграмм, термическому анализу и калориметрии.

---

## **INVESTIGATION OF METAL HYDRIDES PROPERTIES AT HIGH PRESSURES OF HYDROGEN**

*A. N. Golubkov, I. L. Malkov*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»)

The work considers the design features of the installations intended for synthesis and subsequent investigation of metal hydrides properties at high pressure of hydrogen isotopes. Examples of the reaction vessels designs with substance under test, switching equipment, pressure sensors, and sources of hydrogen isotopes are given. A range of steels and alloys that can be used to make installation elements is considered.

A brief review of parameters that are most often recorded when studying the properties of metal hydrides at high pressure of hydrogen isotopes is carried out. The features of P-T-C ratios studies, phase diagram construction, thermal analysis and calorimetry is considered in detail.

**Митрохин Сергей Владиленович**

Заведующий лабораторией

Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Москва, Ленинские горы д. 1, стр. 11

Металлогидридные технологии

**Mitrokhin Sergey**

Head of laboratory

Chemistry Department Lomonosov

Moscow State University

Moscow, Leninskie gory 1-11

Metal-hydride technologies

mitroklhin@hydride.chem.msu.ru

## **СТАТИСТИЧЕСКАЯ ПРОГНОСТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПОДБОРА СОСТАВОВ ВОДОРОДОПОГЛОЩАЮЩИХ СПЛАВОВ ФАЗЫ ЛАВЕСА**

*С. В. Митрохин, М. А. Прохоренков*

Химический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова

Модель статистического прогноза разработана для оптимизации подбора составов сплавов структурных типов фаз Лавеса для использования в многоступенчатых металлогидридных компрессорах водорода. Исходные сплавы были испытаны с помощью рентгеновского излучения и EDX. Были измерены изотермы абсорбции/десорбции и сопоставлены экспериментальные значения термодинамических параметров с результатами расчетов.

---

**STATISTICAL FORECAST MODEL FOR TAILORING LAVES  
PHASE HYDROGEN ABSORBING ALLOYS COMPOSITIONS**

*S. V. Mitrokhin, M. A. Prokhorenkov*

Chemistry Department Lomonosov Moscow State University

The statistical forecast model is developed to optimize the tailoring of Laves phase alloy compositions for use in the metal hydride multistage hydrogen compressors. The initial alloys were tested with X-ray and EDX. Absorption/desorption isotherm were measured and the experimental values of thermodynamic parameters compared with results of calculations.

**Эльман Роман Романович**

Младший научный сотрудник ИЯТШ  
Томский политехнический университет  
г. Томск, пр. Ленина, 43  
Область научных интересов:  
взаимодействие водорода с материалами

**Elman Roman**

Junior researcher  
Tomsk Polytechnic University  
Tomsk, Lenina st. 43  
Fields of interest: hydrogen interaction  
with materials  
rre1@tpu.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОПЕРЕНОСА В СИСТЕМАХ  
МЕТАЛЛОГИДРИДНОГО ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА**

*Р. Р. Эльман, В. Н. Кудияров, Н. Е. Курдюмов, Н. С. Пушилина*

Томский политехнический университет

Хранение водорода в металлогидридных системах представляет большой интерес для развития водородной экономики. Однако, так как засыпка порошка гидрида металла в баллоне характеризуется недостаточной передачей тепла от одной частицы к другой, а абсорбция водорода гидридообразующими металлами является экзотермическим процессом, вызывающим повышение температуры твердого вещества, что в свою очередь способствует повышению значений равновесного давления и снижению движущего потенциала реакции преобразования металла в его гидрид, необходима эффективная система подвода и отвода тепла в системе для обеспечения возможности использования всего реагента в металлогидридной системе хранения водорода. В этой связи, актуальным является разработка и оптимизация теплообменных элементов металлогидридных систем хранения водорода с использованием методов цифрового моделирования и 3D-прототипирования.

В настоящей работе с помощью методов цифрового моделирования было исследовано несколько геометрий теплообменника, выполненного из меди. Средой для моделирования был выбран пакет программных средств фирмы ANSYS. Была определена оптимальная конфигурация теплообменника, а также вычислена скорость заполнения водородом металлгидридного баллона с теплообменником и без него.

С помощью методов 3D-прототипирования было реализовано несколько моделей медного теплообменника. Осаждение осуществлялось плавлением и переносом проволоки меди на подложку из нержавеющей стали AISI 321 в вакуумной камере при помощи электронного луча. Разработана методика и подобран оптимальный режим 3D-печати для изготовления медных теплообменных элементов. Показана зависимость свойств теплообменника от выбранной геометрии, а также от погонной энергии  $Q$  процесса 3D-печати. Проведены испытания выбранных теплообменников в металлгидридных системах хранения водорода.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01280), а также в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

## **SIMULATION OF HEAT TRANSFER IN METAL-HYDRIDES STORAGE SYSTEM**

*R. R. Elman, V. N. Kudiiarov, N. E. Kurdyumov, N. S. Pushilina*

Tomsk Polytechnic University

Metal-hydrides hydrogen storage systems are of great interest for the development of the hydrogen economy. However, insufficient heat transfer characterizes metal hydrides in the tank. In addition, hydrogen absorption by the hydride-forming metal is an exothermic process leading to temperature rise. Which puts a stress on the equilibrium condition and reduces the driving force of the conversion reactions of metal hydrides. That is why it is important to develop efficient system for supplying and removing heat in the system to ensure that the entire metal hydride will be fully used. In this regard, this work is devoted to the development and optimization of heat exchanger in metal-hydride hydrogen storage systems using techniques of digital computer simulation and 3D-prototyping.

We studied several geometries of a heat exchanger made of copper using digital modeling methods. The ANSYS software suite was chosen as the simulation environment. The optimal configuration of the heat exchanger was determined, and the rate of hydrogen filling of metal-hydride tank with and without a heat exchanger was calculated.

Several models of copper heat exchanger have been realized using 3D-prototyping techniques. The deposition was carried out by the melting and transferring copper wire on AISI 321 stainless steel substrate in a vacuum chamber using an electron beam. A method of copper deposition has been developed and the optimal 3D-printing mode for the manufacture of copper heat exchange elements has been selected. The dependence of the properties of the heat exchanger on the selected geometry, as well as on the heat input  $Q$  of the 3D printing process is shown.

The work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-29-01280), as well as within the framework of the program to improve the competitiveness of Tomsk Polytechnic University.

**Сомкина Евгения Владимировна**

Инженер-исследователь

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл.,

проспект Мира, 37

Химия гидридов, технология  
и материаловедение гидридов металлов**Somkina Evgeniya**

Engineer-researcher

RFNC-VNIIEF

Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia, 607188

Chemistry of hydrides, technology and materials

science of metal hydrides

evsomkina@vniief.ru

**АНАЛИЗ ПРОЦЕССА ВАКУУМНО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ  
ПРЕССОВАННЫХ ОБРАЗЦОВ ИЗ ГИДРИДА ЛИТИЯ***Е. В. Сомкина, Ю. С. Белова, А. А. Тарасов, А. М. Горелов*

Государственная корпорация по атомной энергетике «РОСАТОМ»

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский

научно-исследовательский институт экспериментальной физики

(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

Работа посвящена анализу процесса вакуумно-термической обработки (ВТО) прессованного гидрида лития, приводящего к стабилизации химического состава материала образцов. Экспериментальные исследования заключались в измерении параметров газовой среды до и после нагрева образцов, помещенных в герметичный вакуумируемый контейнер, до температур 250, 400 и 600 °С. Установлено, что основными газообразными продуктами в указанных условиях являются водород и метан. Рассчитаны удельные количества водорода и метана, выделяющиеся из образцов при их нагреве. Высказаны предположения о возможных реакциях образования газообразных продуктов.

## **A REVIEW OF VACUUM-THERMAL TREATMENT OF PRESSED LITHIUM HYDRIDE SPECIMENS**

*E. V. Somkina, Yu. S. Belova, A. A. Tarasov, A. M. Gorelov*

State Corporation for Atomic Energy «ROSATOM»  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (RFNC-VNIIEF)

The objective of the research is to study the process of vacuum-thermal treatment (VTT) of pressed lithium hydride, resulting in chemical content stabilization of specimens material. Experimental studies included measurements of gaseous medium parameters before and after heating the specimens, placed in vacuumized leak-proof container, up to 250, 400 и 600 °C. Hydrogen and methane have been determined as main gaseous products under the specified conditions. The specific amount of hydrogen and methane released in the process of specimens heating has been calculated. Assumptions about possible reactions of gaseous products formation have been made.

**Курский Руслан Александрович**

Инженер-исследователь

НИЦ «Курчатовский институт»

Материаловедение атомных реакторов

Взаимодействие водорода

с конструкционными материалами

**Kurskiy Ruslan**

An engineer-researcher

NRC «Kurchatov institute»

Reactor material science

Hydrogen interaction with structural materials

Kurskiy\_RA@nrcki.ru, Ruslan.kurskiy@rambler.ru

## **ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ГИДРИДОВ В ОБОЛОЧКАХ ТВЭЛОВ В УСЛОВИЯХ СУХОГО ХРАНЕНИЯ ОТРАБОТАВШЕГО ЯДЕРНОГО ТОПЛИВА (ОЯТ)**

*Р. А. Курский, О. О. Забусов, А. В. Рожков*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва, Россия

Существующих на данный момент мощностей по переработки ОЯТ как в России, так и в мире не хватает для того, чтобы успевать за текущими поступлениями вновь выгруженного топлива, а также переработки уже имеющегося. Для того чтобы решить проблему хранения огромного количества ОЯТ было принято решение разработки и внедрения технологии «сухого хранения». Данная технология сочетает в себе ряд преимуществ по сравнению с осуществляющей технологией «мокрого хранения» в плане безопасности и экономической эффективности.

Ключевыми требованиями при обеспечении ядерной безопасности в процессе транспортировки и хранения ОЯТ являются гарантия сохранности топлива в хранилище и непопадание продуктов деления (ПД) в окружающую среду. Первым барьером, препятствующим распространению ПД в тепловых реакторах является оболочка твэлов, изготовленная из циркониевого сплава. По сути, безопасность эксплуатации и всего процесса последующего хранения твэла (включая транспортировку, вакуум-

ную сушку и непосредственно хранение) во многом определяется изменениями свойств материалов оболочек.

Накопленный при эксплуатации за счет химического взаимодействия оболочек твэлов с теплоносителем водород способствует образованию гидридных фаз при охлаждении, которые при определенной структуре и ориентации способны вызвать ухудшение механических свойств оболочек твэлов. Водородное охрупчивание и образование радиальной структуры гидридов считаются основными причинами, способными привести к деградации свойств оболочек твэлов во время сухого хранения. Наиболее опасной является структура гидридов, представленная в виде связанных радиально-тангенциальных стеков, пересекающих насквозь оболочку по толщине.

В работе представлены основные факторы, влияющие на структуру гидридов в оболочках твэлов из циркониевых сплавов в условиях сухого хранения, а также результаты исследований, проведенных в рамках обоснования безопасности сухого хранения ОЯТ отечественных реакторов ВВЭР-1000.

## **HYDRIDE STRUCTURE FORMATION IN FUEL CLADDINGS UNDER DRY STORAGE CONDITIONS OF THE SPENT NUCLEAR FUEL (SNF)**

*R. A. Kurskiy, O. O. Zabusov, A. V. Rozhkov*

National Research Centre «Kurchatov institute», Moscow, RF

The existing SNF reprocessing capacities both in Russia and in the world are not sufficient to treat the current intake of fresh SNF, as well as the reprocessing of existing SNF. It was decided to develop and implement the «dry storage» technology to solve the problem of storage of huge amount of SNF. This technology combines some advantages as compared with existing «wet storage» technology in terms of safety and cost efficiency.

The key requirements of ensuring nuclear safety during SNF transportation and storage are the guarantee of the fuel safety in a storage facility and the prevention of fission products (FP) from entering the environment. The fuel cladding of zirconium alloys is the first barrier preventing FP spread. In fact, both the safe operation and the following storage process of fuel elements in

whole (including transportation, vacuum drying and storage itself) is determined by changes in fuel cladding properties.

Hydrogen accumulated during operation due to cladding oxidation reaction promotes the hydride formation in cool-down, which being arranged in a certain way (structure and orientation) are capable to cause cladding mechanical properties drop. Hydrogen embrittlement and radial hydride formation are the main reasons of cladding mechanical properties degradation during dry storage. The hydride structure with radial-circumferential continuity stacks crossing the cladding through the thickness is the most dangerous case.

The key factors influencing the hydride structure in claddings made of zirconium alloys during dry storage and the results of the study carried out in the frame of the safe VVER-1000 SNF dry storage justification are presented in this work.

**Прохоренков Михаил Алексеевич**

Аспирант

МГУ им. М. В. Ломоносова,  
Химический факультет  
г. Москва, Ленинские Горы, 1, с11  
Металлогидридные технологии

**Prokhorenkov Mikhail**

Graduate student

Moscow State University, Department of chemistry  
Moscow, Leninskie Gory, 1  
Metal hydride technologies  
miki1995@yandex.ru  
Prokhorenkov@hydride.chem.msu.ru

**ГИДРИДЫ ИМС ФАЗ ЛАВЕСА С ВЫСОКИМ ДАВЛЕНИЕМ  
ДИССОЦИАЦИИ**

*М. А. Прохоренков, С. В. Митрохин, Э. А. Мовлаев*

МГУ им. М. В. Ломоносова, Химический факультет

Развитие альтернативных источников энергии и, в частности, водородной энергетики предопределило повышенный интерес к веществам, способным эффективно аккумулировать и компримировать водород. Для этого наиболее перспективными являются интерметаллические соединения (ИМС). На сегодняшний день с появлением композитных баллонов высокого давления требуется и разработка ИМС с высоким входным и выходным давлением. Для того чтобы получить нужное равновесное давление, используются многокомпонентные системы, имеющие однофазную структуру. Сейчас самыми перспективными с точки зрения массовой емкости и экономически целесообразными являются ИМС на основе титана и циркония. На сегодняшний день для подбора подходящего ИМС для конкретной задачи проводят массу экспериментов. В настоящей работе для сокращения числа экспериментов была применена разработанная нами статистическая модель и произведено сравнение теоретически полученных данных с экспериментальными. Для того чтобы

точно охарактеризовать данные соединения, они были подвергнуты РФА и EDX. Построены изотермы десорбции и абсорбции, а также рассчитаны термодинамические параметры реакции с водородом следующих соединений:  $Ti_{0.9}Zr_{0.1}(Cr_{0.5}Mn_{0.25}Fe_{0.25})_{1.84}$ ,  $Ti_{0.79}Zr_{0.21}(V_{0.2}Fe_{0.8})_{1.92}$ ,  $ZrFe_{1.94}$ ,  $Ti(V_{0.05}Cr_{0.37}Mn_{0.56}Cu_{0.02})_{2.03}$ ,  $Ti(V_{0.33}Fe_{0.67})_{1.88}$ . Рассчитанные экспериментальные термодинамические параметры реакции с водородом представлены в табл.

### Термодинамические параметры реакции

Сплав	$a$ , кДж/моль	$Sa$ , Дж/моль·К	$d$ , кДж/моль	$Sd$ , Дж/моль·К
$Ti_{0.9}Zr_{0.1}(Cr_{0.5}Mn_{0.25}Fe_{0.25})_{1.84}$	16,9	96,9	19,7	103,1
$Ti_{0.79}Zr_{0.21}(V_{0.2}Fe_{0.8})_{1.92}$	20,9	116,1	16,7	102,1
$ZrFe_{1.94}$	13,5	98,7	18,6	109
$Ti(V_{0.05}Cr_{0.37}Mn_{0.56}Cu_{0.02})_{2.03}$	15,7	94	20,6	105,7
$Ti(V_{0.33}Fe_{0.67})_{1.88}$	21,6	110,6	26,4	123

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19-58-80008.

## IMC HYDRIDES OF LAVES PHASES WITH HIGH DISSOCIATION PRESSURE

*M. A. Prokhorenkov, S. V. Mitrokhin, E. A. Movlaev*

Lomonosov Moscow State University Chemistry Department

The development of alternative energy sources and, in particular, hydrogen energy has predetermined an increased interest in substances capable of efficiently accumulating and compressing hydrogen. For this, intermetallic compounds (IMC) are the most promising. Today, with the advent of high-pressure composite cylinders, the development of IMC with high inlet and outlet pressures is also required. In order to obtain the desired equilibrium pressure, multicomponent systems with a single-phase structure are used. Now the most promising in terms of mass capacity and economically viable are IMC based on titanium and zirconium. To date, a lot of experiments are being carried out to select a suitable IMC for a specific task. In this work, in order to reduce the number of experiments, we applied the statistical model

developed by us and compared the theoretically obtained data with the experimental ones. In order to accurately characterize these compounds, they were subjected to X-ray and EDX. The desorption and absorption isotherms were constructed, and the thermodynamic parameters of the reaction with hydrogen were calculated for the following compounds:  $\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.25}\text{Fe}_{0.25})_{1.84}$ ,  $\text{Ti}_{0.79}\text{Zr}_{0.21}(\text{V}_{0.2}\text{Fe}_{0.8})_{1.92}$ ,  $\text{ZrFe}_{1.94}$ ,  $\text{Ti}(\text{V}_{0.05}\text{Cr}_{0.37}\text{Mn}_{0.56}\text{Cu}_{0.02})_{2.03}$ ,  $\text{Ti}(\text{V}_{0.33}\text{Fe}_{0.67})_{1.88}$ . The calculated experimental thermodynamic parameters of the reaction with hydrogen are presented in table.

Thermodynamic parameters of the reaction

Сплав	$a$ , kJ/mole	$S_a$ , kJ/mole · K	$d$ , kJ/mole	$S_d$ , kJ/mole · K
$\text{Ti}_{0.9}\text{Zr}_{0.1}(\text{Cr}_{0.5}\text{Mn}_{0.25}\text{Fe}_{0.25})_{1.84}$	16.9	96.9	19.7	103.1
$\text{Ti}_{0.79}\text{Zr}_{0.21}(\text{V}_{0.2}\text{Fe}_{0.8})_{1.92}$	20.9	116.1	16.7	102.1
$\text{ZrFe}_{1.94}$	13.5	98.7	18.6	109
$\text{Ti}(\text{V}_{0.05}\text{Cr}_{0.37}\text{Mn}_{0.56}\text{Cu}_{0.02})_{2.03}$	15.7	94	20.6	105.7
$\text{Ti}(\text{V}_{0.33}\text{Fe}_{0.67})_{1.88}$	21.6	110.6	26.4	123

The study was carried out with the financial support of the Russian Foundation for Basic Research within the framework of the scientific project No. 19-58-80008.

**Курганская Анастасия Александровна**

Студент

МГУ им. М. В. Ломоносова  
РФ, г. Москва, Ленинские горы, 1  
Физика твердого тела

**Kurganskaya Anastasia**

Student

Lomonosow Moscow State University  
Russia, Moscow, Leninskiye gory, 1  
Solid state physics  
kurganskaia.aa17@physics.msu.ru



**ВЛИЯНИЕ ГИДРИРОВАНИЯ НА МАГНИТНЫЕ  
И МАГНИТОКАЛОРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СИСТЕМ  
 $RNi$  ( $R = Gd, Tb$ )**

*А. А. Курганская, И. С. Терёшина, В. Н. Вербецкий*

МГУ им. М. В. Ломоносова, 1199916 Москва, Россия

Среди магнитных материалов интерметаллические соединения  $R-Ni$  представляют большой интерес из-за их большого магнитокалорического эффекта (МКЭ), наблюдаемого в них вблизи температур Кюри, находящихся в криогенной области [1]. Свойства редкоземельных интерметаллидов чрезвычайно чувствительны к различным замещениям в подрешетках редкой земли и никеля. Гидрирование также существенно влияет на температуры магнитного перехода, намагниченность и магнитную анизотропию [2]. Сплавы  $Gd_xTb_{1-x}Ni$  ( $x = 0,1$  и  $0,9$ ) были получены из высокочистых элементов в дуговой печи в защитной атмосфере аргона на медном водоохлаждаемом тигле. Гидриды  $Gd_xTb_{1-x}NiH_4$  ( $x = 0,1$  и  $0,9$ ) были синтезированы на установке типа Сиверса с рабочим диапазоном давления водорода до 100 МПа. Состав гидридов рассчитывали волюметрическим методом, используя уравнение Ван-дер-Ваальса. Рентгеноструктурный анализ образцов (РСА) производился в геометрии Брэгга-Брентано с использованием излучения  $Cu-K\alpha$  в диапазоне  $2\theta = 10-120^\circ$  с шагом  $0,0072^\circ$ . Кривые намагничен-

ности образцов были получены в магнитных полях до 7 Тл в диапазоне температур 2–90 К. Изменение изотермической части энтропии было рассчитано по изотермам намагничивания  $M(H)$ , с использованием соотношения Максвелла [3]. Обнаружено, что гидрирование значительно понижает температуру Кюри ( $T_C$ ) в гидридах  $Gd_xTb_{1-x}NiH_4$  по сравнению с исходными составами  $Gd_xTb_{1-x}Ni$ . Гидрирование значительно увеличивает МКЭ исследуемых соединений (при  $\mu_0\Delta H = 5$  Тл с  $-\Delta S_T(Gd_{0,9}Tb_{0,1}Ni) = 16,5$  Дж  $кг^{-1}K^{-1}$  до  $-\Delta S_T(Gd_{0,9}Tb_{0,1}NiH_4) = 20,5$  Дж  $кг^{-1}K^{-1}$  и с  $-\Delta S_T(Gd_{0,1}Tb_{0,9}Ni) = 14,5$  Дж  $кг^{-1}K^{-1}$  до  $-\Delta S_T(Gd_{0,1}Tb_{0,9}NiH_4) = 16,5$  Дж  $кг^{-1}K^{-1}$ ). Наблюдаемые эффекты могут быть объяснены на основе изменения обменных и магнитокристаллических взаимодействий в исследуемых соединениях.

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-00773, <https://rscf.ru/project/22-29-00773/>.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Gschneidner K. A. Jr, Pecharsky V. K., Tsokol A. O. Recent developments in magnetocaloric materials, Rep. Prog. Phys. 68(6) (2005) 1479, doi: 10.1088/0034-4885/68/6/R04.
2. Lushnikov S. A., Tereshina I. S., Verbetski V. N. Physics of the Solid State. 61(1) (2019) 91, doi: 10.1134/S1063783419010153.
3. Pecharsky V. K., Gschneidner Jr K. A. J. Appl. Phys. 86(1) (1999) 565. <https://doi.org/10.1063/1.370767>.

## THE INFLUENCE OF HYDROGENATION ON MAGNETIC AND MAGNETOCALORIC PROPERTIES OF $RNi$ ( $R = Gd, Tb$ ) SYSTEMS

*A. A. Kurganskaya, I. S. Tereshina, V. N. Verbetskiy*

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia

Among magnetic materials  $R$ -Ni intermetallic compounds are of great interest due to the large magnetocaloric effect (MCE) occurring in them near their Curie temperatures, which are in the cryogenic area [1]. Rare earth intermetallics are extremely sensitive to various substitutions in the rare earth and Ni sublattices. Absorption of hydrogen also significantly affects magnetic transition temperatures, magnetisation, and magnetic anisotropy [2]. Ingots of  $Gd_xTb_{1-x}Ni$  ( $x = 0.1$  and  $0.9$ ) were prepared from pure elements in an arc

furnace under an Ar protective atmosphere on a copper water-cooled crucible. The  $\text{Gd}_x\text{Tb}_{1-x}\text{NiH}_4$  ( $x = 0.1$  and  $0.9$ ) hydrides were synthesised using a Sievert-type setup with a hydrogen pressure operating range to 100 MPa. The hydrides' composition was calculated from the volume change before and after absorption using the van der Waals equation. X-ray diffraction (XRD) patterns were obtained in a Bragg-Brentano geometry using  $\text{Cu-K}\alpha$  radiation in a range of  $2\theta = 10\text{--}120^\circ$  at steps of  $0.0072^\circ$ . The samples were measured in magnetic fields up to 7 T in a temperature range of 2–90 K. The isothermal entropy change was calculated from magnetisation isotherms  $M(H)$  by integrating Maxwell's relation [3]. It was found that hydrogenation significantly decreases Curie temperatures ( $T_C$ ) in the hydrides  $\text{Gd}_x\text{Tb}_{1-x}\text{NiH}_4$  compared to their parent alloys  $\text{Gd}_x\text{Tb}_{1-x}\text{Ni}$ . Hydrogen absorption significantly increases MCE in the compounds researched (at  $\mu_0\Delta H = 5$  T from  $-\Delta S_T(\text{Gd}_{0.9}\text{Tb}_{0.1}\text{Ni}) = 16,5 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  to  $-\Delta S_T(\text{Gd}_{0.9}\text{Tb}_{0.1}\text{NiH}_4) = 20,5 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$  and from  $-\Delta S_T(\text{Gd}_{0.1}\text{Tb}_{0.9}\text{Ni}) = 14,5 \text{ Дж кг}^{-1}\text{K}^{-1}$  to  $-\Delta S_T(\text{Gd}_{0.1}\text{Tb}_{0.9}\text{NiH}_4) = 16,5 \text{ Дж кг}^{-1}\text{K}^{-1}$ ). The observed effects could be explained based on altered exchange and magnetocrystalline interactions in the studied compounds.

This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-29-00773, <https://rscf.ru/project/22-29-00773/>.

## REFERENCES

1. Gschneidner K. A. Jr, Pecharsky V. K., Tsokol A. O. Recent developments in magnetocaloric materials. Rep. Prog. 68(6) (2005) 1479, doi: 10.1088/0034-4885/68/6/R04.
2. Lushnikov S. A., Tereshina I. S., Verbetski V. N. Physics of the Solid State. 61(1) (2019) 91, doi: 10.1134/S1063783419010153.
3. Pecharsky V. K., Gschneidner Jr K. A. J. Appl. Phys. 86(1) (1999) 565. <https://doi.org/10.1063/1.370767>.

**Веселова Светлана Владимировна**

Инженер I категории

Московский государственный университет  
им. М. В. Ломоносова, 119234, г. Москва,  
ул. Ленинские Горы, дом 1, строение 11

Область научных интересов: редкоземельные  
сплавы и интерметаллиды, гидриды, нитриды,  
магнитные свойства материалов

**Veselova Svetlana**

1st Category Engineer

Lomonosov Moscow State University, Moscow,  
119234, Russia, Leninskie gory, 1, Building 11

Fields of interest: rare earth alloys and intermetallics,  
hydrides, nitrides, magnetic properties  
of materials, e-mail: sv\_veselova@mail.ru



**ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА СТРУКТУРУ И МАГНИТНЫЕ  
СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ  
(Sm, R)<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>, ГДЕ R = Ho, Er**

*С. В. Веселова, В. Н. Вербейский, И. С. Терёшина*

Московский государственный университет, Москва

Методом индукционной плавки в инертной атмосфере получены образцы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{R}_x)_2\text{Fe}_{17}$  ( $\text{R} = \text{Ho}, \text{Er}; x = 0,1; 0,2; 0,4$ ). Исследованы структура и магнитные гистерезисные свойства исходных соединений и гидридов на их основе. Установлено, что гидриды  $(\text{Sm}_{1-x}\text{R}_x)_2\text{Fe}_{17}\text{H}_y$  сохраняют ромбоэдрический  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  тип кристаллической структуры исходных соединений. Гидрирование приводит к увеличению температуры Кюри и намагниченности насыщения в области комнатной температуры.

В настоящее время сфера применения интерметаллических соединений  $4f$ -редкоземельных элементов с переходными металлами группы железа очень широка. В частности, интерметаллические соединения  $\text{R}_2\text{Fe}_{17}$

рассматриваются в качестве перспективных высокоэнергоемких материалов для постоянных магнитов [1]. Функциональные характеристики соединений  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$  претерпевают кардинальные изменения после внедрения легких атомов и/или замещение самария редкоземельным элементом, железа – немагнитными атомами в кристаллическую решетку исходного соединения, что способствует повышению температуры Кюри, возрастанию обменных взаимодействий между атомами железа и в некоторых случаях индуцирует одноосную магнитокристаллическую анизотропию во всей области температур магнитного упорядочения [2, 3]. На сегодняшний день несмотря на то, что для соединений  $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{H}_x$  выполнено достаточно большое количество работ по частичному замещению в обеих подрешетках, в литературе полностью отсутствует информация о структуре и магнитных свойствах гидридов на основе псевдобинарных соединений  $(\text{Sm}, \text{R})_2\text{Fe}_{17}$ , где  $\text{R} = \text{Ho}, \text{Er}$ .

Цель данной работы – изучение влияния водорода на структуру и магнитные свойства интерметаллических соединений  $(\text{Sm}_{1-x}\text{R}_x)_2\text{Fe}_{17}$  ( $\text{R} = \text{Ho}, \text{Er}; x = 0,1; 0,2; 0,4$ ).

Образцы  $(\text{Sm}_{1-x}\text{R}_x)_2\text{Fe}_{17}$  ( $\text{R} = \text{Ho}, \text{Er}; x = 0,1; 0,2; 0,4$ ) были приготовлены методом индукционной плавки из исходных компонентов высокой чистоты в инертной атмосфере. Гомогенизирующий отжиг проводили в кварцевых ампулах при 1273 К в течение 192 ч. Микроструктуру и химический состав материалов в литом состоянии и после высокотемпературного отжига исследовали на сканирующем электронном микроскопе «LEO EVO 50 XVP». Рентгенографическое исследование всех синтезированных образцов проводили на дифрактометре ДРОН-3М в монохроматизированном  $\text{CoK}\alpha$ -излучении. Фазовый состав образцов исследовался с помощью Ритвельд-анализа в программе RIETAN 2000. Гидрирование осуществляли прямой реакцией предварительно механически измельченных исходных сплавов с водородом при температуре 473 К и давлении водорода 30 МПа в течение 3–5 ч. Исследование магнитных свойств были выполнены с помощью измерительного комплекса PPMS-9 в широком диапазоне температур. Определение температуры Кюри проводили с помощью термомагнитного анализа в области температур 290–800 К.

По данным РФА и СЭМ, после проведения высокотемпературной гомогенизации в исходных образцах наряду с основной фазой  $2:17$  присутствовала фаза  $\alpha\text{-Fe}$  до 10 масс. %. Основная фаза  $(\text{Sm}, \text{R})_2\text{Fe}_{17}$  кристаллизуется в ромбоэдрической структуре типа  $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$  (пр. гр.  $\text{R}\bar{3}\text{m}$ ). В результате гидрирования были получены стабильные гидриды  $(\text{Sm}, \text{R})_2\text{Fe}_{17}\text{H}_y$  ( $4 \leq y \leq 4,6$ ), которые сохраняют тип структуры исходных образцов. Установлено, что при гидрировании увеличение объема кристаллической решетки гидридов составляет до 3,9 %, а также наблюдается анизотропное изменение параметров решетки. Внедрение атомов водорода в кристаллическую решетку соединений  $(\text{Sm}_{1-x}\text{R}_x)_2\text{Fe}_{17}$  оказывает влияние и на магнитные свойства: при их гидрировании удастся значительно повысить намагниченность насыщения и температуру магнитного упорядочения. Полученные новые магнитные материалы могут найти применение в различных области науки и техники.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Hirose S., Nishino M., Miyashita S. Adv. J. Nat. Sci.: Nanosci. Nanotechnol. 8 (2017) 013002.
2. Rama Rao K. V. S., Ehrenberg H., Markandeyulu G. et al. Phys J. Status Solidi A. 189 (2002) 373–388.
3. Isnard O., Miraglia S., Fruchart D., Magn J. Magn. Mat., 140–144 (1995) 981–982.

**EFFECT OF HYDROGEN ON THE STRUCTURE AND MAGNETIC  
PROPERTIES OF INTERMETALLIC COMPOUNDS  
(Sm, R)<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>, WHERE R = Ho, Er**

*S. V. Veselova, V. N. Verbetsky, I. S. Tereshina*

Lomonosov Moscow State University

Ingots (Sm<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub> (R = Ho, Er; x = 0.1; 0.2; 0.4) were obtained by induction melting in an inert atmosphere. The structure and magnetic hysteresis properties of the initial compounds and hydrides based on them have been studied. It has been established that (Sm<sub>1-x</sub>R<sub>x</sub>)<sub>2</sub>Fe<sub>17</sub>H<sub>y</sub> hydrides retain the rhombohedral Th<sub>2</sub>Zn<sub>17</sub> type of crystal structure of the initial compounds. Hydrogenation leads to an increase in the Curie temperature and saturation magnetization at room temperature.

**Шкандыбина Виктория Вениаминовна**

Студент

РХТУ им. Д. И. Менделеева

г. Москва, Миусская пл. д. 9

Материалы современной энергетики

**Shkandybina Victoria**

Student

MUCTR Moscow, Miusskaya sq., 9

Materials for modern energy

Shkandybina99@mail.ru



## **ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НАВОДОРОЖИВАНИЯ ТИТАНОВЫХ КОЛЛЕКТОРОВ ТОКА НА ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОЛИЗНОЙ ЯЧЕЙКИ С ТПЭ**

*В. В. Шкандыбина<sup>1,2</sup>, Р. М. Менишарапов<sup>1</sup>, М. В. Синяков<sup>1</sup>, Б. В. Иванов<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва;

<sup>2</sup>РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва

Электролиз воды в электролизерах с твердополимерным электролитом (ТПЭ) является безопасной, экологически нейтральной, эффективной технологией получения водорода с чистотой ~99,99 %, обеспечивающей высокие плотности тока и КПД, позволяет получать водород при давлении ~20 МПа [1]. Для производства электрохимически сжатого водорода применяют ассиметричную схему электролиза, которая избавляет от необходимости использования насоса (компрессора) для нагнетания воды в анодную область, обеспечивая в катодном пространстве получение сжатого водорода. В ассиметричных электролизерах с ТПЭ применяют титановые коллекторы тока, характеризующиеся достаточными электрофизическими (умеренное удельное сопротивление), механическими (жесткая структура спеченного металла с малым размером пор) и электрохимическими свойствами (устойчивость к коррозии) [2], что позволяет им выдерживать высокие перепады давления [3]. Однако титановые коллекторы подвержены водородному охрупчиванию, особенно в случае эксплуата-

ции при повышенном давлении в катодной области, что может приводить к снижению производительности электролизной установки [4].

В настоящей работе было исследовано влияние наводороживания титановых коллекторов на работу электролизной ячейки. Коллекторы представляли собой пластины круглой формы из спеченного титана марки ВТ1-0 пористостью  $30 \pm 3$  %. Образцы насыщали водородом из газовой фазы при нагревании в установке «АТЛАН». Активацию образцов проводили нагревом до  $550$  °С в вакууме ( $10^{-6}$  мбар) и удержанием при данной температуре в течение 40 мин. Концентрацию водорода в образцах определяли волюметрическим и массовым методом. Наводороженные образцы использовали в качестве катодного коллектора тока в составе мембранно-электродного блока с ТПЭ. Регистрацию вольтамперной характеристики (ВАХ) электролизной ячейки проводили с помощью цифрового мультиметра (MXD 4660 А, Китай) при силе тока в диапазоне 0,5–7 А.

В результате были получены ВАХи электролизной ячейки в зависимости от концентрации водорода в коллекторах в диапазоне от 10 до 50 ат. %. Была выявлена тенденция к увеличению напряжения ВАХ с ростом концентрации водорода. Характер данной зависимости является сложным, помимо концентрации водорода на ВАХ электролизной ячейки влияет деформация коллекторов и состояние их поверхности, которое изменялось в результате активации образцов, а также другие факторы. Отметим, что влияние различных факторов зачастую является разнонаправленным.

Работа выполнена при поддержке Российского науч. фонда в рамках проекта № 22-29-01367.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Григорьев С. А. и др. Электрохимия. Т. 37, № 8. С. 953–957, 2001.
2. Grigoriev S. A. et al. J. Hydrogen Energy. Vol. 34. P. 4968–4973, 2009.
3. Schalenbach M. et al. J. Hydrogen Energy. Vol. 38. Issue. 35. P. 14921–14933, 2013.
4. Briant C. L. et al. Corrosion Science. Vol.44. P.1875–1888, 2002.

## THE STUDY OF HYDROGENATION EFFECT OF TITANIUM CURRENT COLLECTORS ON THE CHARACTERISTICS OF THE ELECTROLYSIS CELL WITH PEM

V. V. Shkandybina<sup>1,2</sup>, R. M. Mensharapov<sup>1</sup>, M. V. Sinyakov<sup>1</sup>, B. V. Ivanov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow;

<sup>2</sup>MUCTR, Moscow

Proton exchange membrane (PEM) water electrolysis is a safe, environmentally neutral, effective technology, that allows to produce hydrogen with a purity of more than 99.99 %, providing high current densities and efficiency, as well as ensures the possibility of producing hydrogen at a pressure up to 20 MPa [1]. To produce electrochemically compressed hydrogen, electrolysis cell is operated at asymmetric pressure conditions, which eliminates usage of a compressor to pump water into the anode side, providing compressed hydrogen in the cathode side. Unbalanced pressure electrolyzers with PEM use porous titanium transport layer, which acts as current collectors. Such kind of collectors are characterized by sufficient electrophysical (moderate specific resistivity), mechanical (durable structure of sintered metal with small pore size) and electrochemical properties (high corrosion resistance) [2]. These properties make collectors being capable for enduring high pressure drops [3]. However, titanium collectors are susceptible to hydrogen embrittlement, especially under high pressure operating at the cathode side, which can decrease the performance of the electrolysis plant [4].

In this report the hydrogenation effect of titanium collectors of the electrolysis cell operation was investigated. The collectors were round plates made of sintered titanium VT1-0 with a porosity of  $30\pm 3$  %. The samples were saturated with hydrogen from the gas phase during heating in the ATLAN setup. Samples were activated by heating up to 550 °C in vacuum ( $10^{-6}$  mbar) and holding at this temperature for 40 min. The hydrogen concentration in the samples was determined by the volumetric and mass methods. Hydrogenated samples were installed as a cathode current collector in the PEM membrane electrode assembly. The current-voltage characteristic (CVC) of the electrolysis cell was registered with a digital multimeter (MXD 4660 A, China) at a current strength range of 0.5–7 A.

As a result, the CVC of the electrolysis cell and the electrical conductivity of titanium collectors were obtained depending on the hydrogen concentration in the range from 10 to 50 at. %. The nature of this dependence is complex. Ex-

cept for the hydrogen concentration, the CVC of the electrolysis cell is affected by the deformation of the collectors and the state of their surface, which changed because of the activation of the samples and also other factors. It should be noted that the influence of various factors is frequently multidirectional.

This work was supported by the Russian Science Foundation under project no. 22-29-01367.

#### REFERENCES

1. Grigoriev S. et al. *Electrochemistry*. Vol. 37. N 8. P. 953–957, 2001.
2. Grigoriev S. A. et al. *J. Hydrogen Energy*. Vol. 34. P. 4968–4973, 2009.
3. Schalenbach M. et al. *J. Hydrogen Energy*. Vol. 38. Issue 35. P. 14921–14933, 2013.
4. Briant C. L. et al. *Corrosion Science*. Vol. 44. P. 1875–1888, 2002.

**Синяков Матвей Владимирович**

Лаборант-исследователь  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Москва, пл. Академика Курчатова, 1  
Водородная энергетика, электрохимия

**Sinyakov Matvey**

Laboratory assistant-researcher  
NRC «Kurchatov Institute»  
Moscow, Russia  
Hydrogen energy, electrochemistry  
mmatveimatvei4@gmail.com



## СОЕДИНЕНИЯ ТИТАНА В КАЧЕСТВЕ АНТИКОРРОЗИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ ТВЕРДОПОЛИМЕРНЫХ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ

*М. В. Синяков<sup>1,3</sup>, А. А. Засыпкина<sup>1</sup>, Д. Д. Спасов<sup>1,2</sup>,  
Р. М. Менишарпов<sup>1</sup>, О. К. Алексеева<sup>1</sup>, Н. А. Иванова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>НИУ «МЭИ», Москва, Россия

<sup>3</sup>РХТУ им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

Одним из самых современных электрохимических устройств является обратимый топливный элемент (ОТЭ) с твердым полимерным электролитом (ТПЭ), в котором возможно реализовать два режима работы: производство водорода (электролизер) и генерация энергии (топливный элемент). В электролизерах на кислородном электроде на поверхности ГДС образуются оксидные пленки, которые снижают производительность электрохимического устройства, а на водородном происходит наводороживание ГДС, что приводит к охрупчиванию материала электрода [1]. Чтобы повысить срок эксплуатации и коррозионную стойкость данного элемента устройства наносят специальные защитные покрытия на поверхность ГДС, в том числе методом магнетронного распыления (МР) [2]. Ранее было исследовано влияние различных режимов МР на морфологию и состав получаемых покрытий [3].

В данной работе исследовалось влияние антикоррозионных титановых покрытий на рабочие характеристики электродов электрохимических устройств, в качестве которых использовались газодиффузионные слои, а именно, углеродная ткань российского производства. Покрытия были получены с использованием различных режимов и условий МР, указанных в таблице. Варьирование условий МР позволило получить соединения титана с разнообразным составом, что было определено посредством рентгеноструктурного фазового анализа и энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Для определения рабочих характеристик обратимого топливного элемента был собран и испытан мембранно-электродный блок (МЭБ).

Защитные покрытия на основе титана, полученные методом МР, позволяют повысить коррозионную стойкость ГДС и увеличить ресурс работы электрохимического устройства с ТПЭ в целом.

#### Образцы ГДС и условия напыления

№	Предварительная обработка		Время, мин	P <sub>раб</sub> , Па	T, °C	Состав газовой смеси	Режимы напыления
	P, Па	T, °C					
I	$1,04 \cdot 10^{-2}$	120	30	0,93	32–77	Ar	Постоянный ток
II	$1,04 \cdot 10^{-2}$	120	30	0,93	28–79	Ar	Импульсный ток 100 кГц, 7–3 мкс
III	$4,4 \cdot 10^{-2}$	123	30	0,93	34–102	Ar + O <sub>2</sub>	Постоянный ток, Смещение –200 В, 10 кГц, 90/10 мкс
IV	$7,8 \cdot 10^{-5}$	124	30	0,93	120	Ar + C	Постоянный ток

Работа поддержана грантом Президента Российской Федерации МК–4120.2022.1.3.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Grigoriev S. A. et al. Int. J. Hydrogen Energy. 4968–4973 (2009) 34.
2. Fang S. Y. et al. Int. J. Hydrogen Energy. 21177–21184 (2014) 39.
3. Засыпкина А. А. и др. ЛаПлаз. (2022).

## TITANIUM COMPOUNDS AS CORROSION-RESISTANT COATINGS FOR ELECTRODES OF SOLID POLYMER ELECTROCHEMICAL DEVICES

*M. V. Sinyakov<sup>1,3</sup>, A. A. Zasypkina<sup>1</sup>, D. D. Spasov<sup>1,2</sup>, R. M. Mensharapov<sup>1</sup>, O. K. Alekseeva<sup>1</sup>, N. A. Ivanova<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRU «MPEI», Moscow, Russia

<sup>3</sup>MUCTR, Moscow, Russia

One of the most modern electrochemical devices is a reversible fuel cell (RFC) with a solid polymer electrolyte (SPE), in which is implements two modes of operation: hydrogen production (electrolyzer) and energy generation (fuel cell). In electrolyzers on the hydrogen electrode the GDL is saturated by H<sub>2</sub>, which leads to embrittlement of the component [1]. To increase the service life and corrosion resistance of the electrode, special protective coatings apply to the surface of the GDL by magnetron sputtering (MS) [2]. Previously, the influence of various MS modes on the morphology and composition of the obtained coatings was investigated [3].

In this work, the influence of titanium coatings on the performance of electrodes of electrochemical devices, which were used as gas diffusion layers, namely, Russian-made carbon cloth, was studied. Varying the MR conditions used to obtain titanium compounds (with C, N, O) with various compositions, which was determined by X-ray diffraction phase analysis and energy-dispersive X-ray microanalysis. To determine the performance characteristics of a reversible fuel cell, a membrane electrode assembly (MEA) was assembled and tested both as part of an electrolyzer and in the fuel cell mode.

Titanium-based protective coatings obtained by the MS method allows to increase the corrosion resistance of the GDL and increase the service life of the electrochemical device with SPE.

This work supported by a grant from the President of the Russian Federation MK-4120.2022.1.3.

### REFERENCES

1. Grigoriev S. A. et al. *Int. J. Hydrogen Energy*. 4968–4973 (2009) 34.
2. Fang S. Y. et al. *Int. J. Hydrogen Energy*. 21177–21184 (2014) 39.
3. Zasypkina A. A. et al. *LapLas*. (2022).

**Секция 4**

**B13–B19, C26–C38**

**АППАРАТУРА И МЕТОДЫ  
ИССЛЕДОВАНИЯ**

**Session 4**

**EQUIPMENT AND RESEARCH  
METHODS**

**Лившиц Александр Иосифович**

Профессор кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А.Бонч-Бруевича  
193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22,  
Фундаментальные исследования в области  
физико-химии поверхности и разработки  
в области водородо-мембранных технологий

**Livshits Alexander**

Professor at department of physics  
The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State  
University of Telecommunications  
193232, St. Petersburg, Bol'shevikov, 22  
Fundamental studies in the surface science and R&D on  
the field of hydrogen-membrane technology  
livshits@sut.ru

**МЕМБРАННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ТЕРМОЯДЕРНОЙ  
И ВОДОРОДНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**

*А. И. Лившиц*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Водород – основа будущей энергетики. Изотопы водорода (D и T) – топливо для глобальной термоядерной энергетики. В то же время водород – экологически чистый энергоноситель и топливо для прямого преобразования химической энергии в электричество с помощью топливных элементов, и это – основа для взрывного развития водородной энергетики и водородной экономики. Мембранные технологии могут играть важную роль в развитии обоих направлений.

Одной из критических проблем в топливном цикле термоядерных реакторов (ТЯР) отделение D/T-топлива от продукта ядерной реакции – гелия. Эта задача может быть решена с помощью металлических мембран, сверхпроницаемых по отношению к энергетическим водородным части-

цам и непроницаемым ни для каких других компонент газовой смеси, включая He. Сверхпроницаемые мембраны (СПМ) способны автоматически сжимать проникающий водород на порядки величины. СПМ могут быть установлены непосредственно в выхлопной системе ТЯР (сразу за дивертором) и осуществлять короткоцикловое (минуя тритиевый завод) отделение D/T смеси от He и других примесей и автоматическое возвращение D/T-топлива обратно реактор. Материалом СПМ являются металлы 5-ой группы (V, Nb Ta) при том, что в условиях ТЯР наиболее подходящими являются ванадий и его ОЦК сплавы.

Важнейшим источником водорода для водородной энергетики остается природный газ, Благодаря нулевому углеродному следу, перспективным становится также биотопливо. Мембранные методы позволяют не только выделить сверхчистый водород из продуктов конверсии углеводородных топлив, но и естественным образом разделить потоки  $H_2$  и  $CO_2$  (с целью недопущения попадания  $CO_2$  в атмосферу). Одним из перспективных направлений здесь является разработка непалладиевых мембран, а именно, мембран из металлов 5-ой группы и их сплавов. Транскристаллический перенос водорода в этих материалах происходит существенно быстрее, чем в палладии (на порядок и более), а селективность пропускания водорода – идеальна (как и в случае палладиевых мембран). Уже созданы трубчатые мембраны из ОЦК сплавов ванадия а также сборки таких мембран на требуемую производительность. Такие сборки испытаны в составе топливного процессора, производящего сверхчистый водород путем паровой конверсии метана для генерации электричества с помощью низкотемпературного топливного элемента.

## MEMBRANE TECHNOLOGIES FOR THE NUCLEAR FUSION AND HYDROGEN ENERGY

*A. I. Livshits*

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

Hydrogen is the base of future energy. The hydrogen isotopes (D and T) are the fuel for the global nuclear fusion energy. At the same time, hydrogen is an environmentally friendly energy carrier and fuel for the direct conversion of chemical energy into electricity using fuel cells, and this is the basis for the explosive development of hydrogen energy and the hydrogen economy. Mem-

brane technologies can play an important role in the development of both directions.

One of the critical problems in the fuel cycle of nuclear fusion reactors (NFR) is the separation of D/T fuel from the nuclear reaction product, helium. This problem can be solved using metal membranes that are superpermeable to energetic hydrogen particles and impermeable to any other components of the gas mixture, including He. Superpermeable membranes (SPM) are capable of automatically compressing permeable hydrogen by orders of magnitude. SPM can be installed directly in the NFR exhaust system immediately after the diverter) to carry out the short-way (bypassing the tritium plant) separation of the D/T mixture from He and the automatic return of the D/T fuel back to the reactor. The SPMs are made of group 5 metals (V, Nb Ta), while vanadium and its bcc alloys are the most suitable under NFR conditions.

Natural gas remains the most important source of hydrogen for hydrogen energy. Due to its zero carbon footprint, biofuels are also becoming promising. Membrane methods allow not only separating ultrapure hydrogen from hydrocarbon fuel conversion products, but also naturally separating H<sub>2</sub> and CO<sub>2</sub> flows (in order to prevent CO<sub>2</sub> from entering the atmosphere). One of the promising directions here is the development of non-palladium membranes, namely, membranes made of Group 5 metals and their alloys. The transcristalline hydrogen transfer in these materials occurs much faster than in palladium (by an order of magnitude or even more), and their hydrogen selectivity is ideal (as in the case of palladium). Tubular membranes from bcc vanadium alloys have already been created, as well as the assembly of such membranes for the required performance. Such assemblies have been tested in as a part of fuel processor that produces ultrapure hydrogen by steam reforming of methane to generate electricity using a low-temperature fuel cell.

**Максимкин Игорь Петрович**

Начальник отдела  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
Нижегородская область, город Саров  
Водород, конструкционные материалы,  
высокое давление

**Maksimkin Igor**

Head of department  
RFNC-VNIIEF  
Sarov, Nizhny Novgorod region  
Hydrogen, structural materials, high pressure  
arkad@trititn.vniief.ru



## **ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ ТРИТИЕВЫХ СИСТЕМ НА ПРИМЕРЕ ТРИТИЕВОЙ ИНФРАСТРУКТУРЫ ФРАГМЕНТ-СЕПАРАТОРА АКУЛИНА-2**

*И. П. Максимкин*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)  
607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл., проспект Мира, 37

В лекции рассмотрены основные подходы к созданию тритиевых систем на примере разработанной ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» тритиевой инфраструктуры для фрагмент-сепаратора АКУЛИНА-2. Она включает в себя комплекс, позволяющий работать с тритием в количестве 2,7 кКи, и семейство тритиевых мишеней для проведения соответствующих экспериментальных исследований.

Составные части тритиевой инфраструктуры располагаются в специальном помещении, предназначенном для работы с тритием по II классу работ с открытыми источниками излучений. Представлено описание данной инфраструктуры, основные принципы организации работ на ней, а также конструктивные особенности газовых и жидкотритиевых мишеней.

Наличие данной инфраструктуры делает возможным проведение широкого класса исследований экзотических ядер, таких как  ${}^6,7\text{H}$ ,  ${}^7\text{He}$ ,  ${}^{10}\text{He}$ ,  ${}^{13}\text{Li}$ ,  ${}^{16}\text{Be}$ ,  ${}^{19-21}\text{C}$ ,  ${}^{24,26}\text{O}$  и др., образующихся в прямых ядерных реакциях (t, p) и (t, d).

## **APPROACHES FOR DEVELOPMENT OF TRITIUM SYSTEMS BY THE EXAMPLE OF TRITIUM INFRASTRUCTURE FOR THE AKULINA-2 FRAGMENT SEPARATOR**

*I. P. Maksimkin*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»),  
Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia

The work considers the approaches for development of tritium systems by example of tritium infrastructure for the AKULINA-2 fragment separator, developed in RFNC-VNIIEF. It includes a complex that allows you to work with tritium in the amount of 2.7 kCi, and a family of tritium targets for conducting relevant experimental studies.

Components of the tritium infrastructure are located in a special room designed to work with tritium on II class of work with open sources of radiation. The report provides a description of this infrastructure, the main principles of organization of works on this infrastructure, as well as structural features of gas and liquid-tritium targets.

The availability of this infrastructure makes it possible to conduct a wide class of studies of exotic nuclei, such as  ${}^6,7\text{H}$ ,  ${}^7\text{He}$ ,  ${}^{10}\text{He}$ ,  ${}^{13}\text{Li}$ ,  ${}^{16}\text{Be}$ ,  ${}^{19-21}\text{C}$ ,  ${}^{24,26}\text{O}$  et al., formed in direct nuclear reactions (t, p) and (t, d).

**Варежкин Александр Владимирович**

Доцент

Российский химико-технологический  
университет им. Д. И. Менделеева

Миусская площадь, д. 9

Мембранные технологии,  
высокочистые вещества

**Varezhkin Alexander**

Assistant professor

Mendeleev University of Chemical Technology

Membrane technology, Highly pure substances

ale-varezhkin@yandex.ru



## **ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МЕМБРАННОЙ ТЕХНОЛОГИИ ДЛЯ ИЗВЛЕЧЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ГАЗОВЫХ СМЕСЕЙ**

*А. В. Варежкин*

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева

Разделение газов стало основным промышленным применением мембранной технологии только в последние 40 с небольшим лет. Практически все современное промышленное газоразделение основано на плотной полимерной мембране, и в этом случае разделение и проницаемость зависят от подвижности отдельных молекул в материале мембраны и коэффициента сорбции газа. Обычно в качестве мембранного материала используются стеклообразные полимеры из-за их способности различать размер молекул. Мерой способности мембраны разделять два газа является отношение их проницаемостей, называемое селективностью мембраны.

Водород – это небольшой неконденсирующийся газ, обладающий высокой проницаемостью по сравнению со всеми другими газами. В зависимости от материала полимерной мембраны типичная селективность по водороду для большинства газов достигает 200 при удельном потоке водорода через мембрану  $250\text{--}350 \text{ дм}^3(\text{н. у.})/(\text{м}^2 \cdot \text{час} \cdot \text{атм})$ . По этой причине именно выделение водорода было первым разработанным процессом га-

зоразделения. Первым крупномасштабным коммерческим применением мембран было отделение водорода от азота в потоках продувочного газа аммиака. Процесс протекает при давлении 13,5 МПа и перепаде давления на мембране 10,4 МПа. Другим примером использования мембран в нефтехимической промышленности является выделение водорода из смесей с монооксидом углерода. В этих процессах водород концентрируется до уровня 90–99 %.

Мембраны для разделения газов формируются в виде спиральных или половолоконных модулей. Важное преимущество половолоконных мембран – возможность формирования высокой плотности упаковки поверхности мембраны. Диаметр полых волокон варьируется в широких пределах от 50 до 400 мкм.

Хотя полимерные мембраны используются почти во всех промышленных процессах разделения газов, существует интерес к металлическим мембранам, в основном для применения в высокотемпературных мембранных реакторах. Мембраны из Pd и Pd-сплава чрезвычайно селективны, они проницаемы для водорода, но практически непроницаемы для всех других газов. Проницаемость таких мембран по водороду, обычно, в 10–100 раз выше, чем у полимерных мембран. Водород также проникает в ряд других металлов, включая Ta, Nb, Va, Ni, Fe, Cu, Co и Pt. Однако в большинстве случаев металлические мембраны должны эксплуатироваться при температурах выше 300°C, чтобы получить приемлемую проницаемость и предотвратить водородное охрупчивание металла. Несмотря на исключительную проницаемость и селективность, металлические мембраны нашли очень ограниченное промышленное применение, в основном для производства сверхчистого водорода (99,9 %) для электронной промышленности и в качестве исходного газа для топливных элементов.

## **APPLICATION OF MEMBRANE TECHNOLOGY TO EXTRACT HYDROGEN FROM PROCESS GAS MIXTURES**

*A. V. Varezhkin*

Mendeleev University of Chemical Technology

Gas separation only became a major industrial application of membrane technology in the past 40 years with a little. Almost all current commercial gas separations are based on the dense polymer membrane and in this case permea-

bility depends on mobility of the individual molecules in the membrane material and the gas sorption coefficient. In general, glassy polymers are used as membrane material because of their ability to distinguish the size of molecules. A measure of the ability of a membrane to separate two gases is the ratio of their permeabilities, called the membrane selectivity.

Hydrogen is a small, noncondensable gas, which is highly permeable compared to all other gases. Depending on the polymeric membrane material, the typical hydrogen selectivity for most gases is in the range of 50–200 at a specific hydrogen flux through the membrane of 250–350 dm<sup>3</sup> (STP)/(m<sup>2</sup>·hour·atm). For this reason, it was the separation of hydrogen that was the first developed gas separation process. The first large-scale commercial application of membranes was the separation of hydrogen from nitrogen in ammonia purge gas streams. The process proceeds under a pressure of 13.5 MPa and a pressure drop across the membrane of 10.4 MPa. Another example of the use of highly hydrogen-selective membranes in the petrochemical industry is the separation of hydrogen from carbon monoxide/hydrogen mixtures. In these processes, hydrogen is concentrated to the level of 90–99 %.

Gas separation membranes are formed into spiral-wound or hollow fiber modules. An advantage of hollow fiber membranes is that compact modules with high membrane surface areas can be formed. The diameter of hollow fibers varies for gas separation from 50 to 400 μm.

Although almost all industrial gas separation processes use polymeric membranes, there is interest in metal membranes, mostly for the high-temperature membrane reactor applications. Pd and Pd alloy membranes are extraordinarily selective, being permeable to hydrogen, but essentially impermeable to all other gases. Hydrogen permeability are extremely high, usually 10–100 times higher in comparison with polymeric membranes. Hydrogen also permeates a number of other metals including Ta, Nb, Va, Ni, Fe, Cu, Co, and Pt. However, in most cases, metal membranes must be operated at high temperatures (>300°C) to obtain useful permeation rates and to prevent embrittlement and cracking of the metal by sorbed hydrogen. Despite their extraordinary permeation and selectivity properties, metal membranes have found very limited industrial application mostly for to generate ultrapure hydrogen 99.9 % for the electronics industry and as feed gas to fuel cells.

**Ананьев Сергей Станиславович**  
Ведущий научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт»  
123182, пл. Ак. Курчатова, 1  
Термоядерный синтез, физика плазмы,  
изотопы водорода

**Ananyev Sergey**  
Leading Researcher  
NRC Kurchatov institute  
Ac. Kurchatov sq., 1, Moscow RU, 123182  
Fusion, plasma physic, hydrogen isotopes  
Ananyev\_SS@nrcki.ru



## ПРОГРАММА РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИЙ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ГССД В РФ

*С. С. Ананьев<sup>1</sup>, Б. В. Иванов<sup>1</sup>, Б. В. Кутеев<sup>1,2</sup>, А. А. Юхимчук<sup>3</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва

<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва

<sup>3</sup>ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», Саров

Один из сценариев развития атомной энергетики в РФ связан с открытым уран-ториевым ( $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th}$ ) топливным циклом. Этот сценарий также рассматривался с самого начала развития атомной энергетики, но его практическая реализация сдерживалась отсутствием внешних источников нейтронов, так как нейтронов недостаточно для получения  $^{233}\text{U}$  в уран-плутониевом цикле. Если функции такого источника будет выполнять источник термоядерных нейтронов (ТИН), то такая концепция получит неоспоримое преимущество. В этом сценарии развитие атомной энергетики будет сопровождаться созданием реакторов на тепловых нейтронах (ТР) [1].

Основное преимущество такого подхода заключается в том, что нет необходимости разделять отработанное ядерное топливо (ОЯТ) для извлечения топливных нуклидов – отработавшие твэлы будут извлекаться из активной зоны реактора и отправляться на длительное хранение. В уран-

ториевом цикле также необходимо проводить химическую обработку для выделения  $^{233}\text{U}$  из сырьевого нуклида. Ввиду значительно меньшей активности содержащегося бланкета гибридного термоядерного реактора (ГТР) такая переработка может сопровождаться значительно меньшими потерями радиоактивных материалов – за счет полного отсутствия минорных актинидов и незначительной доли продуктов деления по сравнению с ОЯТ по отношению к быстрым реакторам. Ввиду того, что запасы Th значительно превышают запасы природного U, такая концепция обеспечит более длительное развитие ядерной энергетики.

Производство трития ( $^3\text{H}$ ) в качестве топлива ТИН может быть обеспечено в тепловых реакторах, где изотоп  $^6\text{Li}$  будет использоваться в качестве выгорающего поглотителя. При оптимизации активной зоны ГР можно обеспечить производство достаточного количества трития для замыкания топливного цикла тандема ГР+ГТР по термоядерному топливу.

Разработка ТИН активно обсуждается в НИЦ «Курчатовский институт» уже более 10 лет. Проведенные НИОКР были связаны с техническим проектированием ТИН и интенсификацией генерации нейтронов в ГТР для трансмутации и воспроизводства нуклидов. Следует отметить, что рассматривались также возможности воспроизводства трития в ГТР для стартовой загрузки будущих термоядерных реакторов.

Современное видение стратегии развития ГТР, в том числе отраженные в федеральном проекте «Развитие термоядерных и инновационных плазменных технологий» (который входит в состав комплексной программы Госкорпорации «Росатом» «Развитие техники, технологий и научных исследований в области использования атомной энергии в Российской Федерации на период до 2030 г») предусматривает возможность реализации промышленных ГТР к 2050 г [2].

«Курчатовский институт» планирует провести широкомасштабные прикладные исследования в рамках этого федерального проекта. Ранее был выполнен концептуальный проект топливного цикла ТИН. Была выбрана и подробно описана схема топливного цикла ТИН, проанализированы отличия от термоядерного реактора [3, 4]. Расчеты потоков изотопов водорода в системах установки проводились для выбранной конструкции топливных систем на основании ранее полученных результатов. Выбраны технологии-кандидаты для работы с тритием и разработан комплекс инъекции нейтральных пучков (NBI). В задачи текущего периода входит обоснование DT-топливного цикла и выбор технологий гибридного бланкета, а также технический проект компактного ТИН (ТИН-К) и гибридной реакторной установки (ГТУ) для отработки стационарных технологий,

материалов и компоненты [2]. Своевременное обеспечение специализированными испытательными стендами и квалифицированным персоналом позволит эффективно реализовать проект строительства ГТР коммерчески интересной тепловой мощности.

Макетная установка тритиево-дейтериевого ТЦ должна быть спроектирована, разработана и введена в эксплуатацию для проведения исследований, направленных на определение и уточнение параметров работы системы, производительности, количества трития на площадке и других характеристик систем ТЦ для проектов ДЕМО-ТИН и ТИН-СТ как основу для проектирования ТИН-К и ГРУ. Планируется обосновать безопасность технологических систем и обучить персонал эксплуатации этих систем с запасом трития на площадке объекта до 1 кг. На более поздних этапах должны быть разработаны технические проекты систем ТЦ для ТИН-К и ГРУ, изготовлены макеты и проведена их совместная эксплуатация в соответствии с программой НИР. Будут проведены исследования и выбор оптимальных технологий воспроизводства и извлечения трития из бланкета, совершенствование и оптимизация конкретных технологий ТЦ, обоснование радиационной безопасности ТЦ-установки.

Описанию всех этапов составленной дорожной карты и промежуточных результатов проводимой работы посвящен данный доклад.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (грант № 18-72-10162).

## ЛИТЕРАТУРА

1. Velikhov E. P. et al. Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion. Vol 40. N 4.
2. Kuteev B. V., Goncharov P. R. Fusion Sci. Technol. Vol.76. 2020. P. 836–847.
3. Ananyev S. S., Ivanov B. V., Kuteev B. V. – Fusion Eng. Des. 2020. Vol. 161. P. 111940.
4. Ananyev S. S., Ivanov B. V. et al. Nucl. Fusion 61. 2021. 116062. P. 11.

## TECHNOLOGIES DEVELOPMENT PROGRAM OF THE FFHS FUSION FUEL CYCLE IN RF

S. S. Ananyev<sup>1</sup>, B. V. Ivanov<sup>1</sup>, B. V. Kutev<sup>1,2</sup>, A. A. Yukhimchuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow

<sup>2</sup>NRNU MEPhI, Moscow

<sup>3</sup>RFNC-VNIIEF, Sarov

One of the scenarios for the nuclear power development in the Russian Federation is associated with an open uranium-thorium ( $^{233}\text{U} - ^{232}\text{Th}$ ) fuel cycle. This scenario was also considered from the beginning of the nuclear energy development, but its practical implementation was hampered by the absence of external neutron sources, since there are not enough neutrons to produce  $^{233}\text{U}$  within the uranium-plutonium cycle. If the functions of such source are performed by the fusion neutron source (FST), then such a concept will receive an undeniable advantage. In this scenario, the development of nuclear energy will be accompanied by the creation of reactors with thermal neutrons (TR) [1].

The main advantage of this approach is that there is no need to separate the spent nuclear fuel (SNF) for fuel nuclides extraction – spent fuel elements will be removed from the reactor core and sent for long-term storage. In the uranium-thorium cycle, chemical processing must also be carried out to separate  $^{233}\text{U}$  from the raw nuclide. Due to the significantly lower activity of the fusion-fission hybrid system (FFHS) blanket contents, such reprocessing can be accompanied by significantly lower losses of radioactive materials – due to the complete absence of minor actinides and an insignificant fraction of fission products compared to SNF from fast reactors. In view of the fact that the Th reserves are much greater than the reserves of natural U, such a concept will ensure a longer development of nuclear energy.

The tritium ( $^3\text{H}$ ) production as a FNS fuel can be provided in thermal reactors, where the  $^6\text{Li}$  isotope will be used as a burnable absorber. When optimizing the TR core, it is possible to ensure the production of a sufficient tritium amount to close the TR+FNS tandem fuel cycle for fusion fuel.

The development of the FFHS is being actively discussed at the «Kurchatov Institute» for over 10 years. These R&D work was associated with fusion neutron source technical design and neutrons generation optimization in FFHS and the use of these neutrons for nuclide transmutation and breeding. It should be noticed that the tritium breeding in FFHSs for start-up loading of future thermonuclear power plants opportunities were considered also.

Current views including those reflected in the Federal project «Development of Fusion and Innovative Plasma Technologies» (which is a part of the comprehensive program of the State Corporation Rosatom «Development of engineering, technology and scientific research in the field of using atomic energy in the Russian Federation for the time period up to 2030») foresee the feasibility of industrial FFHSs by 2050 [2].

The Kurchatov Institute is planning to carry out a broad applied research within the framework of this federal project. Previously, the conceptual design of the FNS fuel cycle was carried out. The fuel cycle design for FNS was selected and described in detail, and the differences from fusion reactor were analyzed [3, 4]. Calculations of hydrogen isotope fluxes in the facility systems was carried out for the chosen fuel systems design, based on the previous results obtained. Candidate technologies for operation with tritium are selected, and a complex for neutral beams injection (NBI) was developed. The current period tasks include substantiation of the DT-fuel cycle and the choice of hybrid blanket technologies, as well as the engineering design of the FNS-C compact fusion neutron source and hybrid reactor facility (HRF) for testing the steady state technologies, materials and components [2]. Timely provision of specialized test benches and qualified personnel will make it possible to implement efficiently the project for the construction of a HRF with commercially interesting thermal power.

A mockup facility of the tritium-deuterium fuel cycle (FC) should be designed, developed and put into operation for research aimed at determining and clarifying the system operational parameters, productivity, amount of tritium at the site and other characteristics of the FC systems supporting the DEMO-FNS and FNS-ST projects as the basis for the design of FNS-C and HRF. It is planned to justify the safety of the technological systems and to train personnel for the operation of these systems with the tritium inventory at the facility site up to 1 kg. At later stages, the engineering projects of the FC systems for FNS-C and HRF should be developed, the mock-ups produced, and their joint operation carried out in accordance with the research program. Research and selection of the optimal technologies for tritium breeding and extraction in blankets, improvement and optimization of specific fuel cycle technologies, justification of the radiation safety of the FC-facility will be done.

This report is devoted to a description of the roadmap's all stages and intermediate results of the work being carried out.

This work was partially supported by the Russian Science Foundation (grant № 18-72-10162).

## REFERENCES

1. Velikhov E. P. et al. Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion. Vol 40. N 4.
2. Kuteev B. V., Goncharov P. R. Fusion Sci. Technol. Vol.76. 2020. P. 836–847.
3. Ananyev S. S., Ivanov B. V., Kuteev B. V. – Fusion Eng. Des. 2020. Vol. 161. P. 111940.
4. Ananyev S. S., Ivanov B. V. et al. Nucl. Fusion 61, 2021, 116062. P. 11.

**Розенкевич Михаил Борисович**

Профессор

Российский химико-технологический университет

им. Д. И. Менделеева

Москва, 125047, Миусская площадь, 9

Область научных интересов: физико-химические  
методы разделения изотопов легких элементов**Rozenkevich Mikhail**

Professor

Mendeleev University of Chemical Technology  
of Russia

9 Miusskaya Sq., Moscow, 125047, Russia

Field of scientific interest: separation  
of light element isotopes by physico-chemical methods  
rozenkev@mail.ru**МЕТОДЫ ДЕТРИТИЗАЦИИ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ И СБРОСНЫХ  
ГАЗОВЫХ ПОТОКОВ РАБОЧИХ ПОМЕЩЕНИЙ  
ЯДЕРНЫХ ОБЪЕКТОВ***М. Б. Розенкевич, А. Н. Букин, С. А. Марунич,  
Ю. С. Пак, А. Н. Перевезенцев*Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,  
Москва, Россия

До недавнего времени на объектах атомной отрасли России проблема очистки от трития выбросов в окружающую среду не всегда решалась. Это является одной из причин того, что допустимая к сбросу в окружающую среду концентрация трития в воде в России в соответствии НРБ-99/2009 примерно на порядок величины больше, чем в США (7600 Бк/кг против 740 Бк/кг), и более чем в 75 раз выше, чем в странах Евросоюза (100 Бк/кг). В настоящее время, однако, в связи с ужесточением экологического законодательства решение задачи детритизации сбросов переходит в ряде случаев в список первоочередных.

Тритий в газовых потоках может находиться в различных химических формах: водорода, органических соединений, воды. В соответствии с этим и методы очистки могут использоваться различные. Например, для очистки инертных газов от трития в форме водорода могут использоваться геттеры водорода или палладиевые мембраны. Однако эти методы не всегда позволяют достигнуть требуемой степени детритизации в силу термодинамических или кинетических причин. Поэтому наиболее распространенным методом детритизации газовых потоков является предварительное окисление водорода и органических соединений до воды с последующими осушкой газа тем или иным методом или его изотопным обменом с водой, не содержащей трития.

В настоящем докладе детально анализируются все используемые технологии детритизации как технологических, так и сбросных в окружающую среду газовых потоков. Эти задачи различаются как по масштабу величины потоков, так и по требуемой степени детритизации. Как правило, величина технологических газовых потоков, циркулирующих в горячих камерах или боксах, существенно меньше вентиляционных, а степень их детритизации определяется только требованиями поддержания концентрации трития в рабочей камере, не превышающей заданную. В свою очередь величина потоков вентиляционных сбросов может достигать нескольких тысяч м<sup>3</sup>/ч, а значения степени детритизации – значений 10<sup>6</sup>–10<sup>8</sup>. В зависимости от заданных параметров очистки – величин потоков и требуемой степени детритизации – в докладе рассматриваются реализованные на практике или проектируемые системы детритизации в России и за рубежом.

## METHODS OF DETRITIATION OF TECHNOLOGICAL AND WASTE GAS FLOWS OF WORKING ROOMS OF NUCLEAR INDUSTRY

*M. B. Rozenkevich, A. N. Bukin, S. A. Marunich,  
Yu. S. Pak, A. N. Perevezentsev*

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow (Russia)

Until recently, the problem of removing tritium from gas emissions into the environment at the facilities of the nuclear industry in Russia was not always solved. This is one of the reasons why the concentration of tritium in water allowed for discharge into the environment in Russia in accordance with

NRB-99/2009 is approximately an order of magnitude higher than in the United States (7600 Bq/kg versus 740 Bq/kg), and more than 75 times higher than in EU countries (100 Bq/kg). At present, however, in connection with the tightening of environmental legislation, the solution of the problem of detritiation of discharges is in some cases on the list of priorities.

Tritium in gas flows can be in various chemical forms: hydrogen, organic compounds, water. In accordance with this, various cleaning methods can be used. For example, hydrogen getters or palladium membranes can be used to remove tritium in the form of hydrogen from inert gases. However, these methods do not always make it possible to achieve the required degree of detritiation due to thermodynamic or kinetic reasons. Therefore, the most common method of detritiation of gas streams is the preliminary oxidation of hydrogen and organic compounds to water, followed by gas drying by one or another methods or its isotope exchange with tritium-free water.

This report analyzes in detail all the technologies used for detritiation of both technological and gas streams discharged into the environment. These tasks differ both in terms of the magnitude of the flows and the required degree of detritiation. As a rule, the value of technological gas flows circulating in hot chambers or boxes is significantly less than the ventilation ones, and the degree of their detritiation is determined only by the requirements to maintain the tritium concentration in the working chamber not exceeding the specified one. In turn, the value of ventilation discharge flows can reach several thousand m<sup>3</sup>/h, and the values of the degree of detritiation can reach values of 10<sup>6</sup>–10<sup>8</sup>. Depending on the specified treatment parameters – the flow rates and the required degree of detritiation – the report discusses the detritiation systems implemented in practice or designed in Russia and abroad.

**Воронина Татьяна Викторовна**

Старший научный сотрудник, начальник  
лаборатории производственного химического режима  
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ»  
188300, Ленинградская область, г. Гатчина,  
Орлова Роща, д. 1  
Химия тяжелой воды, химический контроль  
теплоносителей

**Voronina Tatiana**

Senior Researcher, Head of the Laboratory  
of Operational Chemical Regime  
NRC «Kurchatov Institute» – PNPI  
188300, Gatchina, Leningrad region, Russia  
Heavy water chemistry, chemical control  
of reactor coolants  
voronina\_tv@npni.nrcki.ru

**АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА ПРОБООТБОРА  
И АНАЛИЗА ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ НА РЕАКТОРЕ ПИК**

*Т. В. Воронина, А. А. Каверзина, М. Ю. Климов*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ», РФ

В настоящее время наиболее частой причиной unplanned остановок (до 80 %) и снижения уровня мощности ядерных установок (далее ЯУ) является коррозионное повреждение оборудования, обусловленное погрешностями в поддержании водно-химического режима (далее ВХР) их основных контуров. Поэтому вопросы взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами для химиков ЯУ в первую очередь сводятся к вопросам коррозии реакторного оборудования. Одним из наиболее эффективных способов предотвращения коррозионных повреждений является совершенствование ВХР.

В настоящее время в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ вводится в эксплуатацию высокопоточный тяжеловодный исследовательский реактор ПИК. Коррозионная активность его легководных и тяжеловодных теплоносителей в основном определяется показателем рН и концентраци-

ей примесей. Важной составляющей поддержания ВХР является грамотный химический контроль.

При эксплуатации тяжеловодных ЯУ значительная часть (до 40 %) дозовой нагрузки на персонал реактора обусловлена тритием. Все работы с тяжелой водой ( $D_2O$ ), включая химический контроль, являются радиационно-опасными. Кроме того,  $D_2O$  – это специальный неядерный материал, который нельзя сливать в спецканализацию, а необходимо возвращать после измерений обратно в контур ТВО. В связи с этим актуальной задачей на реакторе ПИК стала организация системы пробоподготовки и анализа тяжелой воды (АСПА ТВ [1]). В состав АСПА ТВ для контроля химического состава  $D_2O$  включены отечественные проточные анализаторы. Для контроля изотопного состава  $D_2O$  специалисты ПИЯФ предложили использовать ИК фурье-спектрометр Matrix-F (измерение дейтерия) и радиометр Wilma (измерение трития). В 2016 – 2017 гг. оборудование было закуплено, в 2017 – 2019 гг. анализаторы прошли градуировку в лабораторных условиях. В 2020 г АСПА ТВ была смонтирована. В 2021 – 2022 гг. выполняются работы по пуско-наладке системы. Планируемый срок ввода системы в эксплуатацию – 2023 г.

Использование такой системы на тяжеловодных реакторах и установках позволит непрерывно контролировать изотопный и химический состав тяжелой воды, возвращать  $D_2O$  обратно в контур, снизить дозовую нагрузку на персонал, а также повысить оперативность химического контроля тяжеловодных теплоносителей реактора ПИК, что важно для поддержания водно-химического режима.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Воронина Т. В., Тугушева Д. Ю. «Автоматизированная система пробоотбора и анализа тяжелой воды на реакторе ПИК». Журнал Энергетик. 2020. №4. С. 20–22.

## AUTOMATIC SAMPLING AND HEAVY WATER ANALYSIS SYSTEM (ASSA HW) OF PIK REACTOR

*T. V. Voronina, A. A. Kaverzina, M. Yu. Klimov*

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

Corrosion damage of equipment caused by errors in maintaining the water-chemical regime is the most common cause of unplanned shutdowns (up to 80 %) and a power level decrease of nuclear installations, currently. Therefore, the issues of interaction of hydrogen isotopes with structural materials for nuclear reactor chemists are primarily reduced to issues of reactor equipment corrosion. Improve of the water-chemical regime is one of the most effective ways to prevent corrosion damage.

Now NRC «Kurchatov Institute» – PNPI is putting into operation a high-flow heavy-water research reactor PIK. An important component of water-chemical regime maintaining is competent chemical control. When operating heavy water nuclear installations, a significant part (up to 40 %) of the reactor staff radiation dose will be caused by tritium. A work with heavy water ( $D_2O$ ), including chemical control, is radiation hazardous. In addition,  $D_2O$  is a special non-nuclear material. For this reason, after measurements  $D_2O$  have been returned back to the circuit must but not drain special sewer.

Thus, one of the important tasks for PIK reactor is to organize an automated heavy water sampling and analysis system (ASSA HW [1]). To control the chemical parameters of  $D_2O$ , it was decided to use Russian on-line analyzers. To control the isotopic composition of  $D_2O$ , PNPI specialists proposed using the Matrix-F IR Fourier spectrometer (deuterium measurement) and the Wilma radiometer (tritium measurement). In 2016–2017, equipment was purchased, and in 2017–2019, the analyzers were graduated in laboratory conditions. In 2020, all ASSA HW equipment was installed. Currently (2021–2022), work is underway to put the system into operation. The planned time frame is 2023.

Using such a system will organize automated remote monitoring the isotopic and chemical composition of heavy water, return the heavy water after measurements back to the circuit, reduce the dose load on the reactor personnel and increase the efficiency of chemical control of heavy-water coolants of the PIK reactor, which is important for maintaining the water-chemical regime.

### REFERENCES

1. Voronina T. V., Tugusheva D. Yu. *Energetic*. P. 20–22. 2020. Issue 4.

**Бондаренко Сергей Дмитриевич**

Начальник химико-технологического отдела  
реактора ПИК

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

г. Гатчина, мкр. Орлова роща, д. 1

Разделение изотопов водорода

**Bondarenko Sergei**

Head of the chemical-technological department  
of the PIK reactor

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

Gatchina, microdistrict Orlova Roshcha, 1

Separation of hydrogen isotopes

bondarenko\_sd@npri.nrcki.ru

**ОБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВКИ ИЗОТОПНОЙ ОЧИСТКИ  
ТЯЖЕЛОЙ ВОДЫ ПИЯФ. ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

*С. Д. Бондаренко, И. А. Алексеев, Т. В. Васянина, О. А. Федорченко*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

В работе рассматривается эволюция опытно-промышленной установки ЭВИО, этапы модернизации и причины для модификации технологической схемы и оборудования. Опытно-промышленная установка ЭВИО в Петербургском институте ядерной физики им. Б. П. Константинова работает с 1995 г. Установка ЭВИО использует СЕСЕ технологию, основанную на процессах электролиза и каталитического изотопного обмена в системе вода-водород.

В состав установки входит электролизер ФС-525, колонны каталитического изотопного обмена, разработанные и изготовленные в НИЦ КИ – ПИЯФ. Массообменная часть колонн состоит из катализатора и насадки. В установке применен гидрофобный платиновый катализатор на сополимере дивинилбензола, разработанный РХТУ им. Менделеева и нерегулярная гидрофильная насадка спирально-призматического типа из нержавеющей стали.

На установке ЭВИО проводятся НИР и опытная наработка тяжелой воды из тяжеловодного разбавленного сырья, в том числе и с очисткой от трития до уровня 7600 Бк/кг. За годы эксплуатации установка претерпела ряд значительных изменений и усовершенствований, позволивших автоматизировать работу основных узлов, создать автоматизированную систему онлайн анализа потоков получаемой продукции и поднять производительность с 20 кг/сутки тяжелой воды до 30.

В работе анализируется опыт эксплуатации основного оборудования установки, такого как: электролизер, приборы измерения и контроля расходов жидкости и газа, насосного оборудования. Рассматриваются вопросы адаптации стандартных промышленных решений для применения в процессах очистки тяжелой воды от протия и трития, вопросы снижения выбросов трития и потерь тяжелой воды при эксплуатации установки ЭВИО.

## **EQUIPMENT FOR THE HEAVY WATER ISOTOPE PURIFICATION FACILITY AT PNPI. OPERATING EXPERIENCE**

*S. D. Bondarenko, I. A. Alekseev, T. V. Vasyanina, O. A. Fedorchenko*

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

The paper considers the evolution of the EVIO pilot plant, the stages of modernization and the reasons for modifying the technological scheme and equipment. Pilot plant EVIO at the St. Petersburg Institute of Nuclear Physics. B. P. Konstantinova has been operating since 1995. The EVIO plant uses CECE technology based on the processes of electrolysis and catalytic isotope exchange in the water-hydrogen system.

The unit includes an FS-525 electrolyzer, catalytic isotope exchange columns designed and manufactured at the NRC KI – PNPI. The mass transfer part of the columns consists of a catalyst and a packing. The unit uses a hydrophobic platinum catalyst based on a copolymer of divinylbenzene, developed by D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia and an irregular hydrophilic packing of a spiral-prismatic type made of stainless steel.

At the EVIO plant, research and experimental production of heavy water from heavy-water dilute raw materials is carried out, including purification from tritium to a level of 7600 Bq/kg. Over the years of operation, the installation has undergone a number of significant changes and improvements that

have made it possible to automate the operation of the main units, create an automated system for online analysis of product flows and increase productivity from 20 kg/day of heavy water to 30.

The paper analyzes the experience of operating the main equipment of the installation, such as: an electrolytic cell, instruments for measuring and controlling liquid and gas flow rates, pumping equipment. The issues of adaptation of standard industrial solutions for use in the processes of purification of heavy water from protium and tritium, issues of reducing tritium emissions and losses of heavy water during the operation of the EVIO plant are considered.

**Передистов Евгений Юрьевич**

Доцент кафедры физики  
Санкт-Петербургский государственный  
университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

193232, Санкт-Петербург, пр. Большевиков, д. 22,

Фундаментальные исследования роли  
наноразмерных неметаллических пленок  
в абсорбции, реэмиссии и транспорте (включая  
сверхпроницаемость) водорода металлами

**Peredistov Evgenii**

Assistant professor at department of physics

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg  
State University of Telecommunications

193232, St. Petersburg, Bol'shevikov, 22

Fundamental studies of the role of nanoscale  
non-metallic films in the absorption, re-emission and  
transport (including superpermeability)  
of hydrogen by metals  
Euperedistov@yandex.ru

**ПРЯМОЙ ВНУТРЕННИЙ РЕЦИКЛИНГ D/T В ТЯР С ПОМОЩЬЮ  
СВЕРХПРОНИЦАЕМЫХ МЕМБРАН**

*Е. Ю. Передистов, В. Н. Алимов, А. О. Буснюк,  
С. Р. Кузенов, А. И. Лившиц*

Санкт-Петербургский государственный университет телекоммуникаций  
им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Продуктом ядерной реакции между D и T является He, в который превращаются образующиеся  $\alpha$ -частицы. Поскольку концентрация He в рабочей плазме ТЯР не должна превышать 5 %, газовая смесь должна непрерывно выводиться из рабочей плазмы через дивертор. Таким образом выводимая из зоны реакции смесь содержит лишь 5 % He, тогда как остальные 95 % – это в основном D/T-топливо, которое должно быть очищено от He и других примесей и возвращено в рабочую плазму.

В случае прямого внутреннего рециклинга топлива отделение D/T от He и других примесей и возвращение очищенной D/T обратно в рабочую плазму должно осуществляться в зоне, непосредственно примыкающей к дивертору, минуя тритиевый завод. Прямой внутренний рециклинг D/T планируется осуществить с помощью мембран, сверхпроницаемых для надтепловых водородных частиц и непроницаемых для любых неводородных частиц и газов, включая He.

Одной из научных задач является масштабирование исследований по селективной откачке изотопов водорода с помощью сверхпроницаемых мембран (СПМ) и, соответственно, проведение экспериментов со сверхпроницаемыми мембранами, способными продемонстрировать технически значимые характеристики и имеющими конфигурацию, соответствующую геометрии патрубка, через который откачивается дивертор термоядерных установок [1–3]. Такие СПМ должны быть эффективно сопряжены с областью генерации надтепловых водородных частиц, т. е. между этой областью и входной поверхностью СПМ должна быть достаточно большая связь, а именно эта такая, что ее вакуумная проводимость, должна быть много больше, чем скорость генерации надтепловых водородных частиц.

Второй задачей экспериментальной установки является обеспечение исследований работы СПМ в сочетании с различными способами генерации надтепловых водородных частиц, включая генерацию тепловых атомов водорода путем термической диссоциации молекул на накаливаемой металлической поверхности и генерацию атомов и ионов водорода в газовом разряде.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Livshits A., Sube F., Notkin M., Soloviev M. and Bacal M. Plasma Driven Superpermeation of Hydrogen through Group Va Metals. *J. Appl. Phys.* 84 (1998). P. 2558–2564.
2. Livshits A. I., Alimov V. N., Notkin M. E. and Bacal M. Hydrogen superpermeation resistant to sputtering, *Appl. Phys. Lett.* V. 81. N 14. P. 2656–2658. 2002.
3. Kathage Y. et al. Experimental and simulation progress of a metal foil pump for fuel separation in the Direct Internal Recycling loop of DEMO, *Fus. Eng. Des.* Submitted (2021).

## DIRECT INTERNAL RECYCLING OF D/T TO TR USING SUPERPERMEABLE MEMBRANES

*E. Yu. Peredistov, V. N. Alimov, A. O. Busnyuk,  
S. R. Kuzenov, A. I. Livshits*

The Bonch-Bruevich Saint Petersburg State University of Telecommunications

The product of the nuclear reaction between D and T is He, into which the resulting  $\alpha$ -particles are converted. Since the concentration of He in the working plasma of the TNR should not exceed 5 %, the gas mixture must be continuously removed from the working plasma through a diverter. Thus, the mixture removed from the reaction zone contains only 5 % He, while the remaining 95 % is mainly D/T fuel, which must be purified from He and other impurities and returned to the working plasma. There is a variant in which D/T will be separated from He and other impurities in the zone immediately adjacent to the diverter and the purified D/T will be returned directly to the working plasma, bypassing the tritium plant. That. direct internal recycling of D/T will be carried out using membranes that are superpermeable to epithermal hydrogen particles and impermeable to any non-hydrogen particles and gases, including He.

One of the scientific tasks is to scale up research on the selective pumping of hydrogen isotopes using superpermeable membranes (SPMs) and, accordingly, to conduct experiments with superpermeable membranes capable of demonstrating technically significant characteristics and having a configuration corresponding to the geometry of the branch pipe through which the diverter of thermonuclear installations is pumped out [1–3]. Such SPMs must be effectively coupled to the region of generation of suprathreshold hydrogen particles, i. e., between this region and the input surface of the SPM there must be a sufficiently large connection, namely this one such that its vacuum conductivity must be much greater than the generation rate of epithermal hydrogen particles.

The second task in assembling the experimental setup is to provide research into the operation of the SPM in combination with various methods for generating suprathreshold hydrogen particles, including the generation of thermal hydrogen atoms by thermal dissociation of molecules on a heated metal surface and the generation of hydrogen atoms and ions in a gas discharge.

## REFERENCES

1. Livshits A., Sube F., Notkin M., Soloviev M. and Bacal M. Plasma Driven Suprerpermeation of Hydrogen through Group Va Metals. *J. Appl. Phys.* 84. 1998. P. 2558–2564.
2. Livshits A. I., Alimov V. N., Notkin M. E. and Bacal M. Hydrogen superpermeation resistant to sputtering, *Appl.Phys.Let.* V. 81. N 14. P. 2656–2658. 2002.
3. Kathage Y. et al. Experimental and simulation progress of a metal foil pump for fuel separation in the Direct Internal Recycling loop of DEMO, *Fus. Eng. Des.* Submitted. 2021.

**Иванов Борис Владимирович**

Младший научный сотрудник  
НИИ «Курчатовский институт»  
г. Москва, пл. академика Курчатова, д. 1  
Изотопы водорода

**Ivanov Boris**

Junior researcher  
Kurchatov Institute  
Moscow, Academician Kurchatov sq., 1  
Hydrogen isotopes  
kapjicohh@gmail.com



## ОЦЕНКА УРОВНЯ ГОТОВНОСТИ ТЕХНОЛОГИЙ ВОСПРОИЗВОДСТВА ТРИТИЯ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ ТРИТИЕВОЙ БЕЗОПАСНОСТИ В РОССИИ НА ПРИМЕРЕ ПРОЕКТА ДЕМО-ТИН

*Б. В. Иванов, С. С. Ананьев*

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва

В докладе проведен анализ следующих технологий тритиевого топливного цикла (ТЦ): воспроизводство трития в бланкете термоядерного реактора; получение и подготовка бридерных материалов; извлечение трития из бланкета; хранение трития в системах ТЦ; обеспечения тритиевой безопасности и анализа тритийсодержащих веществ. С учетом ранее полученных результатов [1], проанализированы все технологии систем тритиевого ТЦ проектируемого гибридного (синтез-деление) реактора ДЕМО-ТИН [2, 3].

Для анализа готовности была использована методика оценки уровня технологической готовности (Technology readiness level, TRL). Данная методика широко используется в России и мире для оценки зрелости технологий, планирования и оценки рисков инвестиций в наукоемких и технологических сферах. Методика позволяет, используя формальные при-

знаки сравнивать различные технологии в целевой сфере применения (в данном случае в ТЦ реактора ДЕМО-ТИН).

В результате анализа можно заключить, что в России имеется значительный задел в различных сферах применения и использования трития, тритиевых и смежных технологий, в частности: исследованы тритийвоспроизводящие материалы (Li, эвтектики Li-Pb,  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$  и др.) и методы извлечения трития из blankets, разработаны системы для анализа трития, например, масс-спектрометрического анализа тритиевых смесей и т. д. С другой стороны, возможности дальнейшего развития, совершенствования и масштабирования технологий ограничены их существенной зависимостью от поставок зарубежных комплектующих (электронных компонентов, специальных материалов, сложного оборудования и т. д.).

Среди наиболее развитых технологий можно выделить переработку тритийсодержащих отходов и улавливания трития (TRL 5). К числу наименее развитых технологий можно отнести: извлечение трития из blankets (TRL 3–4) (в России технология опробована только в лабораторном масштабе) и некоторые технологии для анализа трития. В настоящее время уровень готовности технологий тритиевого ТЦ реактора ДЕМО-ТИН в большинстве случаев не достаточен для их успешного и безопасного использования. Развитие этих технологий возможно в направлении, соответствующем мировому состоянию готовности, которое за редким исключением выше российского.

Целесообразно проводить работу по усилению международного сотрудничества в сфере применения тритиевых технологий в термоядерных исследованиях.

Работа поддержана Национальным исследовательским центром «Курчатовский институт».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Иванов Б. В. и др. ВАНТ Сер. Тер. Син. Вып. 44. № 4. С. 5–24. 2021.
2. Kuteev B. V. et al. Nucl. Fusion. V. 55. N 7. P. 073035. 2015.
3. Azizov E. A. et al. Phys. At. Nucl. V. 79. N 7. P. 1125–1136. 2016.

## **ASSESSMENT OF THE TECHNOLOGY READINESS LEVEL FOR TRITIUM PRODUCTION AND TRITIUM SAFETY IN RUSSIA BASED ON THE DEMO-FNS PROJECT**

*B. V. Ivanov, S. S. Ananyev*

National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

The report analyzes the following tritium fuel cycle (FC) technologies: tritium breeding in a fusion blanket; preparation of breeder materials; tritium extraction from the blanket; tritium storage; tritium safety and analytics. Considering the previously obtained results [1], all technologies of the tritium FC systems of the hybrid (fusion-fission) DEMO-FNS reactor project [2, 3] were analyzed.

To analyze the readiness, the technology readiness level (TRL) assessment technique was used. TRL method is widely used in Russia and in the world to assess the maturity of technologies, planning and assessing the risks of investments in science and technological areas. TRL method allows, using formal features, to compare different technologies in the target area of application (in this case, in FC of the DEMO-FNS reactor).

As a result of the analysis, it can be concluded that in Russia there is a significant experience in various applications and usages of tritium, tritium and related technologies, in particular: tritium-reproducing materials (Li, Li-Pb eutectics,  $\text{Li}_4\text{SiO}_4$ ,  $\text{Li}_2\text{TiO}_3$ , etc.) and methods for extracting tritium from a blanket, systems for the tritium analysis, for example, mass spectrometric analysis of tritium mixtures, etc. On the other hand, the possibilities for further development, improvement and scaling of technologies are limited by their significant dependence on the supply of foreign components (electronic components, special materials and equipment, etc.).

Among the most advanced technologies are the processing of tritium-containing waste and the tritium capture (TRL 5). The least developed technologies include extraction of tritium from a blanket (TRL 3–4) (in Russia, the technology has only been tested on a laboratory scale) and some technologies for tritium analysis. At present, the level of readiness of the technologies of the tritium FC for DEMO-FNS reactor in most cases is not sufficient for their successful and safe usage. The development of these technologies is possible in the direction corresponding to the world state of readiness, which, with rare exceptions, is higher than the Russian one.

It is expedient to carry out work to strengthen international cooperation in the field of application of tritium technologies in fusion research.

This work was partly supported by NRC Kurchatov Institute.

#### REFERENCES

1. Ivanov B. et al. PAS Ser. Thermonuclear Fusion. V. 44. N 4. P. 5–24, 2021.
2. Kuteev B. V. et al. Nucl. Fusion. V. 55. N 7. P. 073035. 2015.
3. Azizov E. A. et al. Phys. At. Nucl. V. 79. N 7. P. 1125–1136. 2016.

**Кошлань Владислав Игоревич**

Студент, 4 курс бакалавриата  
НИУ «Московский Энергетический Институт»,  
НИЦ «Курчатовский Институт»  
ул. Красноказарменная, 14, Москва, Россия, 111250.  
Топливный цикл, термоядерный реактор,  
гибридный реактор синтез-деление, моделирование  
топливного цикла, изотопы водорода, тритий

**Koshlan Vladislav**

Student, 4th year of Bachelor's degree  
NRU «Moscow Power Engineering Institute»,  
NRC «Kurchatov institute»  
Krasnokazarmennaya st. 14, Moscow, Russia, 111250.  
Fuel cycle, fusion reactor, fusion-fission hybrid reactor,  
fusion neutron source, hydrogen isotopes, tritium, fuel  
cycle simulation  
vkoshlan@yandex.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ ТОПЛИВНОГО ЦИКЛА ДЕМО-ТИН**

*В. И. Кошлань<sup>1,2</sup>, С. С. Ананьев<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>НИУ «Московской энергетический институт»,  
ул. Красноказарменная, 14, Москва, Россия, 111250  
<sup>2</sup>НИЦ «Курчатовский институт»,  
пл. Академика Курчатова, 1, Москва, Россия, 123182

Для решения задачи расширенного производства нейтронов термоядерного спектра, необходимых как для прикладных задач, так и для стратегических – деления и трансмутации тяжелых ядер, в НИЦ «Курчатовский институт» с 2007 г ведется разработка концепции термоядерного источника нейтронов (ТИН) в виде гибридного реактора, сочетающего в себе ядерные и термоядерные технологии, на основе магнитной ловушки типа токамак. В рамках реализации Федеральной программы и развития гибридных систем синтез-деление (ГССД) в РФ должны быть созданы установки ТИН-СТ [1] и ДЕМО-ТИН [2] до 2028 и 2037 г, соответственно [3].

При реализации этих проектов необходимо развивать существующие технологии в направлении их применения в ГССД и взаимной интеграции. Отметим, что ряд технологий нуждается в значительном развитии – в связи со спецификой их применения. К таким относятся технологии термоядерного топливного цикла (ТЦ), обеспечивающие требуемые параметры плазмы в стационарном режиме работы. Требования к производительности систем ТЦ должны быть определены в процессе моделирования потоков компонентов топлива в ТЦ в различных режимах работы установки.

Для стационарных режимов работы установок ТИН-СТ и ДЕМО-ТИН были сформулированы требования к системам ТЦ и оценено содержание трития (как наиболее ценного компонента топлива, подверженного радиоактивному распаду) в установке (см. [4, 5]). Между тем, для сценариев ввода установки в эксплуатацию и нестационарных режимов работы ключевых систем ТЦ должно быть проведено дополнительное моделирование.

В докладе представлена разработанная модель ТЦ для моделирования динамики накопления трития в системах ТЦ ТИН с учетом термоядерного выгорания, распада трития в системах ТЦ и его воспроизводства в бланкете. В ее основе заложен подход «черных ящиков» [6], который не позволяет учитывать особенности каждой системы, однако, при подборе соответствующих «времен пребывания», обеспечивает достаточную достоверность получаемых результатов. С использованием созданной модели, которая базируется на концептуальной схеме ТЦ ТИН, были подобраны параметры моделирования, обеспечивающие хорошее совпадение с литературными данными, полученными кодом FC-FNS [7] для проекта ДЕМО-ТИН. Показана возможность осуществлять моделирование нестационарных режимов работы установки.

Работа поддержана НИЦ «Курчатовский институт».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kuteev B. V., Azizov E. A. et al. Steady-state operation in compact tokamaks with copper coils // Nucl. Fusion 51 (2011) 073013 (6pp).
2. Kuteev B. V., Shpanskiy Yu. S. and DEMO-FNS Team. Fusion-fission hybrid system development and integration into Russia's nuclear power engineering // ВАНТ. Сер. Терм. Синтез. Т. 44. Вып. 2. С. 7–14. 2021.
3. Kuteev B. V. & Goncharov P. R. Fusion-Fission Hybrid Systems: Yesterday, Today, and Tomorrow // Fusion Sci. Technol. V.76. P. 836–847. 2020.

4. Ananyev S. S. et al. Selection of Fuel Isotope Composition in Heating Injectors of the FNS-ST Compact Fusion Neutron Source // *Appl. Sci.* 2021. 11. 7565.

5. Ananyev S. S. et al. Concept development and candidate technologies selection for the main DEMO-FNS fuel cycle systems // *Nucl. Fusion* 61. 2021. 116062.

6. Abdou M. A. et al. Deuterium-Tritium Fuel Self-Sufficiency in Fusion Reactors // *Fusion Technology*. 9, 250. 1986.

7. Ananyev S. S. et al. Electronic model «FC-FNS» of the fusion neutron source DEMO-FNS fuel cycle and modeling hydrogen isotopes flows and inventories in fueling systems // *Fusion Eng. Des.* 138. P. 289–293. 2019.

## MODELING OF THE FUEL CYCLE DEMO-FNS

*V. I. Koshlan<sup>1,2</sup>, S. S. Ananyev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>NRU «Moscow Power Engineering Institute»,  
Krasnokazarmennaya st. 14, Moscow, Russia, 111250

<sup>2</sup>NRC «Kurchatov institute»,  
Ak. Kurchatov sq. 1, Moscow, Russia, 123128

To solve the problem of expanded production of neutrons of the thermonuclear spectrum, necessary for both applied tasks and for strategic fission and transmutation of heavy nuclei, the Kurchatov Institute has been developing the concept of a fusion neutron sources (FNS) in the form of a hybrid reactor combining nuclear and thermonuclear technologies based on magnetic tokamak type traps. As part of the implementation of the Federal Program and the development of fusion-fission hybrid reactor (FFHR), FNS-ST [1] and DEMO-FNS [2] installations should be created in the Russian Federation until 2028 and 2037, respectively [3].

When implementing these projects, it is necessary to develop existing technologies in the direction of their application in the FFHR and mutual integration. It should be noted that a number of technologies need significant development due to the specifics of their application. These include thermonuclear fuel cycle (FC) technologies that provide the required plasma parameters in stationary operation. The performance requirements of the FC systems should be determined in the process of modeling the flows of fuel components in the FC in various modes of operation of the installation.

For stationary modes of operation of FNS-ST and DEMO-FNS installations, requirements for FC systems were formulated and the content of tritium (as the most valuable component of fuel subject to radioactive decay) in the installation was estimated (see [4, 5]). Meanwhile, for scenarios of commissioning of the installation and non-stationary modes of operation of key systems of the FC, additional modeling should be carried out.

The report presents a developed model of a FC for modeling the dynamics of tritium accumulation in FNS FC systems, taking into account thermonuclear burnout, tritium decay in FC systems and its reproduction in a blanket. It is based on the «black box» approach [6], which does not allow taking into account the features of each system, however, when selecting the appropriate «residence times» it provides sufficient reliability of the results obtained. Using the created model, which is based on the conceptual scheme of the FNS FC, modeling parameters were selected that provide a good match with the literature data obtained by the FC-FNS code [7] for the DEMO-FNS project. The possibility of modeling non-stationary modes of operation of the installation is shown.

The work was supported by the National Research Center «Kurchatov Institute».

**Ананьев Сергей Станиславович**

Ведущий научный сотрудник

НИЦ «Курчатовский институт»

123182, пл. Ак. Курчатова, 1

Термоядерный синтез, физика плазмы, изотопы  
водорода**Ananyev Sergey**

Leading Researcher

NRC Kurchatov institute

Ac. Kurchatov sq., 1, Moscow RU, 123182

Fusion, plasma physic, hydrogen isotopes

Ananyev\_SS@nrcki.ru

**ВЫБОР ИЗОТОПНОГО СОСТАВА ГАЗА ДЛЯ ИНЖЕКТОРОВ  
НЕЙТРАЛЬНЫХ ПУЧКОВ КОМПАКТНОГО ИСТОЧНИКА  
ТЕРМОЯДЕРНЫХ НЕЙТРОНОВ ТИИ-СТ***С. С. Ананьев<sup>1</sup>, Б. В. Иванов<sup>1</sup>, А. Ю. Днестровский<sup>1</sup>, А. С. Кукушкин<sup>1,2</sup>*<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва<sup>2</sup>НИЯУ «МИФИ», Москва

Инжекция пучков быстрых атомов (NBI) изотопов водорода в плазму токамака существенно влияет на изотопный состав плазмы и выход нейтронов [1, 2 и др.]. Для компактных токамаков FNS-C/FNS-ST влияние состава пучка на выход нейтронов наиболее существенно [3]. Поэтому в настоящее время система NBI рассматривается, как ключевая подсистема топливного цикла (ТЦ) для термоядерных источников нейтронов на базе токамака. Соответственно, проводятся согласованные расчеты топливных потоков изотопов водорода в основной и диверторной плазме и системах ТЦ с использованием разработанной модели компьютерным кодом FC-FNS.

Моделирование рабочих режимов FNS-ST с вводом дополнительной мощности инжекторами D+T, D или T мощностью 6 МВт для различных значений плотности основной плазмы и коэффициентов диффузии ионов позволяет найти поток нейтронов (включая пучково-плазменные реакции)

как функция доли трития в плазме. Потоки компонентов топлива в системах ТЦ установки рассчитываются кодами SOLPS, ASTRA и FC-FNS и обеспечиваются различными системами инжекции – в виде пеллет, пучками быстрых атомов и подачей газа в вакуумную камеру. Ранее было показано [3], что подпитки основной плазмы нейтральными пучками и нейтральными потоками из дивертора недостаточно для поддержания необходимого уровня плотности плазмы.

В рабочем окне параметров (плотности плазмы  $n_e$  и коэффициента диффузии частиц  $D/\chi_e$ ) был найден D/T состав плазмы, при котором ожидается максимальный выход нейтронов. Показано, что при выбранном подходе к архитектуре ТЦ [1] (с частичным разделением отводимого из вакуумной камеры газа – 20–60 %) для всех рассмотренных режимов пучка выход нейтронов ограничивается изотопным составом плазмы, которая зависит от состава плазмы дивертора. Был предложен новый подход к управлению изотопным составом плазмы дивертора с помощью инжекции газа в вакуумную камеру, основанный на разделении изотопов водорода во всем потоке выхлопных газов, откачиваемых из дивертора.

Ранее было показано [3], что для D+T пучка нейтронный выход  $4,5\text{--}5,5 \cdot 10^{17}$  1/с достижим при плотности плазмы  $n_e = 7,0\text{--}8,5 \cdot 10^{19}$  1/м<sup>3</sup> и  $D/\chi_e = 0,2\text{--}0,4$  – т. е. при хорошем удержании частиц в плазме. Для D пучка наибольший выход нейтронов  $4,5\text{--}5,5 \cdot 10^{17}$  1/с достигается в диапазоне плотностей  $n_e = 7,0\text{--}10,0 \cdot 10^{19}$  1/м<sup>3</sup> при  $D/\chi_e = 0,4\text{--}0,6$ . Увеличение выхода нейтронов до  $4,5\text{--}6,0 \cdot 10^{17}$  1/с происходит для T пучка за счет уменьшения доли T в плазме, т. е.  $n_e = 9,0\text{--}10,0 \cdot 10^{19}$  1/м<sup>3</sup> и  $D/\chi_e = 0,4\text{--}0,6$ .

При предлагаемом новом подходе к архитектуре ТЦ (с разделением всего газового потока, откачиваемого из вакуумной камеры) наибольший поток нейтронов (до  $6,5 \cdot 10^{17}$  1/с) для T-пучка соответствует области большей плотности и лучшего удержания ( $n_e > 8,5 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup> и  $D/\chi_e < 0,4$ ). Применение этого подхода к чистому пучку D позволяет увеличить выход нейтронов до  $7,0 \cdot 10^{17}$  1/с. При этом область меньшей плотности и худшего удержания ( $n_e < 8,5 \cdot 10^{19}$  м<sup>-3</sup> и  $D/\chi_e > 0,3$ ) соответствует самым высоким значениям потока нейтронов.

Необходимый запас T на площадке установки (в системах ТЦ) для T- и D-пучков рассчитан для режимов с максимальным выходом нейтронов. Суммарное количество  $T_2$  в ТЦ установки во всех рассмотренных случаях находится в пределах 150–250 г, но распределяется по системам ТЦ (на площадке объекта) неравномерно. Оптимизация систем ТЦ с целью сокращения запасов T – перспективная задача, которая еще не до конца решена.

Например, при отдельной подаче газа в источник ионов ( $T_2$ ) и нейтронизатор ( $D_2$ ) запас  $T$  в системе разделения изотопов водорода увеличится до 160 г (относительно варианта с подачей  $T_2$  во все компоненты инжектора и частичное разделение для удаления примеси  $D_2$ ). Это приводит к увеличению запаса  $T_2$  в ТЦ на 40 г в пределах рабочего окна параметров. Между тем такая процедура снижает запасы  $T_2$  в инжекторах в 3 раза. Это необходимо учитывать при комплексной оценке различных вариантов выбора изотопного состава газа в инжекторах. Отметим, что для принятия взвешенного решения о реализации того или иного сценария запас  $T_2$  в ТЦ не является единственным критерием. Также следует учитывать подсистемы со значительным запасом  $T_2$ , технологические сложности реализации тритиевой инжекции и т. д.

Работа частично поддержана Российским научным фондом (грант № 18-72-10162).

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Ananyev S. S., Ivanov B. V., Kuteev B. V. – Fusion Eng. Des. 2020. Vol. 161. P. 111940.
2. Ananyev S. S., Ivanov B. V. et al. Nucl. Fusion 61. 2021. 116062. P. 11.
3. Ananyev S. S., Dnestrovskij A. Yu., Kukushkin A. S. Appl. Sci. 2021. 11. 7565.

### **CHOICE OF GAS ISOTOPE COMPOSITION FOR NEUTRAL BEAM INJECTORS OF THE FNS-ST COMPACT FUSION NEUTRON SOURCE**

*S. S. Ananyev<sup>1</sup>, B. V. Ivanov<sup>1</sup>, A. Yu. Dnestrovskij<sup>1</sup>, A. S. Kukushkin<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov Institute», Moscow

<sup>2</sup>NRNU MEPhI, Moscow

The injection of beams of fast atoms of hydrogen isotopes into the tokamak plasma considerably affects the plasma isotopic composition and the neutron yield [1, 2, etc.]. For the FNS-C/FNS-ST compact tokamaks, the effect of the beam composition on the neutron yield is most significant [3]. Therefore, the NBI system is considered currently as the key subsystem of the fuel cycle

(FC) for a tokamak-based fusion neutron sources. Accordingly, the self-consistent calculations of the fueling hydrogen isotope fluxes in the core and divertor plasmas and FC systems are performed using the FC-FNS computer model developed.

Simulation of FNS-ST operating modes with heating by D+T, D or T injectors with 6 MW for various values of the main plasma density and ion diffusion coefficients makes it possible to find the neutron flux (including the beam-plasma reactions) as a function of the tritium fraction in the plasma core. The fuel flow components in the facility fuel cycle systems are calculated by the SOLPS, ASTRA, and FC-FNS codes, being provided by various injection systems – pellet injectors, fast atom beams, and gas puff into the vacuum chamber. It was shown [3] that the plasma core fueling by neutral beams and neutral fluxes from the divertor is not sufficient to maintain the required plasma density level.

In the working window of the plasma core density  $n_e$  and particle to heat diffusivity ratio  $D/\chi_e$ , the D/T composition of the plasma is calculated, at which the maximum neutron yield is expected. It is shown that with the chosen approach to the fuel cycle architecture [1] (with partial separation of the gas exhausted from the vacuum chamber – 20–60 %), for all considered beam regimes, the neutron yield is limited by the isotopic composition of the plasma core, which depends on the divertor plasma composition. A new approach is proposed for controlling the isotopic composition in the divertor plasma using monoisotopic gas puffing into the vacuum chamber, which relies on the hydrogen isotopes separation in the whole exhaust gas flow pumped out from the divertor.

It was shown [3] that for the D+T beam, the neutron yield of  $4.5\text{--}5.5 \cdot 10^{17}$  1/s is achievable at the plasma core density  $n_e = 7.0\text{--}8.5 \cdot 10^{19}$  1/m<sup>3</sup> and  $D/\chi_e = 0.2\text{--}0.4$  – that is, at good particles retention in the plasma. For the D beam, the highest neutron yield of  $4.5\text{--}5.5 \cdot 10^{17}$  1/s is achieved in the density range  $n_e = 7.0\text{--}10.0 \cdot 10^{19}$  1/m<sup>3</sup> if  $D/\chi_e = 0.4\text{--}0.6$ . An increase of the neutron yield to  $4.5\text{--}6.0 \cdot 10^{17}$  1/s occurs for the T beam by decreasing the T fraction in the plasma core, that is,  $n_e = 9.0\text{--}10.0 \cdot 10^{19}$  1/m<sup>3</sup> and  $D/\chi_e = 0.4\text{--}0.6$ .

For the proposed new approach to the FC architecture (with separation of the entire gas flow evacuated from the vacuum chamber) the highest neutron flux (up to  $6.5 \cdot 10^{17}$  1/s) for the T beam corresponds to the region of higher density and better confinement ( $n_e > 8.5 \cdot 10^{19}$  m<sup>-3</sup> and  $D/\chi_e < 0.4$ ). Application of this approach to the pure D beam makes it possible to raise the neutron yield up to  $7.0 \cdot 10^{17}$  1/s. In this case, the region of lower density and worse confinement ( $n_e < 8.5 \cdot 10^{19}$  m<sup>-3</sup> и  $D/\chi_e > 0.3$ ) corresponds to the highest values of the neutron flux.

The required T inventory at the facility site (in the fuel cycle system) for T and D beams is calculated for the regimes with the maximum neutron yield. The total T<sub>2</sub> amount in the FC of the facility is, in all the cases considered, in the range of 150–250 g, distributed unevenly among the FC systems (at the facility site) – see table. FC systems optimization with the goal to reduce the T inventory is a promising task that is not fully resolved yet.

For example, with separate gas feeds for the ion source (T<sub>2</sub>) and neutralizer (D<sub>2</sub>), the T inventory in the hydrogen isotope separation system will increase up to 160 g (relative to the variant with T<sub>2</sub> feed to all injector components and partial gas separation to remove the D<sub>2</sub> impurity). This leads to an increase of the T<sub>2</sub> inventory in the FC by 40 g within the working window. Meanwhile, such a procedure reduces the T<sub>2</sub> inventory in the injectors by a factor of three. This should be taken into account in comprehensive assessment of various options for the choice of the isotopic gas composition in the heating injectors. Note that for making a balanced decision on implementation of a particular scenario, the T<sub>2</sub> inventory in the FC is not the only criterion. We should also take into account several subsystems with significant T<sub>2</sub> inventory, as well as technological difficulties in implementing the T-beam injection, operating the additional heating system and etc.

This work was partially supported by the Russian Science Foundation (grant № 18-72-10162).

## REFERENCES

1. Ananyev S. S., Ivanov B. V., Kuteev B. V. – Fusion Eng. Des. 2020. Vol. 161. P. 111940.
2. Ananyev S. S., Ivanov B. V. et al. Nucl. Fusion 61. 2021. 116062. P. 11.
3. Ananyev S. S., Dnestrovskij A. Yu., Kukushkin A. S. Appl. Sci. 2021. 11. 7565.

**Тивикова Ольга Александровна**

Инженер-конструктор  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»,  
607188, Россия, г. Саров, пр. Мира, д. 37  
Водород, высокое давление, гидриды металлов,  
источники водорода, аппаратура

**Tivikova Olga**

Design Engineer  
Russian Federal Nuclear Center – All-Russian  
Research Institute of Experimental Physics  
(RFNC-VNIIEF)  
Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia, 607188  
Hydrogen, high pressure, hydride of metal,  
sources of hydrogen, equipment  
arkad@triton.vniief.ru

**УСТАНОВКА ОЧИСТКИ ГАЗОВОЙ СРЕДЫ ОТ ТРИТИЯ**

*О. А. Тивикова, А. А. Юхимчук, И. П. Максимкин, Е. В. Буряк,  
В. В. Балугев, Р. К. Мусяев, А. А. Кирдяшкин,  
В. М. Першина, А. В. Рыжухина*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)  
607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл., проспект Мира, 37

При проведении работ с тритием одним из основных является вопрос обеспечения безопасности: существует необходимость очистки рабочей газовой смеси (воздух или инертный газ) от трития и поддержания общего радиационного фона в пределах регламентированной нормы. В РФЯЦ-ВНИИЭФ для этого разработан ряд специализированных установок, основанных на принципе накопления трития и тритийсодержащих примесей (трیتیевая вода) на специальных сорбентах.

В докладе представлены принципиальная схема установки очистки газовой среды от трития и ее конструкция. Описаны принципы работы

отдельных узлов системы. Приведены основные технические характеристики, полученные в ходе испытаний одной из установок.

## **INSTALLATION FOR GAS MEDIUM PURIFICATION FROM TRITIUM**

*O. A. Tivikova, A. A. Yukhimchuk, I. P. Maksimkin, E. V. Buryak,  
V. V. Baluev, R. K. Musyaev, A. A. Kirdyashkin,  
V. M. Pershina, A. V. Ryzhukhina*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»),  
Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia

When carrying out work with tritium, one of the main issues is the issue of ensuring safety: there is a need to purify gas mixture (air or inert gas) from tritium and maintain the general radiation background within the regulated norm. RFNC-VNIIEF has developed a number of specialized installations based on the principle of accumulation of tritium and tritium-containing impurities (tritium water) on special sorbents.

The report presents the schematic diagram of the installation for gas purification from tritium and its design. The principles of operation of certain system units are described. The main technical characteristics obtained during the test of one of the installations, are given.

**Кузьмин Дмитрий Артурович**

Инженер-технолог

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

г. Гатчина, мкр Орлова роща, д. 1

Разделение изотопов водорода

**Kuzmin Dmitry**

Process Engineer

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

Gatchina, microdistrict Orlova Roshcha, 1

Separation of hydrogen isotopes

kuzmin\_da@pnpi.nrcki.ru

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗОТОПНЫХ ЭФФЕКТОВ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОДОРОДНОГО НАСОСА**

*Д. А. Кузьмин, О. А. Федорченко, А. А. Брык, И. А. Алексеев*

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Протонообменные мембраны (РЕМ) обычно используются в электролизерах воды или топливных элементах в качестве твердо-полимерных электролитов (ТПЭ). Электролизер и топливный элемент в составе системы «жидкая вода-водород», так же известный как СЕСЕ процесс, представляют собой узлы обращения потоков: нижний и верхний, соответственно. Протонообменные мембраны также востребованы в электрохимическом компрессоре, используемом для повышения давления газообразного водорода и его рециркуляции, например между двумя обменными колоннами при организации двухтемпературного процесса. Представляет интерес аппарат способный заменить собой верхний и нижний узел обращения потока (топливный элемент и электролизер), существенно упростив процесс (отсутствие проблем с кислородом) и снизив эксплуатационные затраты СЕСЕ установки. Таким аппаратом в какой-то мере может стать электрохимический водородный насос (ЭВН). В лаборатории разделения изотопов водорода в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ был собран экспериментальный образец ЭВН, состоящий из одной ячейки диаметром 80 мм. Изучены электрохимические характеристики ячейки,

а также процесс передачи протонов через мембрану по цепочке водородных связей при диффузионном противотоке молекул тяжелой воды.

## **STUDY OF ISOTOPE EFFECTS USING AN ELECTROCHEMICAL HYDROGEN PUMP**

*D. A. Kuzmin, O. A. Fedorchenko, A. A. Bryk, I. A. Alekseev*

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

Proton-exchange membranes (PEM) are commonly used in water electrolyzers or fuel cells as solid polymer electrolytes (SPE). The electrolyser and the fuel cell in the «liquid water-hydrogen» system, also known as the CECE process, are flow circulation nodes: lower and upper, respectively. Proton exchange membranes are also in demand in an electrochemical compressor used to increase the pressure of hydrogen gas and recirculate it, for example, between two exchange columns when organizing a two-temperature process. Of interest is an apparatus capable of replacing the upper and lower flow circulation units (fuel cell and electrolyser), significantly simplifying the process (no problems with oxygen) and reducing the operating costs of the CECE facility. To some extent, an electrochemical hydrogen pump (EHP) can become such an apparatus. In the laboratory of hydrogen isotope separation at the National Research Center «Kurchatov Institute» – PNPI, an experimental sample of the EHP was assembled, consisting of a single cell with a diameter of 80 mm. The electrochemical characteristics of the cell, as well as the process of transfer of protons through the membrane along the chain of hydrogen bonds during the diffusion countercurrent of heavy water molecules, were studied.

**Спасов Дмитрий Дмитриевич**  
Научный сотрудник  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Москва, пл. Академика Курчатова, 1  
Водородная энергетика, электрохимия

**Spasov Dmitry**  
Researcher  
NRC «Kurchatov Institute», Moscow, Russia  
Hydrogen energy, electrochemistry  
spasovdd@outlook.com



## **ИСПЫТАНИЯ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО ВОДОРОДНОГО НАСОСА С ТВЕРДЫМ ПОЛИМЕРНЫМ ЭЛЕКТРОЛИТОМ В РАЗЛИЧНЫХ УСЛОВИЯХ**

*Д. Д. Спасов<sup>1,2</sup>, Н. А. Иванова<sup>1</sup>, Р. М. Менишарапов<sup>1</sup>, А. А. Засыпкина<sup>1</sup>,  
Е. А. Серегина<sup>1</sup>, М. В. Синяков<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Электрохимический водородный насос (ЭВН) является электрохимическим устройством, позволяющим обеспечивать транспорт водорода с анодной стороны на катодную с использованием электрической энергии. Данное устройство состоит из каталитических слоев, составляющих основу электродов, и протон-проводящего электролита, разделяющего анод и катод. Водород подводится к активным центрам анодного электрокатализатора, где происходит его разделение на протоны и электроны, протоны в свою очередь проходят через протон-проводящий материал к катоду, и рекомбинируют с электронами, перенесенными внешним источником тока, с образованием молекул водорода. Таким образом, эффективность ЭВН напрямую зависит от активности электрокатализаторов и проводимости электролита. В действительности, реакции окисления и восстановления водорода в высокой степени обратимы в ЭВН [1], таким образом

вклад перенапряжения на аноде и катоде является незначительным, и наибольшее влияние на эффективность устройства оказывает величина сопротивления материала электролита [2].

ЭВН может успешно применяться в различных системах как для увеличения давления водорода, так и для его отчистки от примесных газов [3]. К преимуществам данных устройств можно отнести высокую эффективность сжатия водорода, высокую степень очистки и отсутствие движущихся частей, и, как следствие, возможность достижения более длительного срока службы. Основным недостатком ЭВН является сильная зависимость эффективности от материала и свойств протон-проводящего электролита.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22-29-01367.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ströbel R. et al. The compression of hydrogen in an electrochemical cell based on a PEM fuel cell design // *Journal of power sources*. 2002. Т. 105. №. 2. P. 208–215.

2. Nordio M. et al. Experimental and modelling study of an electrochemical hydrogen compressor // *Chemical Engineering Journal*. 2019. Т. 369. P. 432–442.

3. Sdanghi G. et al. Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. Т. 102. P. 150–170.

## TESTS OF AN ELECTROCHEMICAL HYDROGEN PUMP WITH A PEM UNDER VARIOUS CONDITIONS

*D. D. Spasov*<sup>1,2</sup>, *N. A. Ivanova*<sup>1</sup>, *R. M. Mensharapov*<sup>1</sup>, *A. A. Zasyapkina*<sup>1</sup>,  
*E. A. Seregina*<sup>1</sup>, *M. V. Sinyakov*<sup>1</sup>

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRU «MPEI», Moscow, Russia

An electrochemical hydrogen pump is an electrochemical device that allows hydrogen to be transported from the anode side to the cathode side using electrical energy. This device consists of catalytic layers that form the basis of

the electrodes, and a proton-conducting electrolyte that separates the anode and cathode. Hydrogen is supplied to the active centers of the anode electrocatalyst, where it is separated into protons and electrons, protons, in turn, pass through the proton-conducting material to the cathode, and recombine with electrons transferred by an external current source to form hydrogen molecules. Thus, electrochemical hydrogen pump the efficiency directly depends on the activity of electrocatalysts and electrolyte conductivity. In fact, the reactions of hydrogen oxidation and reduction are highly reversible in electrochemical hydrogen pump [1], thus the contribution of the overvoltage at the anode and cathode is insignificant, and the resistance value of the electrolyte material has the greatest influence on the efficiency of the device [2].

Electrochemical hydrogen pump can be successfully used in various systems both to increase the pressure of hydrogen and to purify it from impurity gases [3]. The advantages of these devices include high efficiency of hydrogen compression, high degree of purification and absence of moving parts, and, as a result, the possibility of achieving a longer service life. The main disadvantage of electrochemical hydrogen pump is the strong dependence of efficiency on the material and properties of the proton-conducting electrolyte.

This work was supported by the Russian Science Foundation under project no. 22-29-01367.

## REFERENCES

1. Ströbel R. et al. The compression of hydrogen in an electrochemical cell based on a PEM fuel cell design // *Journal of power sources*. 2002. T. 105. №. 2. P. 208–215.
2. Nordio M. et al. Experimental and modelling study of an electrochemical hydrogen compressor // *Chemical Engineering Journal*. 2019. T. 369. P. 432–442.
3. Sdanghi G. et al. Review of the current technologies and performances of hydrogen compression for stationary and automotive applications // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2019. T. 102. P. 150–170.

**Иванова Наталья Анатольевна**  
Начальник лаборатории  
НИЦ «Курчатовский институт»  
Москва, пл. Академика Курчатова, 1  
Водородная энергетика, электрохимия

**Ivanova Nataliya**  
Head of laboratory  
NRC «Kurchatov Institute»  
Moscow, Russia  
Hydrogen energy, electrochemistry  
Ivanovana.1989@mail.ru



## **ЭЛЕКТРОКАТАЛИЗАТОРЫ РЕАКЦИЙ ВЫДЕЛЕНИЯ ВОДОРОДА И КИСЛОРОДА И МЕТОДЫ ИХ ИССЛЕДОВАНИЯ**

*Н. А. Иванова<sup>1</sup>, А. А. Засыпкина<sup>1</sup>, Р. М. Менишаров<sup>1</sup>,  
Д. Д. Спасов<sup>1,2</sup>, В. Н. Фатеев<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

<sup>2</sup>НИУ «МЭИ», Москва, Россия

Технология получения электролизного водорода является перспективной и коммерчески реализуемой в России и позволит в обозримой перспективе обеспечить создание конкурентноспособного производства водорода, как для собственных нужд, так и экспорта. В России на период 2024–2035 гг. рассматривается целый комплекс проектов по созданию промышленных предприятий получения «зеленого» и «желтого» водорода.

Ключевым компонентом электролизера с ТПЭ является мембранно-электродный блок (МЭБ), состоящий из двух электродов с нанесенными каталитическими слоями, и ТПЭ, составляющим 24 % от общей стоимости электролизера и в большей степени определяющими эффективность и долговечность работы устройства. На аноде электролизера происходит реакция выделения кислорода на катализаторах состава Ir/IrO<sub>2</sub>, Ru, а также их соединения и др. В качестве катодных электрокатализаторов реакции выделения водорода используются в основном соединения платины

как в виде черни, так и нанесенные на различные типы подложки. От эффективности электрокатализатора зависит скорость реакции и производительность электролизера [1]. Также в процессе эксплуатации происходит постепенная деградация электрокатализаторов, что снижает эффективность электролиза и производительность по водороду [2]. Существуют различные методы, которые позволяют определить основные свойства электрокатализаторов: удельную активную поверхность, активность, долговечность, а также предсказать их влияние на эффективность электролиза.

В настоящей работе будут рассмотрены методы исследования электрокатализаторов на примере образцов собственного производства НИЦ «Курчатовский институт»: циклическая вольтамперометрия, импедансометрия, ускоренное стресс-тестирование, исследования кинетики методом вращающегося дискового электрода, а также показано влияние свойств электрокатализаторов на электрохимические характеристики электролизной ячейки.

Работа выполнена при поддержке Гранта Президента МК -4120.2022.1.3.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Millet P. CRC Press-Taylor & Francis Group: New York. 2016. 23.
2. Spasov D. D. et al. Int. J. Hydrogen Energy. 2019.

## **ELECTROCATALYSTS FOR HYDROGEN AND OXYGEN EVOLUTION REACTIONS (HER AND OER) AND THEIR INVESTIGATION METHODS**

*N. A. Ivanova<sup>1</sup>, A. A. Zasyapkina<sup>1</sup>, R. M. Mensharapov<sup>1</sup>,  
D. D. Spasov<sup>1,2</sup>, V. N. Fateev<sup>1</sup>*

<sup>1</sup>NRC «Kurchatov institute», Moscow, Russia

<sup>2</sup>NRU «MPEI», Moscow, Russia

The technology for producing electrolytic hydrogen is promising and commercially feasible in Russia and will allow in the foreseeable future to ensure the creation of competitive hydrogen production, both for domestic needs and for export. In Russia for the period 2024–2035, a scope range of projects is

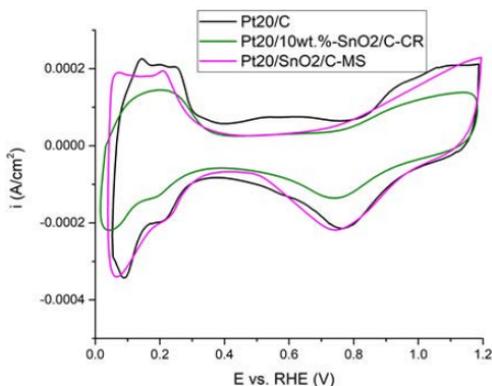
being considered to create industrial enterprises for the production of «green» and «yellow» hydrogen.

The key component of the cell with proton exchange membrane (PEM) is the membrane-electrode assembly (MEA), consisting of two electrodes with deposited catalytic layers, and PEM, which accounts for 24 % of the total cost of the cell and largely determines the efficiency and durability of the device. At the anode of the electrolytic cell, the reaction of oxygen evolution takes place on

catalysts of the composition Ir/IrO<sub>2</sub>, Ru, as well as their compounds, etc. Platinum compounds, both in the form of black and deposited on various types of substrates, are mainly used as cathodic electrocatalysts for the reaction of hydrogen evolution. The efficiency of the electrocatalyst determines the reaction rate and the performance of the electrolyzer [1]. Also, during operation, gradual degradation of electrocatalysts occurs, which reduces the efficiency of electrolysis and hydrogen productivity [2]. There are various methods to determine the main properties of electrocatalysts: specific active surface, activity, durability, as well as to predict their effect on the electrolysis efficiency.

In this paper, we will consider methods for electrocatalysts investigation on the samples of our domestic production at the National Research Center «Kurchatov Institute»: cyclic voltammetry (CV see fig.), electrochemical impedance spectroscopy, accelerated stress testing, rotating disk electrode study, SEM/PEM, and other. There are also show the influence of the properties of electrocatalysts on the electrochemical performance of the water electrolysis cell (WE).

This study was supported by the Grant of the President of the Russian Federation MK-4120.2022.1.3.



CVs of electrocatalysts

## REFERENCES

1. Millet P. CRC Press-Taylor & Francis Group: New York. 2016. 23.
2. Spasov D. D. et al. Int. J. Hydrogen Energy. 2019.

**Жмуровский Артем Вадимович**

Младший научный сотрудник  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, Россия, г. Саров, пр. Мира, д. 37  
Теплопроводность, изотопы водорода

**Zhmurovskiy Artem**

Junior Researcher

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian  
Research Institute of Experimental Physics  
(RFNC-VNIIEF)  
Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia, 607188  
Thermal conductivity, hydrogen isotopes  
arkad@triton.vniief.ru

**УСТАНОВКА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТА  
ТЕПЛОПРОВОДНОСТИ ПОРОШКОВЫХ МАТЕРИАЛОВ  
ПРИ ВЫСОКИХ ТЕМПЕРАТУРАХ И ДАВЛЕНИЯХ**

*А. В. Жмуровский, Е. В. Буряк, Р. К. Мусяев,  
В. В. Тихонов, А. В. Рыжухина*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)  
607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл., проспект Мира, 37

Одной из основных характеристик пористых газопроницаемых материалов является их теплопроводность. Область применения таких материалов как по давлению газовой среды так и по температуре может быть достаточно широкой. Серийно производимое оборудование не рассчитано для получения коэффициентов теплопроводности при давлении газов (включая водород) до 150 МПа и температуре до 600 °С. Для решения этой задачи была разработана и изготовлена установка по определению коэффициентов теплопроводности, способная работать в этих условиях.

В работе представлены конструкция разработанной установки и описание ее работы. Приведены результаты калибровочных испытаний

установки и результаты определения коэффициентов теплопроводности некоторых материалов.

## **INSTALLATION FOR DETERMINING THE THERMAL CONDUCTIVITY COEFFICIENT OF POWDER MATERIALS AT HIGH TEMPERATURES AND PRESSURES**

*A. V. Zhmurovsky, E. V. Buryak, R. K. Musyaev,  
V. V. Tikhonov, A. V. Ryzhukhina*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»),  
Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia

One of the main characteristics of porous gas-permeable materials is their thermal conductivity. The application of such materials, both in terms of gas medium pressure and temperature, can be wide enough. Commercially produced equipment is not designed to obtain thermal conductivity coefficients at gas pressures (including hydrogen) up to 150 MPa and temperature up to 600 °C. To solve this problem, the installation for determining thermal conductivity coefficients capable of operating under these conditions, was developed and manufactured.

The work presents the design of the developed installation and the description of its operation. The results of calibration tests of the installation and the results of determining the thermal conductivity coefficients of some materials are given.

**Черкез Дмитрий Ильич**

Научный сотрудник

НИЦ «Курчатовский институт»

123182, пл. Ак. Курчатова, 1

Термоядерный синтез, взаимодействие  
плазмы с материалами, изотопы водорода**Cherkez Dmitriy**

Researcher

NRC «Kurchatov institute»

Ac. Kurchatov sq., 1, Moscow RU, 123182

Fusion, plasma-material interaction,

hydrogen isotopes

Cherkez\_DI@nrcki.ru

**УСТАНОВКА ДЛЯ ИЗУЧЕНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ ПЛАЗМЫ  
С МАТЕРИАЛАМИ НА ОСНОВЕ ВЧ-ИСТОЧНИКА  
ГЕЛИКОННОГО ТИПА: ПЕРВЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ***Д. И. Черкез, Н. О. Степанов, С. С. Ананьев, А. В. Спицын*Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва

Одной из ключевых задач при проектировании и создании термоядерных реакторов (ТЯР) является выбор материалов для защиты вакуумной камеры от воздействия плазмы. В качестве обращенных к плазме материалов (ОПМ) для установки ИТЭР, как известно, были выбраны вольфрам и бериллий, в то время как для ТЯР следующих поколений вероятно расширение их перечня. Для эксплуатации ОПМ в ТЯР необходимо проведение ряда исследований в области взаимодействия изотопов водорода в виде газа и плазмы с материалами, ввиду радиоактивности трития, его высокой цены и сложности его воспроизводства в условиях ТЯР. Подобные исследования необходимы по ряду причин: для минимизации накопления трития в ОПМ и его паразитных утечек через конструкционные материалы в теплоносители, оптимизации топливного цикла ТЯР и коли-

чества трития в установке, оценки жизненного цикла ОПМ и отработки технологии их детритизации и т. д.

К перспективному типу компактных плазменных источников для исследования взаимодействия плазмы с материалами можно отнести ВЧ-источники плазмы, в частности с индукционным разрядом геликонного типа. Достоинством подобных плазменных источников является относительная простота, масштабируемость и как следствие возможность изменения плотности плазмы (ионных токов) в широких пределах. Также ввиду отсутствия эродирующих в ходе горения разряда электродов, возможно проведение более «чистых» экспериментов. Установки подобного типа, позволяют достигать плотности плазмы порядка  $10^{17}$ – $10^{19}$  м<sup>-3</sup> и отличаются компактностью.

В данной работе представлены результаты проектирования и создания лабораторной экспериментальной установки ГПИ-2 [1] на основе ВЧ (13,56 МГц) источника плазмы геликонного типа мощностью 2 кВт, а также представлены первые экспериментальные данные. В работе приведены результаты экспериментов с измерением величин ионных токов, полученные с помощью зондов Ленгмюра, в зависимости от введенной ВЧ мощности, давления и величины магнитного поля. Полученные результаты подтверждают возможность работы источника плазмы в ожидаемом диапазоне плотностей потока ионов  $10^{20}$ – $10^{22}$  ионов/(с·м<sup>2</sup>). В работе также рассмотрены перспективы дальнейшей модернизации: увеличение вводимой ВЧ-мощности, создание магнитной фокусировки с целью повышения плотности плазменного потока.

Работа выполнена при поддержке НИЦ «Курчатовский институт».

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черкез Д. И. и др. ВАНТ, Серия: Термоядерный синтез. 2020. Т. 43. № 3. С. 101–110.

## HELICON-TYPE RF FACILITY FOR PLASMA-MATERIAL INTERACTION INVESTIGATION: FIRST RESULTS

*D. I. Cherkez, N. O. Stepanov, S. S. Ananyev, A. V. Spitsyn*

National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow

One of the key tasks in the design and creation of fusion reactors (FR) is the choice of materials for vacuum chamber from plasma exposure protection. As is known, tungsten and beryllium were chosen as plasma-facing materials (PFM) for the ITER facility, while for the next step facilities their list is likely to be expanded. For the operation of PFM in the FR, it is necessary to conduct a number of studies in the field of the hydrogen isotopes interaction from gas and plasma with materials, due to the radioactivity of tritium, its high price and the complexity of its reproduction in the conditions of the FR. Such studies are necessary for a number of reasons: to minimize the accumulation of tritium in the PFM and its parasitic leakage through structural materials into coolants, to optimize the fuel cycle of the FR and the amount of tritium in the facility, to assess the life cycle of the PFM and to develop the technology of their detritization, and etc.

A promising type of compact plasma sources for studying the interaction of plasma with materials is RF plasma sources, in particular, with a helicon-type inductive discharge. The advantage of such plasma sources is their relative simplicity, scalability and, as a consequence, the possibility of changing the plasma density (ion currents) over a wide range. Also, due to the absence of electrodes eroding during the combustion of the discharge, it is possible to conduct more «clean» experiments. Installations of such a type make it possible to achieve a plasma density of the order of  $10^{17}$ – $10^{19}$  m<sup>-3</sup> and are compact.

This paper presents the results of designing and creating a GPI-2 laboratory experimental setup [1] based on an RF (13.56 MHz) helicon-type plasma source with a power of 2 kW, and also presents the first experimental data. The paper presents the results of experiments with measuring the values of ion currents, obtained using Langmuir probes, depending on the input RF power, pressure and magnetic field. The obtained results confirm the possibility of the plasma source operation in the expected range of ion flux densities  $\sim 10^{20}$ – $10^{22}$  ions/(s·m<sup>2</sup>). The paper also considers the prospects for further modernization: an increase in the input RF power, the creation of magnetic focusing in order to increase the plasma flux density.

---

The work was supported by the National Research Center «Kurchatov Institute».

#### REFERENCES

1. Cherkez D. I. et al. VANT, Series: Thermonuclear fusion. 2020. V. 43. N 3. P. 101–110.

**Кудияров Виктор Николаевич**

Доцент ОЭФ ИЯТШ

Томский политехнический университет

г. Томск, пр. Ленина, 43

Область научных интересов: взаимодействие  
водорода с материалами**Viktor Kudiiarov**

Assistant professor

Tomsk Polytechnic University

Tomsk, Lenina st., 43

Fields of interest: hydrogen interaction  
with materials  
kudiyarov@tpu.ru**РАЗРАБОТКА АВТОМАТИЗИРОВАННОГО КОМПЛЕКСА  
И ИЗУЧЕНИЕ ПРОЦЕССОВ СОРБЦИИ/ДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА  
В КОМПОЗИТАХ НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ГИДРИДОВ  
И МЕТАЛЛООРГАНИЧЕСКИХ КАРКАСНЫХ СТРУКТУР**

*В. Н. Кудияров, А. М. Лидер, Г. В. Гаранин, Т. Л. Мурашкина,  
И. С. Саквин, В. В. Федоров, А. Ю. Зарницын, Н. С. Пушилина,  
Р. Р. Эльман, Н. Е. Курдюмов, О. В. Семенов*

Томский политехнический университет

Изучение процессов сорбции и десорбции водорода представляет интерес для различных фундаментальных и прикладных задач. В области водородной энергетики необходимо разрабатывать и испытывать материалы-накопители водорода. В этой связи, актуальным является разработка программно-аппаратных комплексов для высокоточного определения сорбционных и десорбционных характеристик по водороду различных материалов, в том числе в новых функциональных материалах, как в ручном, так и в полностью автоматическом режимах проведения исследования.

Коллективом Томского политехнического университета был разработан автоматизированный комплекс по изучению взаимодействия водорода с материалами с максимальным рабочим давлением 50 атм., температур-

ным диапазоном от температуры жидкого азота до 900 °С, реализованы автоматические режимы откачка, напуск, РСІ-сорбция, РСІ-десорбция. Апробация разработанного комплекса выполнена с применением интерметаллического соединения  $\text{LaNi}_5$ .

Разработана методика получения композита на основе гидрида магния с добавлением МОКС MIL-101. Показано, что высокоэнергетическое механическое воздействие в планетарной мельнице при соотношении шаров к порошку 20:1, продолжительностью 30–90 мин и при частоте вращения барабанов в диапазоне 11–18 Гц приводит к формированию композита с равномерным распределением наноразмерных частиц хрома на поверхности крупных частиц гидрида магния. Энергия активации десорбции водорода для композита на основе гидрида магния и металлорганических каркасных структур MIL-101, сформированного при соотношении шаров к порошку 20:1, продолжительностью 60 мин и частоте вращения барабанов 15 Гц, снижается по сравнению с гидридом магния ( $190 \pm 2$  кДж/моль) на 35 % и составляет значение  $120 \pm 2$  кДж/моль.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (проект № 22-29-01280), а также в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

## **DEVELOPMENT OF THE AUTOMATED COMPLEX AND STUDY OF HYDROGEN SORPTION/DESORPTION PROCESSES IN COMPOSITES BASED ON METAL HYDRIDES AND METALORGANIC FRAMEWORK STRUCTURES**

*V. N. Kudiiarov, A. M. Lider, G. V. Garanin, T. L. Murashkina,  
I. S. Sakvin, V. V. Fedorov, A. Yu. Zarnitsin, N. S. Pushilina,  
R. R. Elman, N. E. Kurdyumov, O. V. Semenov*

Tomsk Polytechnic University

The study of hydrogen sorption and desorption processes is of interest for various fundamental and applied problems. In the field of hydrogen energy, it is necessary to develop and test hydrogen storage materials. The study of the effectiveness of protection methods is possible by studying and comparing the processes of hydrogen sorption and desorption by materials before and after coating/surface modification. In this regard, the development of software and hardware systems for the high-precision determination of the sorption and de-

sorption characteristics of hydrogen in various materials, including new functional materials, both in manual and fully automatic research modes is relevant.

The team of Tomsk Polytechnic University has developed the automated complex for studying the interaction of hydrogen with materials with a maximum operating pressure of 50 atm., temperature range from liquid nitrogen temperature to 900 °C, automatic pumping, puffing, PCI-sorption, PCI-desorption modes have been implemented. Approbation of the developed complex was carried out using the intermetallic compound  $\text{LaNi}_5$ .

The method for obtaining composite based on magnesium hydride with the addition of metal-organic frameworks MIL-101 has been developed. It is shown that a high-energy mechanical action in a planetary mill with a ratio of balls to powder of 20:1, a duration of 30–90 min and a drum rotation frequency in the range of 11–18 Hz leads to the formation of a composite with a uniform distribution of chromium nanoparticles on the surface of large particles of magnesium hydride. The activation energy of hydrogen desorption for a composite based on magnesium hydride and metal-organic framework structures MIL-101, formed at a ratio of balls to powder of 20:1, a duration of 60 min and a drum rotation frequency of 15 Hz, is reduced compared to magnesium hydride ( $190 \pm 2$  kJ/mol) by 35 % and is  $120 \pm 2$  kJ/mol.

The work was supported by the Russian Science Foundation (project no. 22-29-01280), as well as within the framework of the program to improve the competitiveness of Tomsk Polytechnic University.

**Зарубина Елена Юрьевна**

Инженер-исследователь  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, Россия, г. Саров, пр. Мира, д. 37  
Изотопы водорода, криогенная мишень,  
лазерный термоядерный синтез

**Zarubina Elena**

Research engineer  
FSUE «RFNC-VNIIEF»  
Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia, 607188  
Hydrogen isotopes, cryogenic target,  
laser thermonuclear fusion  
EYuZarubina@vniief.ru



## **ОПТИЧЕСКАЯ ДИАГНОСТИКА СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

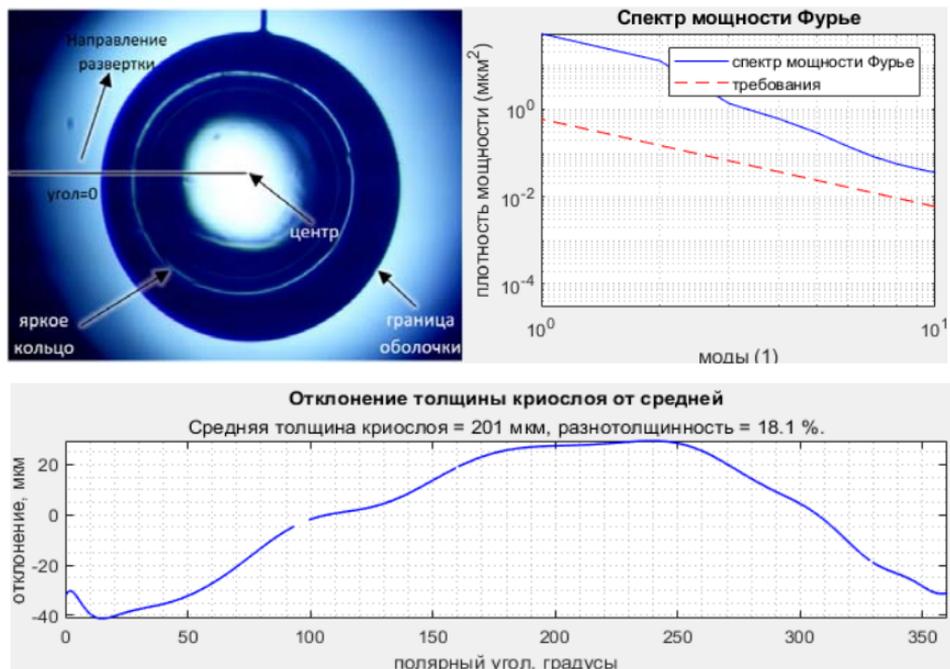
*Е. Ю. Зарубина, М. А. Рогожина*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)  
607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл., проспект Мира, 37

Приведены промежуточные результаты работы над программой оптической теневой диагностики слоя изотопов водорода в криогенной мишени. Мишень представляет собой сферическую оболочку с замороженным на ее внутренней поверхности криогенным слоем изотопов водорода. Перед постановкой мишени в лазерный эксперимент по зажиганию необходимо провести ее диагностику на соответствие требуемым параметрам: разнотолщинность криослоя должна быть менее 1 %, шероховатость внутренней поверхности криослоя в полимерной оболочке – менее 1 мкм [1].

Вычисление геометрических параметров криослоя основано на определении положения характеристического «яркого кольца» относительно края оболочки на теневом изображении [2], которое представлено на рисунке. Проведено построение теоретической модели прохождения света

через оптически прозрачную оболочку с топливом, выполнена ее экспериментальная проверка. Получена зависимость толщины криослоя от положения яркого кольца на теновом изображении и параметров оболочки. В настоящее время проводится работа над программой автоматической диагностики криослоя.



Теневое изображение криогенной мишени непрямого облучения и результат диагностики

Входные данные программы: диаметр и толщина стенки оболочки, шаг по углу, названия изображения для обработки и файла для записи результата. Основные этапы программы: выделение границ на изображении; итеративный поиск внешней границы и центра оболочки; развертка изображения в полярных координатах из центра оболочки; идентификация внешней границы оболочки и «яркого кольца» из развернутого изображения; вычисление соответствующей толщины криослоя. Выходными данными программы, записываемыми в файл, являются профиль и спектр мощности Фурье внутренней поверхности криослоя в плоскости локализации изображения, средняя толщина и разнотолщинность криослоя, параметры оболочки.

Планируется оценить погрешности и границы применимости оптического метода, исследовать возможность оценки размеров локальных неровностей, например, канавок по границам кристаллов льда изотопов водорода. Также необходимо разработать метод и программу диагностики криослоя рентгеновским методом для оптически непрозрачных оболочек и метод частичной реконструкции слоя с использованием двух осей наблюдения.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kucheev S. O., Hamza A. V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 91–101.
2. Three-dimensional characterization of cryogenic target ice layers using multiple shadowgraph views. LLE Review, Vol. 104.

## OPTICAL DIAGNOSTICS OF HYDROGEN ISOTOPES LAYER IN CRYOGENIC TARGET FOR LASER THERMONUCLEAR FUSION

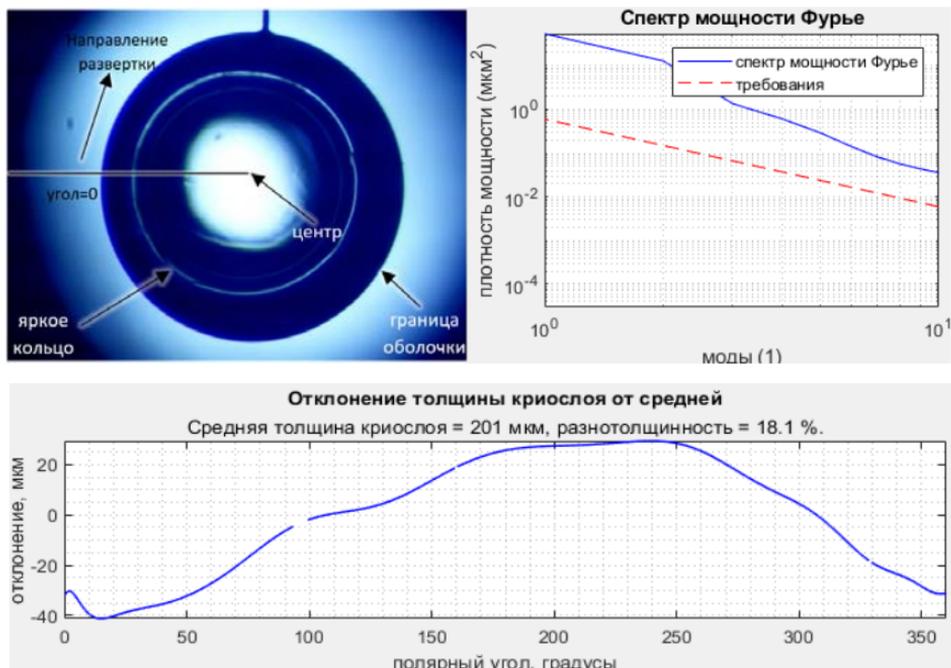
*E. Yu. Zarubina, M. A. Rogozhina*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute  
of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»),  
Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia

Intermediate results of work on the program of optical shadow diagnostics of the hydrogen isotopes layer in the cryogenic target are given. The target is a spherical shell with a cryogenic layer of hydrogen isotopes that is frozen on its inner surface. Before putting the target into the laser ignition experiment, it is necessary to perform its diagnostics for compliance with the required parameters: polythickness of cryogenic layer should be less than 1 %, roughness of inner surface of cryogenic layer in a polymeric shell – less than 1  $\mu\text{m}$  [1].

Calculation of geometric parameters of the cryogenic layer is based on the determination of the position of the «bright ring» characteristic relative to the shell edge in the shadow image [2], which is shown in figure. A theoretical model of the passage of light through the optically transparent shell with fuel was constructed; its experimental verification was performed. A dependence of the cryogenic layer thickness on the position of the bright ring in the shadow

image and the parameters of the shell is obtained. Currently, the work on the program of automatic diagnostics of the cryogenic layer is being performed.



Shadow image of the cryogenic target of indirect irradiation and the diagnostics result:

направление развертки – sweep direction,

центр – center,

угол – angle,

яркое кольцо – bright ring,

граница оболочки – shell border,

спектр мощности Фурье – Fourier power spectrum,

плотность мощности (мкм<sup>2</sup>) – power density (μm<sup>2</sup>),

требования – requirements,

отклонение толщины криослоя от средней – deviation of cryogenic layer thickness from the average one,

средняя толщина криослоя = 201 мкм – average thickness of cryogenic layer = 201 μm,

разнотолщинность – polythickness,

отклонение (мкм) – deviation (μm),

полярный угол (градусы) – polar angle (degrees).

Program input data: shell wall diameter and thickness, angle spacing, image names for processing and file for recording the result. The main stages of the program: selection boundaries in the image; iterative search of the outer boundary and the center of the shell; sweeping the image in polar coordinates from the shell center; identification of the outer boundary of the shell and the «bright ring» from the swept image; calculation of the corresponding thickness of the cryogenic layer. The program output data recorded in the file are the profile and Fourier power spectrum of the inner surface of the cryogenic layer in the image localization plane, the average thickness and polythickness of the cryogenic layer, shell parameters.

It is planned to assess the errors and limits of the applicability of the optical method, to investigate the possibility of estimating the dimensions of local irregularities, for example, grooves along the boundaries of hydrogen isotopes ice crystals. It is also necessary to develop a method and program for diagnostics of cryogenic layer by X-ray method for optically non-transparent shells and a method for partial reconstruction of the layer using two axes of observation.

#### REFERENCES

1. Kucheev S. O., Hamza A. V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. P. 91–101.
2. Three-dimensional characterization of cryogenic target ice layers using multiple shadowgraph views. *LLE Review*. Vol. 104.

**Рогожина Марина Анатольевна**

Старший научный сотрудник  
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

607188, Россия, г. Саров, пр. Мира, д. 37  
Криогенная мишень, криогенный слой,  
изотопы водорода, лазерный термоядерный синтез

**Rogozhina Marina**

Senior researcher

FSUE «RFNC-VNIIEF»

Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia, 607188  
Cryogenic target, cryogenic layer, hydrogen isotopes,  
laser thermonuclear fusion  
Rogozhina.marina.a@gmail.ru

**МЕТОД ФОРМИРОВАНИЯ СФЕРИЧЕСКОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ  
ВОДОРОДА В КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО  
ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА**

*М. А. Рогожина, Е. Ю. Зарубина*

Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский  
научно-исследовательский институт экспериментальной физики  
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл., проспект Мира, 37  
MARogozhina@vniief.ru

Для формирования криогенного однородного по толщине слоя изотопов водорода в сферической оболочке используется метод радиальных температурных градиентов. Приведены варианты реализации этого метода и результат эксперимента по формированию слоя дейтерия, разнотолщинность которого удовлетворяет заданным требованиям.

Важнейшим этапом развития современных исследований в области лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) являются технологии получения криогенных мишеней. Криогенная мишень представляет собой сферическую оболочку с криогенным слоем водородного топлива, расположенную в центре бокса-конвертора. К криогенному слою предъявляются высокие требования, в частности, разнотолщинность слоя (отклонения от

сферичности) не должна превышать 1 % [1]. Для симметризации слоя используется метод радиальных температурных градиентов. В зависимости от вида топлива, используемого в мишени, реализуется метод выравнивания слоя: ИК-выравнивание при работе с нерадиоактивными изотопами водорода ( $D_2$ ,  $H_2$ ,  $HD$ ) [2] или бета-выравнивание для слоя с  $DT$ -смесью [3]. Реализация метода предполагает выдерживание оболочки с водородным топливом в изотермических условиях при температуре ниже температуры замерзания топлива. В этом случае из-за большего выделения тепла в объеме толстой области  $DT$ -слоя ее поверхность будет более нагрета, чем поверхность тонкой области. Вещество слоя будет испаряться с более нагретой области, и конденсироваться в менее нагретой области на поверхности слоя, как показано на рис. 1. Процесс выравнивания толщины имеет экспоненциальный характер, поскольку по мере выравнивания слоя градиент температуры на его поверхности снижается. Криогенный слой в конечном положении примет вид однородного по толщине сферического слоя, намороженного на внутреннюю поверхность сферической оболочки.

В результате реализации метода радиальных температурных градиентов для нерадиоактивных изотопов водорода были получены слои дейтерия, удовлетворяющие требованиям разнотолщинности слоя (рис. 2).

Метод получения однородного криогенного слоя с использованием ИК-выравнивания используется для получения базовых знаний о физическом механизме образования криослоя водорода, конструкции криомишени, алгоритмах проведения экспериментов, тем самым снижая риски, возникающие при работе с радиоактивными веществами.

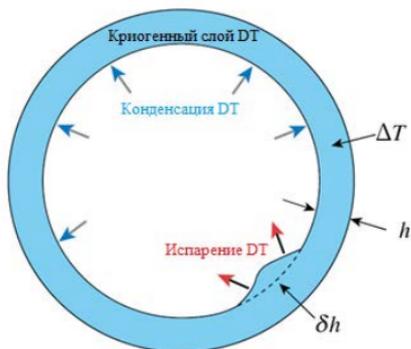


Рис. 1. Принцип работы метода радиальных температурных градиентов

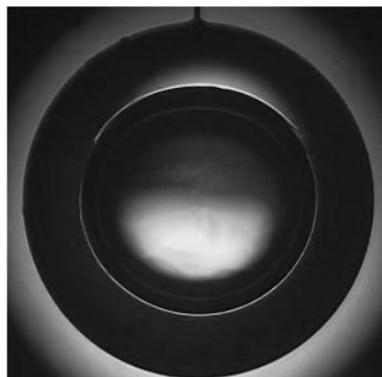


Рис. 2. Криогенный слой дейтерия в сферической оболочке

Метод ИК-выравнивания может также успешно применяться при работе с твердым DT-топливом в качестве усиления эффекта бета-выравнивания (в случае, если тритий-содержащие слои не получились требуемой однородности). Более того, именно комбинация обоих методов может значительно увеличить вероятность получения однородного криогенного слоя, а также сократить время формирования слоя.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Kucheev S. O., Hamza A. V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // J. Appl. Phys. 2010. Vol. 108. P. 91–101.
2. Bittner D. N., Collins G. W., Monsler E., Letts S. Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation. // Fusion Technology. 1999. Vol. 35. P. 244.
3. Martin A. J., Simms R. J., and Jacobs R. B., Vac J. Sci. Technol. A 6. 1885. (1988).

## METHOD OF FORMATION OF HYDROGEN ISOTOPES SPHERICAL LAYER IN THE CRYOGENIC TARGET FOR LASER THERMONUCLEAR FUSION

*M. A. Rogozhina, E. Yu. Zarubina*

Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics (FSUE «RFNC-VNIIEF»),  
Sarov, Nizhny Novgorod region, 607188, Russia  
MARogozhina@vniief.ru

To form uniform cryogenic layer of hydrogen isotopes in a spherical shell, the method of radial temperature gradients is used. Versions of implementation of this method and the result of experiment on formation of deuterium layer, polythickness of which meets the specified requirements, are given.

The most important stage of modern research development in the field of laser thermonuclear fusion (LTS) is the technology for obtaining cryogenic targets. Cryogenic target is a spherical shell with a cryogenic layer of hydrogen fuel located in the center of converter-box.

The cryogenic layer is subject to high requirements, in particular, the pol-

thickness of the layer (deviation from sphericity) should not exceed 1 % [1]. Method of radial temperature gradients is used for symmetrization of layer. Depending on the fuel type used in the target, the method of layer alignment is implemented: IR-alignment when working with non-radioactive isotopes of hydrogen (D2, H2, HD) [2] or beta-alignment for the layer with DT-mixture [3]. The implementation of the method involves holding the shell with hydrogen fuel in isothermal conditions at a temperature below the freezing temperature of the fuel. In this case, due to greater heat generation in the volume of the thick region of DT-layer, its surface will be more heated than the surface of a thin region. The substance of the layer will evaporate from more heated area and condense in a less heated area on the layer surface, as shown in fig. 1. The process of thickness alignment is exponential, as the layer is being aligned the temperature gradient on its surface decreases. The cryogenic layer in the final position will take the form of uniform spherical layer frozen on the inner surface of the spherical layer.

As a result of implementation of the method of radial temperature gradients for hydrogen isotopes, deuterium layers meeting the requirements of the layer polythickness, have been obtained (fig. 2).

Method for obtaining a uniform cryogenic layer using IR-alignment is used to obtain basic knowledge about physical mechanism of hydrogen cryogenic layer formation, cryogenic target design, experimental algorithms, thereby reducing the risks arising when working with radioactive substances.

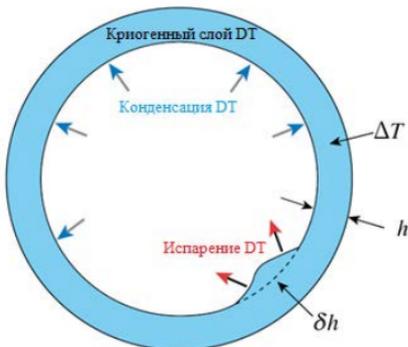


Fig. 1. Principle of work of radial temperature gradients method

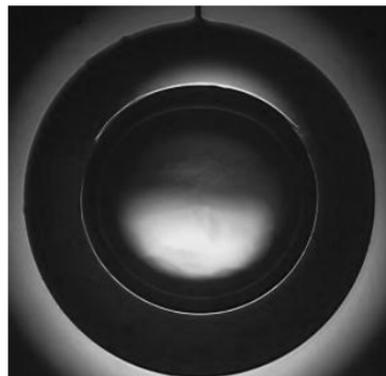


Fig. 2. Cryogenic layer of deuterium in the spherical shell

The IR-alignment method can also be successfully used when working with solid DT-fuel to enhance the effect of beta-alignment (in case, the tritium

containing layers are not uniform as required). Moreover, it is the combination of both methods that can significantly increase the probability of uniform cryogenic layer, as well as reduce the formation time of the layer.

#### REFERENCES

1. Kucheev S. O., Hamza A. V. Condensed hydrogen for thermonuclear fusion // *J. Appl. Phys.* 2010. Vol. 108. P. 91–101.
2. Bittner D. N., Collins G. W., Monsler E., Letts S. Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation. // *Fusion Technology.* 1999. Vol. 35. P. 244.
3. Martin A. J., Simms R. J., and Jacobs R. B., *Vac J. Sci. Technol. A* 6. 1885. (1988).

## АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Айткулов М. Т.	Aitkulov M. T.	65
Алексеев И. А.	Alekseev I. A.	174, 196
Алексеева О. К.	Alekseeva O. K.	150
Алимов В. Н.	Alimov V. N.	70, 177
Ананьев С. С.	Ananyev S. S.	74, 162, 181, 185, 189, 206
Анфимова Т. А.	Anfimova T.	49, 58
Аскербеков С. К.	Askerbekov S. K.	43, 65
Аханов А. М.	Akhanov A. M.	65
Балуев В. В.	Baluev V. V.	194
Беграмбеков Л. Б.	Begrambekov L. B.	102
Белова Ю. С.	Belova Yu. S.	131
Бобырь Н. П.	Bobyry N. P.	58, 74, 80, 84
Бойцов И. Е.	Boytsov I. E.	112
Бондаренко С. Д.	Bondarenko S. D.	174
Брык А. А.	Bryk A. A.	196
Букин А. Н.	Bukin A. N.	168
Буряк Е. В.	Buryak E. V.	194, 204
Буснюк А. О.	Busnyuk A. O.	70, 177
Быстрова О. С.	Bystrova O. S.	61
Варежкин А. В.	Varezhkin A.	159
Васина Я. А.	Vasina A. S.	38
Васянина Т. В.	Vasyanina T. V.	174
Вербецкий В. Н.	Verbetsky V. N.	139, 142
Веселова С. В.	Veselova S. V.	142
Воронин В. В.	Voronin V. V.	
Воронина Т. В.	Voronina T.	171
Габис И. Е.	Gabis I. E.	67
Гаранини Г. В.	Garanin G. V.	210
Гаспарян Ю. М.	Gasparyan Yu. M.	38, 46, 52
Гвоздев А. Е.	Gvozdev A. E.	104
Голубева А. В.	Golubeva A. V.	35, 49, 77, 88
Голубков А. Н.	Golubkov A. N.	124
Гордиенко Ю. Н.	Gordienko Yu. N.	43
Горелов А. М.	Gorelov A. M.	131
Грачев В. А.	Grachyov V. A.	61
Грашин С. А.	Grashin S. A.	77

Демидов Д. Н.	Demidov D.	74
Денисов Е.	Denisov E.	32
Днестровский А. Ю.	Dnestrovskij A. Yu.	189
Дугин Д. С.	Dugin D.	58, 80, 84
Ефимов В. С.	Efimov V. S.	52
Жмуровский А. В.	Zhmurovsky A. V.	204
Забавин Е. В.	Zabavin E. V.	97
Забродина О. Ю.	Zabrodina O. Yu.	97
Забусов О. О.	Zabusov O. O.	133
Заика Ю. В.	Zaika Yu. V.	42
Зарипова М. М.	Zaripova M. M.	52
Зарницын А. Ю.	Zarnitsin A. Yu.	210
Зарубина Е. Ю.	Zarubina E. Yu.	213, 218
Засыпкина А. А.	Zasypkina A. A.	150, 198, 201
Заурбекова Ж. А.	Zaurbekova Zh. A.	43
Захаров А. М.	Zakharov A. M.	102
Иванов Б. В.	Ivanov B. V.	146, 162, 181, 189
Иванова Н. А.	Ivanova N. A.	150, 198, 201
Исаенкова М. Г.	Isaenkova M. G.	52
Каверзина А. А.	Kaverzina A.	171
Казимов М. В.	Kazimov M. V.	112
Кирдяшкин А. А.	Kirdyashkin A. A.	194
Климов М. Ю.	Klimov M.	171
Козлов Д. А.	Kozlov D. A.	58, 80, 84
Комова О. В.	Komova O. V.	116
Коробцев С. В.	Korobtsev S. V.	28
Кошлань В. И.	Koshlan V. I.	185
Крат С. А.	Krat S. A.	38, 52
Кудияров В. Н.	Kudiiarov V. N.	128, 210
Кузенов С. Р.	Kuzenov S. R.	70, 177
Кузьмин Д. А.	Kuzmin D. A.	196
Кукушкин А. С.	Kukushkin A. S.	189
Кулагин В. В.	Kulagin V. V.	46
Кульсартов Т. В.	Kulsartov T. V.	43, 65
Курганская А. А.	Kurganskaya A. A.	139
Курдюмов Н. Е.	Kurdyumov N. E.	128, 210
Курский Р. А.	Kurskiy R. A.	133
Кутеев Б. В.	Kuteev B. V.	27, 162

Лившиц А. И.	Livshits A. I.	70, 154, 177
Лидер А. М.	Lider A. M.	210
Максимкин И. П.	Maksimkin I. P.	157, 194
Малков И. Л.	Malkov I. L.	112, 124
Марунич С. А.	Marunich S. A.	168
Меншарапов Р. М.	Mensharapov R. M.	146, 150, 198, 201
Митрохин С. В.	Mitrokhin S. V.	126, 136
Мовлаев Э. А.	Movlaev E. A.	136
Мокрушин В. В.	Mokrushin V. V.	97
Молочаев Я. С.	Molochaev Ya. S.	77
Мурашкина Т. Л.	Murashkina T. L.	210
Мусяев Р. К.	Musyaev R. K.	120, 194, 204
Нецкина О.В.	Netskina O. V.	116
Пак Ю. С.	Pak Yu. S.	168
Перевезенцев А. Н.	Perevezentsev A. N.	168
Передистов Е. Ю.	Peredistov E. Yu.	70, 177
Першина В. М.	Pershina V. M.	194
Пивень В. А.	Piven' V. A.	67
Писарев А. А.	Pisarev A. A.	38, 52, 123
Половинкин П. Е.	Polovinkin P. E.	97
Понкратов Ю. В.	Ponkratov Yu. V.	43
Попков А. С.	Popkov A. S.	38
Постников А. Ю.	Postnikov A. Yu.	97
Пришвицын А. С.	Prishvitsyn A. S.	38
Прохоренков М. А.	Prokhorenkov M. A.	126, 136
Пунтаков Н. А.	Puntakov N. A.	102
Пушилина Н. С.	Pushilina N. S.	128, 210
Рогожина М. А.	Rogozhina M. A.	213, 218
Рыжков А. В.	Ryzhkov A. V.	133
Розенкевич М. Б.	Rozenkevich M. B.	58, 168
Рыжухина А. В.	Ryzhukhina A. V.	194, 204
Сазонов А. Б.	Sazonov A. B.	61
Саквин И. С.	Sakvin I. S.	210
Селезнев А. А.	Seleznev A. A.	68
Селезенева А. Д.	Selezeneva A. D.	97
Семенов О. В.	Semenov O. V.	210
Сергеев А. Н.	Sergeev A. N.	104
<b>Сергеев Н. Н.</b>	<b>Sergeev N. N.</b>	104
Серегина Е. А.	Seregina E. A.	198

---

Сидоров Н. И.	Sidorov N. I.	67
Симанов В. А.	Simanov V. A.	97
Синяков М. В.	Sinyakov M. V.	146, 150, 198
Сисяев А. В.	Sisyayev A. V.	97
Склярова Н. А.	Sklyarova N. A.	97
Сомкина Е. В.	Somkina E. V.	131
Спасов Д. Д.	Spasov D. D.	150, 198, 201
Спицын А. В.	Spitsyn A. V.	206
Степанов Н. О.	Stepanov N. O.	91, 206
Тарасов А. А.	Tarasov A. A.	131
Терёшин В. А.	Tereshin V. A.	104
Терёшина И. С.	Tereshina I. S.	139, 142
Тивикова О. А.	Tivikova O. A.	194
Тихонов В. В.	Tikhonov V. V.	204
Фатеев В. Н.	Fateev V. N.	201
Федин П. А.	Fedin P. A.	84
Федоров В. В.	Fedorov V. V.	210
Федорченко О. А.	Fedorchenko O. A.	174, 196
Фефелова Е. А.	Fefelova E. A.	52
Хвостов Р. П.	Khvostov R. P.	88
Царев М. В.	Tsarev M. V.	97
Царева И. А.	Tsareva I. A.	97
Черкез Д. И.	Cherkez D. I.	80, 91, 206
Чуканов А. Н.	Chukanov A. N.	104
Шаймерденов А. А.	Shaimerdenov A. A.	65
Шевнин Е. В.	Shevnin E. V.	112
Шипалов В. И.	Shipalov V. I.	67
Шкандыбина В. В.	Shkandybina V. V.	146
Шкuryгин Д. М.	Shkurygin D. M.	88
Эльман Р. Р.	Elman R. R.	128, 210
Юхимчук А. А.	Yukhimchuk A. A.	24, 162, 194
Яковенко А. А.	Yakovenko A. A.	104
Ялышева А. В.	Yalysheva A. V.	112



С прискорбием сообщаем, что 18 июня 2022 года на 82 году жизни скоропостижно скончался наш товарищ и коллега доктор физико-математических наук Шарاپов Валерий Михайлович.

Валерий Михайлович родился 26 ноября 1940 года. В 1958 году окончил школу в г. Монино с золотой медалью и поступил на физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова. После его окончания с красным дипломом поступил в аспирантуру физфака.

Валерий Михайлович начал трудовую деятельность в Институте физической химии АН СССР с 1969 года. В нашем институте им защищены кандидатская и докторская диссертации. Основным направлением его научных исследований было взаимодействие водорода с твердым телом, в первую очередь, применительно к проблемам термоядерного материаловедения. Им совместно с сотрудниками лаборатории поверхностных явлений при низкоэнергетических воздействиях был выполнен большой цикл работ по изучению закономерностей проникновения водорода сквозь металлические системы, находящие в контакте с водородной плазмой. Эти работы внесли важный вклад в понимание явления рециклинга изотопов водорода в экспериментальных термоядерных установках и были использованы для оценки диффузионных утечек трития сквозь плазмоконтактирующие материалы термоядерного реактора-токамака.

Валерием Михайловичем была разработана методика плазмохимического осаждения бороуглеродных пленок с использованием карборана. Под его руководством этот метод был использован для боронизации крупных термоядерных установок – токамаков и стеллараторов для улучшения параметров термоядерной плазмы.

Совместно с сотрудниками были проведены исследования по захвату и накоплению изотопов водорода в бериллии и вольфраме, а также по эрозии углеродных материалов при плазменном облучении. В последние годы Валерий Михайлович активно сотрудничал с МГУ им. М. В. Ломоносова, МГТУ им. Н. Э. Баумана и ИОФ им. А. М. Прохорова РАН по программе исследования конструкционных материалов для Международного термоядерного реактора ИТЭР. В соавторстве и самостоятельно Ва-

лерием Михайловичем было опубликовано более 110 оригинальных научных работ и обзоров. В 2022 году вышел обзор по боронизации токамаков в журнале «Вопросы атомной науки и техники. Серия: термоядерный синтез», членом редколлегии которого он был многие годы.

Валерий Михайлович имел широкий кругозор, интересовался литературой, живописью, театром, фотографией. Его снимок «Доверительный разговор» занял первое место во Всесоюзном конкурсе любительских фотографий, проводившемся газетой «Правда» в 1976 году. Различные фотокomпозиции Валерия Михайловича использовались во многих спектаклях Дома ученых Академии наук, а также в сборниках воспоминаний и стихов его студенческих друзей. Он активно участвовал в студенческих строительных отрядах и до последних дней поддерживал связи со многими выпускниками физического факультета.

Валерий Михайлович был в числе первых организаторов Школы «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами».

Выражаем искреннее соболезнование семье, родственникам и близким в связи с тяжелой утратой.

**Взаимодействие изотопов водорода  
с конструкционными материалами  
IHISM'22 Junior**

Сборник тезисов докладов  
Пятнадцатой Международной Школы  
молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова

Печатается с оригинальных текстов авторов

Компьютерная подготовка оригинала-макета *С. Н. Фролова,*  
*Ю. В. Пичурова*

---

Подписано в печать 01.07.2022.      Формат 60×84/16.  
Печать офсетная. Усл. печ. л. ~13,3. Уч.-изд. л. ~14,8.  
Тираж 100 экз.      Зак. тип. 1325-2022.

---

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»  
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23