

ФГУП «Российский федеральный ядерный центр –
Всероссийский научно-исследовательский институт
экспериментальной физики»

FSUE «Russian federal nuclear center –
All-russian research institute of experimental physics»

**16-я Международная Школа
молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова**

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА
С КОНСТРУКЦИОННЫМИ МАТЕРИАЛАМИ.
IHISM '23 Junior**

Саров, 02–08 июля 2023 г.

СБОРНИК АННОТАЦИЙ



16th International School for Young Scientists named after
A. A. Kurdyumov

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

Sarov, 02–08 July, 2023
BOOK OF ABSTRACTS

2023

Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'23 Junior. Сборник тезисов Шестнадцатой Международной Школы молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова. Под редакцией доктора технических наук А. А. Юхимчука – Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2023.

Сборник содержит тезисы докладов, представленных на 16^о Международную Школу молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова. «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'23 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'23 Junior. The Book of Abstracts at the 16th International School for young scientists named after A. A. Kurdyumov. Edited by Dr. A. A. Yukhimchuk – Sarov, RFNC-VNIIEF, 2023.

The Book contains the abstracts of presentations at the 15 International School for young scientists named after A. A. Kurdyumov «Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials. IHISM'23 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, А. В. Ялышева

Compilers:

A. V. Buchirin, A. V. Yalysheva

© ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», 2023

Организаторы:

Росатом

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Национальный Центр Физики и Математики (НЦФМ)

НИЦ «Курчатовский институт»

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

**Sponsors:**

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

NRC «Kurchatov institute»

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

Программный комитет

Сопредседатели:

Илькаев Р. И. – почетный научный руководитель РФЯЦ-ВНИИЭФ, академик РАН;

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

Заместитель сопредседателей:

Юхимчук А. А. – д.т.н., РФЯЦ-ВНИИЭФ, Россия

Члены комитета:

Бисикало Д. В. – заместитель научного руководителя НЦФМ – главный ученый секретарь НЦФМ, академик РАН, Россия;

Беграмбеков Л. Б. – проф., НИЯУ МИФИ, Россия;

Вербецкий В. Н. – проф., МГУ, Россия;

Денисов Е. А. – к.ф.-м.н., доцент СПбГУ, Россия;

Зайка Ю. В. – д.ф.-м.н., «КарНЦ РАН», Россия;

Ковалишин А. А. – заместитель директора НИЦ «Курчатовский институт», член-корр. РАН, 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;

Тажимаева И. Л. – проф., ИАЭ НЯЦ РК, Казахстан;

Хапов А. С. – к.т.н., ВНИИА им. Н. Л. Духова, Россия

Секретарь:

Тихонов Василий Валерьевич – к.т.н., РФЯЦ-ВНИИЭФ, Россия

тел. 8 (83130) 2 45 99

e-mail: arkad@triton.vniief.ru

Исполнительный комитет

Председатель:

Москалев О. А. (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

Заместитель председателя:

Максимкин И. П. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Члены комитета:

Бучирин А. В. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Васильев А. В. (АНО «ДНЦФМ»)

Воронцова О. С. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Гевлич А. Н. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Пешехонова О. Ф. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Мионов В. Е. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Постников А. Ю. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Сенягина М. Н. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Тарасов С. В. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Тивикова О. А. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Чувиковской А. В. (РФЯЦ-ВНИИЭФ);

Юхимчук А. А. (РФЯЦ-ВНИИЭФ).

Секретарь:

Феоктистова Ирина Сергеевна (РФЯЦ-ВНИИЭФ)

т. 8 (83130) 2 46-05

e-mail: arkad@triton.vniief.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.

Program Committee

Co-Chairs:

Ilkaev R. I. – Honorary Scientific Director of the RFNC-VNIIEF,
Academician of the Russian Academy of Sciences;
Kovalchuk M. V. – President of SIC «Kurchatov Institute»

Deputy Co-Chairs:

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

Members of the Committee:

Bisikalo D. V. – deputy scientific director of NCFM – chief scientific secretary
of NCFM, academician of the Russian Academy of Sciences;
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;
Ковалишин А. А. – заместитель директора НИЦ «Курчатовский
институт», член-корр. РАН, Россия;
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;
A. S. Khapov – Candidate of Technical Sciences, N. L. Dukhov VNIIA, Russia

Secretary:

Tikhonov Василий Валерьевич – RFNC-VNIIEF, Russia
vol. 8 (83130) 2 45 99
e-mail: arkad@triton.vniief.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 2023 году мы проводим уже 16-ю Международную Школу по тематике «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'23 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, 2014 и 2019 гг.), в Воронеже (2010 г.), в Звенигороде (2011 г.), в Москве (2015 г.), Протвино (2017 г.), Гатчине (2021 г) и Окуловке (2022 г.).

На 16-й Международной Школе «Взаимодействие изотопов водорода с конструкционными материалами. IHISM'23 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 Школы 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 2023, The International school for young scientists «Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials. IHISM Junior» is already held for the 16th 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'23 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), in Gatchina (2021) and Okulovka (2023).

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 16th «Interaction of Hydrogen Isotopes with Structural Materials. IHISM'23 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 School 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. *Бисикало Д. В.*

Национальный центр физики и математики 22

Bisikalo D. V.

The national center of physics and mathematics 22

A2. *Москалев О. А.*

Этапы ядерного сдерживания 23

Moskalev O. A.

Stages of nuclear deterrence 23

A3. *Юхимчук А. А.*

Направление «Физика изотопов водорода» Национального центра физики и математики. Научная программа 2023–2025 годов ... 24

Yukhimchuk A. A.

The scientific area «Hydrogen isotope physics» of the National center of physics and mathematics. Scientific program for 2023–2025 25

A4. *Чувильдеев В. Н.*

Подходы к проектированию материалов 27

Chuvildeev V. T.

Approaches to the design of materials 27

A5. *Мельников С. А.*

Редкие и редкоземельные металлы в технологическом развитии современных отраслей экономики 28

Melnikov S. A.

Rare and rare-earth metals in the technological development of modern industries 29

1. Кинетика и термодинамика взаимодействия изотопов водорода с твердыми телами, включая эффекты радиогенного гелия

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

A6. Заика Ю. В.

Метод сопряженных уравнений для оценки параметров водородопроницаемости и термодесорбции 32

Zaika Yu. V.

Adjoint equation method for estimation of hydrogen permeability and thermal desorption parameters 33

A7. Голубева А. В.

Проблема выбора материалов первой стенки термоядерных реакторов 35

Golubeva A. V.

Problem of choosing materials for the first wall of fusion reactors 36

B1. Заика Ю. В., Родченкова Н. И.

Разностная схема решения нелинейной краевой задачи водородопроницаемости с динамическими граничными условиями ... 38

Zaika Yu. V., Rodchenkova N. I.

Difference scheme for solving a nonlinear boundary-value problem of hydrogen permeability with dynamical boundary conditions 40

B2. Заика Ю. В., Костикова Е. К.

Качественная и параметрическая идентификация двухпиковых спектров термодесорбции водорода 42

Zaika Yu. V., Kostikova E. K.

Qualitative and parametric identification of two-peak hydrogen thermal desorption spectra 44

B3. Сидоров Н. И., Ремпель А. А., Сипатов И. С., Пивень В. А.

Кинетика проникновения водорода сквозь высокоэнтропийные сплавы 45

Sidorov N. I., Rempel A. A., Sipatov I. S., Piven V. A.

Kinetics of hydrogen penetration through high-entropy alloys 46

C1. Персианова А. П., Голубева А. В.

Типы ловушек водорода в вольфраме: обзор 48

Persianova A. P., Golubeva A. V.

Types of hydrogen traps in tungsten: a review 50

С2. Дугин Д. С., Бобырь Н. П., Козлов Д. А.	
Особенности моделирования и расчетов количества повреждений в материалах с использованием программы SRIM	52
<i>Dugin D. S., Bobyr N. P., Kozlov D. A.</i>	
Features of modeling and calculating the amount of damage in materials using the SRIM program	54
С3. Кузенов С. Р., Буснюк А. О., Алимов В. Н., Лившиц А. И., Передистов Е. Ю.	
Термическая деградация каталитического покрытия мембран на основе металлов 5 группы	56
<i>Kuzenov S. R., Busnyuk A. O., Alimov V. N., Livshits A. I., Peredistov E. U.</i>	
The thermal degradation of catalytic coating for membranes based on 5 group	58
С4. Сомкина Е. В., Тарасов А. А., Белова Ю. С., Золотова Н. С., Балашова Н. Н.	
Влияние лаковых и металлических покрытий на влагопроницаемость и водородопроницаемость полимерных материалов	60
<i>Somkina E. V., Tarasov A. A., Belova Yu. S., Zolotova N. S., Balashova N. N.</i>	
Influence of lacquer and metal coatings on moisture and hydrogen permeability of polymer materials	61
С5. Ерискин А. А., Никулин В. Я., Силин П. В., Колокольцев В. Н., Куликаускас В. С.	
Обратное проникновение дейтерия из дейтерированного полиэтилена в фольги из Nb и Ta	62
<i>Eriskin A. A., Nikulin V. Ya., Silin P. V., Kolokoltsev V. N., Kulikauskas V. S.</i>	
Backward penetration of deuterium from deuterated polyethylene into Nb and Ta foils	63
2. Механические свойства и структурные превращения конструкционных материалов в среде водорода	
2. Mechanical properties and structural transformations of structural materials in a hydrogen environment	
А8. Литовченко И. Ю.	
Конструкционные стали для ядерной энергетики: микроструктура, механические свойства, современное состояние и перспективы развития	66
<i>Litovchenko I. Yu.</i>	
Structural steels for nuclear power engineering: microstructure, mechanical properties, state of the art and prospects for development	68

A9. Бойцов И. Е.

Методы механических испытаний материалов на их стойкость к водородному охрупчиванию 69

Boitsov I. E.

The mechanical testing methods to study material resistance to hydrogen embrittlement 70

A10. Чуканов А. Н., Яковенко А. А., Сергеев А. Н., Кутенов С. Н., Цой Е. В.

Низкотемпературное локализованное обезуглероживание конструкционных сталей в ходе водородного воздействия 71

Chukanov A. N., Yakovenko A. A., Sergeev A. N., Kutepov S. N., Tsoi E. V.

Low-temperature localized decarburization of structural steels during hydrogen exposure 73

A11. Канашенко С. Л.

Исследование структуры нержавеющей стали 12X18H10T, содержащей радиогенный гелий 75

Kanashenko S. L.

Research of the structure of stainless steel 12Cr18N10T containing radiogenic helium 75

С6. Ялышева А. В., Бойцов И. Е., Бучирин А. В., Малков И. Л., Мусяев Р. К.

Исследование воздействия водорода и термической обработки на структуру нержавеющей стали 316L, полученной методом послойного лазерного сплавления 76

Yalysheva A. V., Boitsov I. E., Buchirin A. V., Malkov I. L., Musyaev R. K.

Research of hydrogen and thermal treatment effect on the structure of stainless steel 316L obtained using the layer-by-layer laser sintering 77

3. Гидриды и гидридные превращения**3. Hydrides and hydride transformation****С7. Эльман Р. Р., Кудияров В. Н., Курдюмов Н. Е.**

Сорбция и десорбция водорода композитами на основе гидрида магния и наноструктурных каталитических добавок 80

Elman R. R., Kudiiarov V. N., Kurdyumov N. E.

Sorption and desorption of hydrogen by composites based on magnesium hydride and nanostructured catalysts 81

С8. Крот П. А., Вербецкий В. Н., Терешина И. С.	
Взаимодействие водорода с некоторыми высокоэнтропийными сплавами	83
<i>Krot P. A., Verbetsky V. N., Tereshina I. S.</i>	
Hydrogen interaction with certain high-entropy alloys	85
С9. Веселова С. В., Вербецкий В. Н., Терешина И. С.	
Влияние водорода на структуру и магнитные свойства интерметаллических соединений $\text{Sm}_2(\text{Fe}, \text{Al})_{17}$	87
<i>Veselova S. V., Verbetsky V. N., Tereshina I. S.</i>	
Effect of hydrogen on the structure and magnetic properties of intermetallic compounds $\text{Sm}_2(\text{Fe}, \text{Al})_{17}$	89
С10. Романов И. А., Еронин А. А., Казаков А. Н.	
Влияние электростатического поля на взаимодействие интерметаллического соединения состава $\text{LaNi}_{4.4}\text{Al}_{0.3}\text{Fe}_{0.3}$ с водородом	90
<i>Romanov I. A., Eronin A. A., Kazakov A. N.</i>	
Electrostatic field influence on interaction of intermetallic compound $\text{LaNi}_{4.4}\text{Al}_{0.3}\text{Fe}_{0.3}$ with hydrogen	91
С11. Курганская А. А., Терешина И. С., Вербецкий В. Н.	
Влияние гидрирования на тип магнитных фазовых переходов в соединениях $\text{R}(\text{Ni}, \text{Si})$	93
<i>Kurganskaya A. A., Tereshina I. S., Verbetsky V. N.</i>	
The influence of hydrogenation on the type of magnetic phase transition in $\text{R}(\text{Ni}, \text{Si})$ compounds	95
С12. Военнов А. В., Хапов А. С., Чеканов С. В.	
Анализ влияния концентрации радиогенного гелия на структуру тонких плёнок титанового гидрида	97
<i>Voennov A. V., Kharov A. S., Chekanov S. V.</i>	
Analysis of radiogenic helium concentration effect on the structure of titanium hydride thin films	98
С13. Анжигатова Е. Д., Кудияров В. Н., Эльман Р. Р., Лантес Р. С.	
Применение источника позитронов на основе Cu-64 для in-situ исследований композитных материалов накопителей водорода	99
<i>Anzhigatova E. D., Kudiyarov V. N., Elman R. R., Laptev R. C.</i>	
Application of Cu-64 -based positron source for in-situ investigation of hydrogen storage composite materials	100

4. Аппаратура и методы исследования

4. Equipment and research methods

A12. Николаев Е. Н.

Масс-спектрометрия ультравысокого разрешения 104
Nikolaev E. N.

Mass spectrometry of ultrahigh resolution 104

A13. Канащенко С. Л.

Современная электронная микроскопия 105
Kanashenko S. L.

Modern electron microscopy 105

A14. Кутеев Б. В.

Материалы гибридных систем синтез-свойства и проблемы 106
Kuteev B. V.

Materials for fusion-fission hybrids-properties and problems 107

A15. Ананьев С. С.

Топливный дейтерий-тритиевый цикл термоядерного реактора 109
Ananyev S. S.

Fuel deuterium-tritium cycle of a controlled fusion reactor 113

A16. Крат С. А., Пришвицын А. С., Ефимов Н. Е., Алиева А. И., Подolyako Ф. С., Мельников А. В., Гаспарян Ю. М.

Создание научных установок среднего масштаба на примере
 опыта учебно-демонстрационного токамака МИФИСТ 117

*Krat S. A., Prishvitsyn A. S., Efimov N. E., Alieva A. I.,
 Podolyako F. S., Melnikov A. V., Gasparyan Yu. M.*

Creation of medium-scale scientific installations on the example of the
 experience of the education and demonstration tokamak МЕРНIST 119

A17. Трифонов С. А.

Ускорители ионов и изотопов водорода для материаловедческих
 исследований 122
Trifonov S. A.

Ion and hydrogen isotope accelerators for materials science research 124

A18. Розенкевич М. Б.

Термодинамика и кинетика процессов разделения изотопов
 водорода физико-химическими методами 126
Rozenkevich M. B.

Thermodynamics and kinetics of hydrogen isotope separation
 by physical-chemical methods 127

A19. Растунова И. Л.

Теоретические основы процессов разделения изотопов легких элементов 129

Rastunova I. L.

Theoretical foundations of processes of isotope separation of light elements 130

B4. Мусяев Р. К.

Водородопроницаемость мембранных образцов стали, полученных аддитивным ПЛС-методом 132

Musyaev R. K.

Hydrogen permeability of the membrane samples obtained using the additive LLS method 133

B5. Черкез Д. И., Степанов Н. О., Ананьев С. С., Спицын А. В.

Установки для исследования взаимодействия плазмы с материалами ЛВГПМ НИЦ «Курчатовский институт» 135

Cherkez D. I., Stepanov N. O., Ananiev S. S., Spitsyn A. V.

Installations for plasma-material interaction investigation in LIGPM National Research Center «Kurchatov Institute» 137

B6. Алексеев И. А., Васянина Т. В., Федорченко О. А., Уборский В. В.

Тяжелая вода. Применение и получение 139

Alekseev I. A., Fedorchenko O. A., Vasyanina T. V., Uborsky V. V.

Heavy water. Application and obtaining 140

C14. Кошлань В. И., Ананьев С. С.

Solps – инструмент для моделирования поведения изотопов водорода в пристеночной области токамака 141

Koshlan V. I., Ananyev S. S.

Solps as a tool for hydrogen isotopes transport simulation in the scrap-off layer a tokamak 143

C15. Жмуровский А. В., Буряк Е. В., Мусяев Р. К., Тихонов В. В., Рыжухина А. В.

Установка для определения коэффициента теплопроводности порошковых материалов при высоких температурах и давлениях 145

Zhmurovsky A. V., Buryak E. V., Musyaev R. K., Tikhonov V. V., Ryzhukhina A. V.

The facility for defining the powder material heat conductivities at high temperatures and pressures 146

C16. Эльман Р. Р., Кудияров В. Н., Курдюмов Н. Е., Пушилина Н. С. Моделирование тепловых процессов в системе хранения водорода на основе магния/гидрида магния	147
<i>Elman R. R., Kudiiarov V. N., Kurdyumov N. E., Pushilina N. S.</i> Simulation of thermal processes in a hydrogen storage system based on magnesium/magnesium hydride	148
C17. Самарханов К., Батырбеков Э., Хасенов М., Кульсартов Т., Гордиенко Ю., Понкратов Ю., Тулубаев Е., Бочков В. Выделение высокоэнергетических ионов трития и α -частиц из приповерхностного слоя лития при нейтронном облучении в активной зоне ядерного реактора	150
<i>Samarkhanov K., Batyrbekov E., Khasenov M., Kulsartov T., Gordienko Yu., Ponkratov Y., Tulubayev Y., Bochkov V.</i> High-energy tritium ions and α -particles release from the near-surface layer of lithium during neutron irradiation in the nuclear reactor core	152
C18. Шишкова Т. А., Голубева А. В., Розенкевич М. Б. Методы детритизации материалов в термоядерных реакторах	154
<i>Shishkova T. A., Golubeva A. V., Rozenkevich M. B.</i> Methods of tritium removal from fusion reactor materials	155
C19. Пшеницын М. Б., Боева О. А. Низкотемпературная конверсия модификаций водорода и дейтеро-водородный обмен в процессах ожижения и разделения изотопов водорода криогенной ректификацией	157
<i>Pshenitsyn M. B., Boeva O. A.</i> Low-temperature conversion of hydrogen modifications and deuterium-hydrogen exchange in the processes of liquefaction and separation of hydrogen isotopes by cryogenic distillation	159
C20. Киселев С. С. Применение газовых центрифуг для разделения изотопов водорода (многокомпонентное разделение)	160
<i>Kiselev S. S.</i> The use of gas centrifuges for the separation of hydrogen isotopes (multicomponent separation)	162
C21. Рогожина М. А., Зарубина Е. Ю., Чугров И. А. Формирование монокристаллического слоя дейтерия в сферической оболочке	164
<i>Rogozhina M. A., Zarubina E. Yu., Chugrov I. A.</i> Formation of a single crystal layer of deuterium in a spherical shell	166

C22. <i>Зарубина Е. Ю., Рогожина М. А., Чугров И. А.</i> Диагностика параметров криогенного слоя изотопов водорода в мишени непрямого облучения	168
<i>Rogozhina M. A., Zarubina E. Yu., Chugrov I. A.</i> The parameter diagnostics of the cryogenic hydrogen isotope layer in the indirect irradiation target	170
C23. <i>Никитин А. А., Рогожкин С. В., Бобырь Н. П.</i> Использование атомно-зондовой томографии для локализации водорода и его изотопов в металлах и сплавах	172
<i>Nikitin A. A., Rogozhkin S. V., Bobyr N. P.</i> Quantification of hydrogen and its isotopes in metals and alloys using atom-probe tomography analysis methods	174
C24. <i>Нагорный С. В., Иванов Б., Иванова Н., Синяков М., Менишарапов Р., Фатеев В. Н.</i> Исследование влияния облучения на свойства протонообменной мембраны и параметры работы электрохимической ячейки	176
<i>Nagornyy S. V., Ivanov B. V., Ivanova N. A., Mensharapov R. M., Sinyakov M., Fateev V. N.</i> Study of radiation effects on the proton-exchange membrane properties and the electrochemical cell parameters	178
C25. <i>Растунова И. Л., Чеботов А. Ю., Вораксо И. А., Орехов А. В., Попов А. С.</i> Массообменные характеристики изотопного обмена водорода с водой в контактных устройствах мембранного типа с перфторированными сульфокатионитными мембранами	180
<i>Rastunova I. L., Chebotov A. Yu., Vorakso I. A., Orekhov A. V., Popov A. S.</i> Mass transfer characteristics of hydrogen isotope exchange with water in membrane contact devices with perfluorinated sulfonic cationic membranes	182
C26. <i>Масленникова О. Б., Капанадзе И. Е., Фадеева Е. В., Якунькова М. Л.</i> Разработка технологии регенерации палладия из порошковых систем	184
<i>Masslennikova O. B., Kapanadze I. E., Fadeeva E. V., Yakunkova M. L.</i> The development of the technology for palladium recovery from powder systems	185

A1–A5

ОБЩЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ЛЕКЦИИ

GENERAL LECTURES

НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ*Д. В. Бисикало*

ЭТАПЫ ЯДЕРНОГО СДЕРЖИВАНИЯ

О. А. Москалев

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

607188, г. Саров Нижегородской обл., пр-т Мира, 37

Юхимчук Аркадий Аркадьевич
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Заместитель начальника отделения
607188, Россия, г. Саров
Нижегородской обл.,
пр-т Мира, 37

Yukhimchuk Arkadiy
RFNC-VNIIEF

Deputy head separation
607188, Sarov,
Nizhny Novgorod region, Russia
arkad@triton.vniief.ru



**НАПРАВЛЕНИЕ «ФИЗИКА ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА»
НАЦИОНАЛЬНОГО ЦЕНТРА ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ.
НАУЧНАЯ ПРОГРАММА 2023-2025 ГОДОВ**

А. А. Юхимчук

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

607188, г. Саров Нижегородской обл., пр-т Мира, 37
arkad@triton.vniief.ru

Направление № 8 «Физика изотопов водорода» Национального центра физики и математики напрямую касается тематики проводимой Школы. В рамках данного Проекта предполагается проведение исследований по следующим Проектам:

- исследования в области взаимодействия изотопов водорода с твердым телом;
- фундаментальные исследования в области нейтринной физики и нейтроноизбыточных ядер с использованием изотопов водорода и гелия.

Основными целями проведения работ по этим Проектам является:

- развитие существующих и создание новых водородных технологий и технологий топливного цикла термоядерных устройств (хранения, разделения, очистки, транспортирования изотопов водорода);

- развитие методов исследований в области нейтринной физики и нейтронно-избыточных ядер с использованием изотопов водорода и гелия. Получение рекордных данных по электромагнитным свойствам нейтрино и изучение свойств легких нейтроноизбыточных ядер, находящихся за границей нейтронной стабильности – фактически изучение свойств нейтронной материи.

В лекции приводится научная программа работ 2023–2025 годов по направлению «Физика изотопов водорода», обсуждаются проблемные вопросы и возможные пути их решения.

**THE SCIENTIFIC AREA «HYDROGEN ISOTOPE PHYSICS»
OF THE NATIONAL CENTER OF PHYSICS AND MATHEMATICS.
SCIENTIFIC PROGRAM FOR 2023-2025**

A. A. Yukhimchuk

The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute
of Experimental Physics, 607188, Bld. 37, Mira Ave., Sarov, Russia
arkad@triton.vniief.ru

Scientific area #8 «Hydrogen Isotope Physics» of the National Center of Physics and Mathematics concerns directly with the topics of our School. Under this umbrella research embraced by the following projects is planned, namely:

Studies of hydrogen isotope interaction with solids;

– Fundamental neutrino and neutron-excessive nuclei physics, using hydrogen and helium isotopes.

The main goals of the aforementioned projects are:

- Development of existing and conception of new hydrogen technologies and nuclear fuel technologies for fusion applications (storage, separation, purification and transportation of hydrogen isotopes);

- Development of research methods in the area of neutrino and neutron-excessive nuclei physics, using hydrogen and helium isotopes. Obtaining of record data on neutrino electromagnetic properties and research of properties of

light neutron-excessive nuclei beyond the neutron stability boundary, factually, the research of neutron matter.

The lecture cites the scientific program for 2023–2025 in the area «Hydrogen Isotope Physics», discusses problematic tasks and possible ways of addressing them.

ПОДХОДЫ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ МАТЕРИАЛОВ

В. Н. Чувильдеев

Россия, г. Нижний Новгород, НИФТИ ННГУ им. Н. И. Лобачевского

Рассмотрены основные концепты материаловедения и их связь. Обсуждаются проблемы инженерного языка материаловедения. Обозначены и анализируются проблемы построения карт инженерных, технологических и эксплуатационных свойств. Обсуждается постановка задач проектирования материалов.

Кратко рассмотрены «языки» проектирования и метапроектирования: язык форм, язык потоков и язык паттернов.

Мельников Сергей Александрович

АО «ВНИИХТ»

Научный руководитель направления
«Металлургия»111524, РФ, г. Москва, ул. Электродная,
д. 2, стр. 1Редкоземельные металлы, сплавы-
накопители водорода, системы хранения
водорода, электролиз**Sergey Melnikov**

JSC «VNIINT»

Scientific supervisor of «Metallurgy» field
111524 1Moskva, 2-nd Elektrodnyaya str., 2/1
Rare-earth metals, hydrogen-absorbing alloys,
hydrogen storage systems, electrolysis
SeAlMelnikov@rosatom.ru**РЕДКИЕ И РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫЕ МЕТАЛЛЫ
В ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМ РАЗВИТИИ СОВРЕМЕННЫХ
ОТРАСЛЕЙ ЭКОНОМИКИ***С. А. Мельников*

АО «ВНИИХТ», г. Москва

Особенности электронной структуры РЗМ определяют физико-химические характеристики соединений с переходными металлами подгруппы железа. В частности, в 1960-х годах появились сплавы на основе соединения SmCo_5 , которое имело рекордные магнитные свойства в качестве материала для постоянных магнитов. На Московском заводе полиметаллов было организовано производство металлического самария, которое в 1995–1997 гг. на основании результатов исследований было подвергнуто глубокой модернизации.

С середины 80-х годов прошлого столетия в рамках программы конверсии атомной отрасли АО «ВНИИХТ» включился в разработку технологии получения исходного сырья для магнитов из сплавов системы Nd-Fe-B. Выполняя серию НИОКР на созданных на предприятиях отрас-

ли: СХМПО (г. Силламяэ), ПО «ПХЗ» (г. Днепродзержинск), ПГМК (г. Шевченко), МЗП (г. Москва), опытно-промышленных участках по производству металлических РЗМ и спеченных магнитов, сотрудниками АО «ВНИИХТ» были разработаны и внедрены в производство технологии выпечного получения лигатуры РЗМ-Fe, где РЗМ – это смесь неодима и празеодима с соотношением концентраций Nd: Pr=1,0...20,0, мишметалла с повышенным содержанием Nd и Pr. В это же время была разработана опытно-промышленная технология получения СТРЗМ (Dy, Tb, Y, Er, Dy-Fe, Tb-Fe). На этом редкоземельном сырье были отработаны режимы получения спеченных магнитов R-Fe-B.

В производстве постоянных магнитов РЗМ-Fe-B используется технология водородного диспергирования для повышения магнитных свойств спеченных магнитов. Водородное диспергирование металлического урана применимо для получения спеченных таблеток из моонитрида урана.

Выполняя поисковые НИР в рамках проектов МОН, в рамках программы АКМ и Стратегические материалы, ЕОП ГК «Росатом», Комплексной программы РТТН сотрудниками АО «ВНИИХТ при тесном сотрудничестве с коллективами специалистов НИТУ «МИСиС», НИЦ «КИВИАМ», ИМЕТ РАН разрабатываются новые экономичные технологии:

- получения металлической продукции на основе тугоплавких металлов в том числе из техногенных источников сырья,
- переработки отходов магнитных материалов с последующим получением оксидов редкоземельных элементов (РЗЭ),
- получения базовых лигатур редкоземельных металлов для производства постоянных магнитов РЗМ – Fe – В.

RARE AND RARE-EARTH METALS IN THE TECHNOLOGICAL DEVELOPMENT OF MODERN INDUSTRIES

S. A. Melnikov

JSC «VNIINT», Russia, Moscow

The electronic structure of rare-earth metals (REM) determines the physicochemical characteristics of compositions based on the transition metals of the iron subgroup. In particular, alloys based on the SmCo₅ compound appeared in the 1960s. That material for permanent magnets demonstrated record magnetic

properties. Manufacturing of metallic samarium was organized at the Moscow Plant of polymetals, which was subjected to profound modernization due to recent research results in 1995–1997.

From the mid 1980's JSC «VNIИHT» was involved in the development of the technology for manufacturing of initial materials for Nd-Fe-B alloyed magnets within the framework of the nuclear industry conversion program. A series of R&D projects were carried out at the industrial enterprises: SHMPO (Sil-lamae), PA «PHZ» (Dneprodzerzhinsk), PGMK (Shevchenko), MZP (Moscow). (Moscow) and pilot plots for production of REM and sintered magnets. The JSC «VNIИHT» researchers developed and implemented into production technologies of out-of-furnace production of REM-Fe alloy consisted of mixture of neodymium and praseodymium with the ratio of Nd:Pr = 1.0...20.0, and mishmetal with high content of Nd and Pr. A pilot technology for production of heavy REM (Dy, Tb, Y, Er, Dy-Fe, Tb-Fe) was developed at the same time. Initial rare-earth raw materials obtained by this technology were utilized to find out regimes for sintered REM-Fe-B magnets production.

Hydrogen dispersion technology uses for REM-Fe-B permanent magnets production to enhance magnetic properties. Hydrogen dispersion of metallic uranium is applicable to the production of sintered uranium mononitride pellets.

The JSC «VNIИHT» researchers work in close cooperation with specialists from NUST «MISIS», RDE «KI-VIAM», IMET RAN to perform R&D projects within the framework of RTTN, MON, AKM and Strategic Materials Program, EOTP of GK «Rosatom» and to develop new cost-effective technologies for:

- obtaining of metal products based on refractory metals, including from man-made sources of raw materials,
- waste magnetic materials recycling with subsequent production of rare-earth element (REE) oxides,
- obtaining of basic rare-earth metals ligatures for the production of permanent magnets REM-Fe-B.

Секция 1

A6–A7, B1–B3, C1–C5

**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**

Заика Юрий Васильевич

Карельский научный центр РАН
Зам. генерального директора КарНЦ РАН
по научно-организационной работе
185910, Республика Карелия,
г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, 11,
КарНЦ РАН

Математическая теория управления, обратные задачи математической физики, моделирование взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами

Yury Zaika

Karelian Research Centre RAS
Deputy Director General for Research
Administration

11 Pushkinskaya St., Petrozavodsk, 185910, Karelia
Mathematical control theory, inverse problems of mathematical physics, modelling of hydrogen interaction with structural materials
zaika@krc.karelia.ru

**МЕТОД СОПРЯЖЕННЫХ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ ОЦЕНКИ ПАРАМЕТРОВ ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТИ И ТЕРМОДЕСОРБЦИИ**

Ю. В. Заика

Карельский научный центр РАН

В лекции анализируются некоторые краевые задачи взаимодействия изотопов водорода с конструкционными материалами. Задачи соответствуют экспериментальным методам проницаемости и термодесорбционной спектроскопии. Классические модели содержат краевые условия первого рода (когда задаются концентрации в приповерхностном объеме), второго (задаются потоки) и третьего («смесь» 1–2 рода). Отличительной особенностью рассматриваемых нелинейных моделей является учет динамики поверхностных процессов сорбции/десорбции и растворения во

взаимодействии с диффузионными процессами в объеме. Эти процессы существенно разнородные. По этой причине такие системы относятся к классу жестких и требуют разработки специализированного программного обеспечения. Помимо этого, наличие производных по времени от поверхностных концентраций приводит к необходимости классифицировать такие модели как системы с последствием нейтрального типа (в рамках общей теории функционально-дифференциальных уравнений), которые существенно сложнее «обычных». Доказаны соответствующие теоремы существования и единственности решений таких краевых задач, что означает их математическую корректность. Их практическая «полезность» выявляется при сопоставлении с экспериментом.

Следующий шаг состоит в параметрической идентификации моделей по экспериментальным данным. Это уже обратные задачи математической физики, для которых характерна высокая чувствительность к различного рода погрешностям во входных данных. Многопараметрические модели обычно позволяют с достаточной точностью аппроксимировать экспериментальные кривые. Но это чревато неединственностью набора параметров, что, в частности, может привести к некорректности пересчета результатов с тонких лабораторных мембран на реальные конструкции. Необходимо сопоставлять сложность модели с информативностью конкретного экспериментального метода.

Гарантировать единственность набора параметров аппроксимации в нелинейных краевых задачах чрезвычайно сложно. Но следует по крайней мере стремиться к уменьшению размерности обратной параметрической задачи. В лекции представлен один из возможных подходов – так называемый метод сопряженных уравнений.

ADJOINT EQUATION METHOD FOR ESTIMATION OF HYDROGEN PERMEABILITY AND THERMAL DESORPTION PARAMETERS

Yu. V. Zaika

Karelian Research Centre RAS

The lecture analyzes some boundary-value problems of interaction of hydrogen isotopes with structural materials. The problems correspond to the experimental methods of permeability and thermal desorption spectrometry. Clas-

sical models contain boundary conditions of the first (when the concentrations in the near-surface bulk are given), the second (flows are given), and the third kind (a mix of the 1st and 2nd kinds). A distinctive feature of the nonlinear models examined is that the dynamics of surface processes of sorption/desorption and dissolution are considered in a crosstalk with diffusion processes in the bulk. The velocities of these processes are significantly different. Therefore, such systems are described as rigid and require the development of specialized software. In addition, given the presence of time derivatives of surface concentrations, such models are to be classified as systems with a neutral-type aftereffect (within the framework of the general theory of functional differential equations), which are far more complicated than «ordinary» ones. The corresponding existence and uniqueness theorems for solutions of such boundary-value problems have been proved, which means that they are mathematically correct. Their practical «usefulness» is revealed by comparison with the experiment.

The next step is the parametric identification of the models based on experimental data. Here we deal with inverse problems of mathematical physics, which are highly sensitive to various kinds of errors in the input data. Multi-parameter models usually provide sufficiently accurate approximations of experimental curves. However, there is a risk of getting a non-unique set of parameters, which may, in particular, lead to incorrect translation of the results from thin laboratory membranes to real structures. The complexity of the model has to match the information content of the given experimental method.

It is extremely difficult to ensure the uniqueness of the set of approximation parameters in nonlinear boundary-value problems. Nonetheless, one should at least strive to reduce the dimensions of the inverse parametric problem. The lecture presents one of the possible approaches, the so-called adjoint equation method.

Голубева Анна Владимировна
НИЦ «Курчатовский институт»
Начальник лаборатории
Россия, Москва,
пл. Академика Курчатова, д. 1
Водород, материалы, ТЯР

Golubeva Anna Vladimirovna
NRC Kurchatov Institute
Head of laboratory
Russia, Moscow,
sq. Academician Kurchatov, 1
Hydrogen, materials, fusion
Golubeva_av@nrcki.ru



ПРОБЛЕМА ВЫБОРА МАТЕРИАЛОВ ПЕРВОЙ СТЕНКИ ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ

А. В. Голубева

НИЦ «Курчатовский институт»

Термоядерный реактор – установка, в которой протекает реакция синтеза тяжелых изотопов из более легких с выделением энергии. В первую очередь будет реализована реакция на смеси тяжелых изотопов водорода:



В докладе рассматриваются проблемы выбора материалов термоядерного реактора.

К обращенным к плазме (ОПМ) и конструкционным (КМ) материалам термоядерных реакторов (ТЯР) выдвигаются требования:

- высокой теплопроводности;
- стабильности термомеханических свойств в экстремальных условиях термоядерного реактора (облучение нейтронами с энергией $\leq 14,1$ МэВ, высокие потоки тепла);
- быстрого спада наведенной активности.

ОПМ, помимо этого, должны быть устойчивы при воздействии плазменного облучения, а их примесь в плазме, появляющаяся в результате распыления, не должна заметно охлаждать плазму.

Кроме того, желательно, чтобы накопление радиоактивного трития в материалах ТЯР и потоки трития сквозь материалы за пределы камеры реактора были как можно меньше. Перечисленным требованиям удовлетворяют очень немногие материалы. В качестве ОПМ в настоящий момент рассматривают Вe, С и углеродные композитные материалы, Li, W, в качестве КМ – аустенитные стали, ферритно-мартенситные стали со сниженной активацией, сплавы V-Cr-Ti. В работе рассмотрены достоинства и недостатки потенциальных материалов ТЯР и проблемы выбора материалов для проектов энергетического ТЯР и термоядерного источника нейтронов (ТИН).

Работа выполнена в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 8 «Физика изотопов водорода».

PROBLEM OF CHOOSING MATERIALS FOR THE FIRST WALL OF FUSION REACTORS

A. V. Golubeva

NRC «Kurchatov Institute»

A fusion reactor is an installation where the reaction of synthesis of heavy isotopes from lighter ones proceeds with the release of energy. First of all, the reaction will be carried out on a mixture of heavy hydrogen isotopes:



The report discusses the problem of choosing materials for fusion reactors.

The following requirements are put forward for plasma-facing (PFM) and structural (SM) materials of fusion reactors:

- high thermal conductivity,
- stability of thermomechanical properties under extreme conditions of a fusion reactor (irradiation with neutrons with an energy of up to 14,1 MeV, high heat fluxes),
- rapid decline in induced activity.

PFM, in addition, must be stable under the plasma irradiation, and their admixture in the plasma, which appears as a result of spattering, should not noticeably cool the plasma.

In addition, it is desirable that the accumulation of radioactive tritium in the FR materials and the flows of tritium through the materials outside the reactor chamber should be as small as possible. Very few materials meet the listed requirements. Currently, Be, C and carbon composite materials, Li, W are considered as PFM, while austenitic steels, ferritic–martensitic steels with reduced activation, V-Cr-Ti alloys are considered as SM. The advantages and disadvantages of the potential materials of FR and the problems of choosing materials for projects of energy FR and fusion neutron source (FNS) are discussed.

The work was carried out within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, direction No. 8 «Physics of hydrogen isotopes».

Родченкова Наталья Ивановна

Институт прикладных математических исследований Карельского научного центра РАН
Старший научный сотрудник
185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск,
ул. Пушкинская, 11, ИПМИ КарНЦ РАН
Математическое моделирование физических процессов, численные методы решения краевых задач математической физики

Natalia Rodchenkova

Institute of Applied Mathematical Research,
Karelian Research Centre RAS
Senior Researcher

11 Pushkinskaya St., Petrozavodsk, 185910, Karelia
Mathematical modeling of physical processes, numerical methods for solving boundary-value problems in mathematical physics
nirodchenkova@krc.karelia.ru

**РАЗНОСТНАЯ СХЕМА РЕШЕНИЯ НЕЛИНЕЙНОЙ КРАЕВОЙ ЗАДАЧИ ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТИ С ДИНАМИЧЕСКИМИ ГРАНИЧНЫМИ УСЛОВИЯМИ**

Ю. В. Заика¹, Н. И. Родченкова²

¹ Карельский научный центр РАН

² Институт прикладных математических исследований КарНЦ РАН

Интерес к взаимодействию изотопов водорода с конструкционными материалами вызван, в частности, проблемами защиты от водородной коррозии и перспективами водородной энергетики. Рассматривается нелинейная краевая задача, соответствующая следующему эксперименту. Нагретая до достаточно высокой температуры мембрана служит перегородкой вакуумной камеры. После предварительного вакуумирования на входной стороне создается постоянное давление газообразного водорода. С выходной стороны в условиях вакуумирования определяется проникающий поток. Для некоторых материалов и определенных условий экспе-

римента (см., например, работу [1]) наблюдается немонотонный характер установления выходного потока водорода.

Стадия снижения потока характеризуется относительно большой длительностью и малой скоростью. Нарастание концентрации растворенного атомарного водорода до определенного уровня приводит к постепенному замедлению диффузии. В таких условиях принята линейная модель зависимости коэффициента диффузии от концентрации. По температуре зависимость в соответствии с законом Аррениуса. Такие задачи хорошо изучены, но в рамках стандартных граничных условий. На выходной стороне в приповерхностном объеме принимается нулевая концентрация диффузанта. На входе обычно считается, что практически мгновенно (при относительно большом давлении) концентрация достигает локально равновесного уровня, пропорционального корню из давления (закон Сивертса).

Существенным недостатком такой модели является то, что из рассмотрения исключается динамика поверхностных процессов растворения и сорбции-десорбции. В представленной работе эти процессы учтены в форме нелинейных динамических граничных условий: записаны дифференциальные уравнения для поверхностных концентраций атомарного водорода. Тем самым, производная по времени участвует не только в диффузионном уравнении, но и в граничных условиях. Это существенно усложняет краевую задачу. Если иметь в виду общую теорию функционально-дифференциальных уравнений, то подобные задачи относятся к так называемому нейтральному типу и требуют развития более сложного математического аппарата.

В работе представлен итерационный вычислительный алгоритм решения нелинейной краевой задачи на основе неявных разностных схем и приведены результаты численного моделирования. После верификации модели на конкретных экспериментальных данных можно уже численно моделировать различные ситуации (например, реакцию на скачкообразный ступенчатый характер входного давления), экономя на экспериментальных затратах.

ЛИТЕРАТУРА

1. Varaban A. et al. *Int. J. Hydrog. Energy* 27492-27498 (2019) 44(50).

DIFFERENCE SCHEME FOR SOLVING A NONLINEAR BOUNDARY-VALUE PROBLEM OF HYDROGEN PERMEABILITY WITH DYNAMICAL BOUNDARY CONDITIONS

Yu. V. Zaika¹, N. I. Rodchenkova²

¹ Karelian Research Centre RAS

² Institute of Applied Mathematical Research, KarRC RAS

Studies on the interaction of hydrogen isotopes with structural materials are mainly necessitated by problems in the protection of metals against hydrogen corrosion and development of the hydrogen energy industry. We consider the nonlinear boundary-value problem corresponding to the following experiment. A membrane heated to a sufficiently high temperature served as the partition in the vacuum chamber. Degassing was performed in advance. A constant pressure of hydrogen gas was built up at the inlet side. The penetrating flux was determined by mass-spectrometry in the vacuum maintained at the outlet side. For some materials and certain experimental conditions (see, for example, article [1]), establishment of the hydrogen output flux has a nonmonotonic shape.

The flux declining stage is characterized by a relatively long duration and low velocity. When the concentration of dissolved atomic hydrogen reaches a certain level, the diffusion begins to slow down gradually. A linear model of the dependence of the diffusion coefficient on concentration is adopted under such conditions. The temperature dependence conforms to the Arrhenius law. Such problems are well studied, but within the framework of standard boundary conditions. On the outlet side, the concentration of the diffusant in the near-surface bulk is assumed to be zero. At the inlet one, it is usually assumed that the concentration almost instantly (given relatively high pressure) reaches a local equilibrium level proportional to the root of the pressure (Siverts' law).

A significant drawback of this model is that the dynamics of surface processes of dissolution and sorption-desorption is left out of consideration. In the present study, these processes are taken into account in the form of nonlinear dynamic boundary conditions: differential equations are written for the surface concentrations of atomic hydrogen. Thus, the time derivative is involved not only in the diffusion equation, but also in the boundary conditions. This makes the boundary value problem significantly more complicated. If we keep in mind the general theory of functional differential equations, then such problems are of the so-called neutral type and require the development of a more complex mathematical technique.

The paper presents an iterative computational algorithm for solving a non-linear boundary-value problem based on implicit difference schemes and presents the results of numerical simulations. After the model has been verified using specific experimental data, it becomes possible to numerically simulate various situations (for example, the reaction to an abrupt stepwise pattern of the inlet pressure) while saving on experimental costs.

REFERENCES

1. Baraban A. et al. *Int. J. Hydrog. Energy* 27492-27498 (2019) 44(50).

Костикова Екатерина Константиновна
ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр РАН»
Старший научный сотрудник лаборатории
Моделирования природно-технических систем
Института прикладных математических
исследований
185910, г. Петрозаводск, ул. Пушкинская, д. 11
Математическое моделирование физических
процессов, численные методы решения краевых
задач математической физики

Ekaterina Kostikova

Karelian Research Centre of the Russian Academy
of Sciences

Senior Researcher in the Laboratory of Natural-
Technical System Modelling Institute of Applied
Mathematical Research

11 Pushkinskaya Street Petrozavodsk Karelia
185910, Russia

Mathematical modelling of physical processes,
boundary-value problems of mathematical physics,
numerical methods

kostikova@krc.karelia.ru



КАЧЕСТВЕННАЯ И ПАРАМЕТРИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ ДВУХПИКОВЫХ СПЕКТРОВ ТЕРМОДЕСОРБЦИИ ВОДОРОДА

Ю. В. Заика, Е. К. Костикова

ФГБУН ФИЦ «Карельский научный центр РАН»

Интерес к взаимодействию изотопов водорода с конструкционными материалами вызван, в частности, проблемами защиты от водородной коррозии и перспективами водородной энергетики. Одним из эффективных экспериментальных методов является термодесорбционная спектроскопия. Образец, предварительно насыщенный растворенным водородом при достаточно высокой температуре, медленно (на практике обычно линейно) нагревается в вакуумной камере. С помощью масс-спектрометра определяется поток дегазации. Зависимость потока от текущей темпера-

туры дает спектр термодесорбции. По этой информации судят о тех или иных характеристиках конструкционного материала, взаимодействующего с водородом. Спектр часто состоит из нескольких изолированных пиков. Их интерпретация и составляет задачу анализа спектра.

Обычно применяют следующую схему. Спектр разлагают на сумму гауссианов. Каждый из них интерпретируют как реакции первого или второго порядков, оперируя средней по объему концентрацией водорода и энергиями связи в различного рода ловушках (микроросты, границы зерен и другие неоднородности материала). Затем с помощью методики Киссинджера оценивают предэкспоненты (частотные множители) и энергии связи.

Численное моделирование (рассматривается нелинейная диффузионная краевая задача с динамическими граничными условиями для поверхностной концентрации) показывает, что возможен и другой сценарий. Для определенности будем иметь в виду дегазацию тонкой пластины. Сначала по мере нагрева происходит десорбция с поверхности и из приповерхностного объема (первый пик). Температура растет и у поверхности сформирован большой градиент концентрации. Происходит существенная активизация диффузии из объема к поверхности и наблюдается повторный всплеск дегазации.

Прежде, чем переходить к параметрической идентификации, нужно физически обосновать сам сценарий (на основе имеющихся экспериментальных данных). С математической точки зрения возникает задача: как по спектру понять, какому из вариантов следует отдать предпочтение? Многопиковый спектр очень трудно однозначно интерпретировать, поскольку реально имеет место наложение многих вариантов, не только указанных двух.

В работе для определенности рассмотрены спектры для хорошо изученных металлических материалов. Применяются обе модели для аппроксимации спектров. Затем проводится серия вычислительных экспериментов (меняется толщина пластины, скорость нагрева, начальная концентрация насыщения, закон нагрева (например, со ступенчатым изменением скорости нагрева),...). Накопленный вычислительный материал позволяет понять, какой из дополнительных экспериментов следует провести, чтобы окончательно выбрать модель и провести уже ее параметрическую идентификацию. Для «чистых» металлов вероятнее второй сценарий, а для «пористых» — первый. В работе представлены рекомендации, как экспериментально отличить указанные модели термодесорбции.

**QUALITATIVE AND PARAMETRIC IDENTIFICATION
OF TWO-PEAK HYDROGEN THERMAL DESORPTION SPECTRA**

Yu. Zaika, E. Kostikova

Karelian Research Centre of the Russian Academy of Sciences

Various mathematical models are used in the study of multi-peak thermal desorption spectra of hydrogen isotopes from structural materials. In the article we will focus on two models: 1) in the form of superposition of first- and second-order reactions for volume-averaged concentrations, and 2) on a distributed model in the form of a nonlinear boundary value problem with dynamic boundary conditions reflecting processes in the volume and on the surface of the material. When identifying the spectra, it is necessary to first identify the physico-chemical causes of various thermal desorption peaks and only after that evaluate the kinetic parameters of a physically based model.

Сидоров Николай Иванович
ИМЕТ УрО РАН, г. Екатеринбург
ст.н.с.

620016, г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101
Взаимодействие водорода с конструкционными
и функциональными материалами

Nikolay Sidorov
IMET Ural Branch RAS, Yekaterinburg
senior researcher
620016, Yekaterinburg, 101 Amundsen str.
Interaction of hydrogen with structural
and functional materials
n_sidorov@mail.ru



КИНЕТИКА ПРОНИКНОВЕНИЯ ВОДОРОДА СКВОЗЬ ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫЕ СПЛАВЫ

Н. И. Сидоров¹, А. А. Ремпель¹, И. С. Сунатов¹, В. А. Пивень²

¹ Институт металлургии УрО РАН, г. Екатеринбург

² Краснодарское высшее военное авиационное училище летчиков,
им. Героя Советского Союза А. К. Серова, г. Краснодар

Массовое производство водорода высокой чистоты необходимо для удовлетворения будущего спроса на водород, который, как ожидается будет быстро расти в ближайшие годы в областях нефтехимической переработки, транспорта с низким уровнем выбросов и производства электроэнергии.

Задача получения дешевого водорода высокой чистоты в промышленном масштабе требует разработки высокопроизводительных мембран.

Существует высокий спрос на недорогие металлические мембраны с минимальным содержанием или полным отсутствием драгметаллов, но обладающие столь же высокой водородопроницаемостью, пластичностью и стойкостью к водородному охрупчиванию. Водородно-селективные мембраны, сформированные из сплавов с ОЦК структурой, показывают очень высокие коэффициенты водородопроницаемости, но они подвержены хрупкому разрушению из-за чрезмерного поглощения водорода. Пока

проблемы, связанные с этим, не преодолены, эти материалы не обеспечивают жизнеспособную альтернативу мембранам на основе палладия.

В последнее время высокоэнтропийные сплавы (ВЭС) привлекают все большее внимание как новый класс потенциальных материалов для водородной энергетики. По сравнению с обычными бинарными или тройными сплавами, ВЭС обладают необычными свойствами, обусловленными искажением решетки, возникающими вместе с разнообразием и количеством включенных элементов (пять или более основных элементов, каждый из которых имеет определенный размер). Локальная среда для каждого атома различна, что может привести к искажению решетки, которая в конечном итоге обеспечивает более подходящие места внедрения и пути диффузии для атомов водорода, что приводит к многообещающим свойствам для материалов водородной энергетики.

Нами проведен анализ различия кинетики водорода в изучаемых сплавах. Полученные результаты обсуждаются с точки зрения возможности использования сплава Hf-Zr-Ni-Cu-Co в качестве диффузионного фильтра для получения водорода высокой чистоты. Особое внимание уделено проблеме использования сплава Ti-Zr-Nb-Hf-Ta для хранения водорода.

KINETICS OF HYDROGEN PENETRATION THROUGH HIGH-ENTROPY ALLOYS

N. I. Sidorov¹, A. A. Rempel¹, I. S. Sipatov¹, V. A. Piven²

¹ Institute of Metallurgy of the UB of the RAS, Yekaterinburg

² Krasnodar Higher Military Aviation School of Pilots named after the Hero of the Soviet Union

A. K. Serov, Krasnodar

The mass production of high purity hydrogen is necessary to meet the future demand for hydrogen, which is expected to grow rapidly in the coming years in the fields of petrochemical refining, low-emission transport and power generation.

The task of obtaining cheap high-purity hydrogen on an industrial scale requires the development of high-performance membranes.

There is a high demand for inexpensive metal membranes with minimal or no precious metals, but with equally high water permeability, plasticity and resistance to hydrogen embrittlement. Hydrogen-selective membranes formed from alloys with a BCC structure show very high water permeability coefficients, but they are susceptible to brittle failure due to excessive absorption of hydrogen. Until the problems associated with this are not overcome, these materials are not a viable alternative to palladium-based membranes.

Recently, high-entropy alloys have attracted increasing attention as a new class of potential materials for hydrogen energy. Recently, high-entropy alloys (HEAs) have attracted increasing attention as a new class of potential materials for hydrogen energy. Compared to conventional binary or ternary alloys, high-entropy alloys have unusual properties due to lattice distortion that occur together with the variety and number of elements included (five or more basic elements, each of which has a certain size). The local environment is different for each atom, which can lead to a distortion of the lattice, which ultimately provides more suitable insertion sites and diffusion paths for hydrogen atoms, which leads to promising properties for hydrogen energy materials.

We have analyzed the differences in the kinetics of hydrogen in the examined alloys. The obtained results are discussed from the point of view of the possibility of using the Hf-Zn-Ni-Cu-Co alloy as a diffusion filter for producing high-purity hydrogen. Special attention is paid to the problem of using alloy Ti-Zr-Nb-Hf-Ta for storing hydrogen.

Персианова Анастасия Павловна

НИЦ «Курчатовский институт»

Лаборант-исследователь

123182, Россия, Москва,

пл. Академика Курчатова, д. 1

Изотопы водорода, обращенные

к плазме материалы

Persianova Anastasia

NRC Kurchatov Institute

Research assistant

123182, Russia, Moscow, Ac. Kurchatov sq., 1

Hydrogen isotopes, plasma-facing materials

Persianova_AP@nrcki.ru

**ТИПЫ ЛОВУШЕК ВОДОРОДА В ВОЛЬФРАМЕ: ОБЗОР***А. П. Персианова, А. В. Голубева*

Научно-исследовательский центр «Курчатовский институт»

В термоядерных реакторах (ТЯР) защитная облицовка вакуумной камеры и дивертора будет подвергаться воздействию интенсивных потоков тепла и частиц (ионов, нейтралов перезарядки, нейтронов). Благодаря высокой температуре плавления, высокой теплопроводности, низкому коэффициенту распыления вольфрам на сегодняшний день – один из наиболее популярных обращенных к плазме материалов ТЯР [1]. Водород в вольфраме может быть либо растворенным, либо захваченным в дефекты кристаллической решетки металла (так называемые «ловушки»). Количество водорода, захваченного в вольфрам, очень важно прогнозировать и снижать, так как в ТЯР будет осуществлена D-T реакция на смеси тяжелых изотопов водорода, а тритий радиоактивен. Для этого необходимо иметь представление об основных типах ловушек водорода в вольфраме. Данный доклад представляет собой обзор опубликованной в литературе информации об экспериментально исследованных ловушках водорода в вольфрамовых материалах.

Типы ловушек различаются между собой энергией связи атома водорода с данной ловушкой [2]. Ловушки могут быть созданы в образцах ис-

кусственно с помощью облучения высокоэнергетичными ионами или нейтронами теплового спектра. Так поступают, в том числе, чтобы сымитировать микроструктуру вольфрама, поврежденного облучением нейтронами термоядерного спектра. Основными методами исследования захвата водорода в вольфрам являются термодесорбционная спектроскопия, масс-спектрометрия вторичных ионов, метод ядерных реакций и позитронная спектроскопия (последние три метода позволяют получить распределение водорода по глубине образцов) в сочетании с микроскопией для изучения микроструктуры. Моделирование транспорта и захвата водорода в вольфраме проводится в таких кодах, как TMAP, TESSIM, MHIMS и др. Энергию связи атома водорода с ловушкой можно получить как с помощью моделирования, так и напрямую из эксперимента (по методу Киссинджера).

По итогам обзора можно выделить следующие диапазоны энергий связи атомов водорода с ловушками различных типов в вольфраме:

- дислокации: 0,65–1,25 эВ, среднее значение ~1,0 эВ,
- 1-й атом водорода в вакансии: 1,05–1,55 эВ, среднее значение ~1,4 эВ,
- 2-й и т. д. атом водорода в вакансии: 1,00–1,35 эВ, среднее значение ~1,2 эВ,
- дислокационные структуры: 1,65–1,85 эВ, среднее значение ~1,8 эВ,
- вакансионные кластеры: 1,70–2,25 эВ, среднее значение ~2,0 эВ,
- пустоты: 2,05–2,45 эВ, среднее значение ~2,2 эВ.

Следует отметить определенную нехватку экспериментальных данных для высоких температур образцов (>1000 К) и для образцов, поврежденных потоком нейтронов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Philipps V. J. Nucl. Mater. 2–9 (2011) 415.
2. Causey R. A., Venhaus T. J. Phys. Scr. 9–15 (2001) 94.

TYPES OF HYDROGEN TRAPS IN TUNGSTEN: A REVIEW

A. Persianova, A. Golubeva

National research center «Kurchatov Institute»

In fusion reactors, first wall and divertor will be exposed to intense heat and particle flows (of ions, charge exchange neutrals, neutrons). Due to its high melting point, high thermal conductivity, and low sputtering coefficient, tungsten is currently one of the most popular plasma-facing materials [1]. Hydrogen in tungsten can be either dissolved or trapped in metal lattice defects (so-called «traps»). It is very important to predict and reduce amount of hydrogen retained in tungsten, since in the fusion reactors a D-T reaction will be carried out on mixtures of heavy hydrogen isotopes, and tritium is radioactive. Therefore, it is necessary to know about the main types of hydrogen traps in tungsten. This report is a review of the information published in the literature on experimentally studied hydrogen traps in tungsten materials.

The types of traps differ from each other in the binding energy of a hydrogen atom with a given trap [2]. Traps can be created artificially in samples by irradiation with high-energy ions or thermal neutrons to simulate the microstructure of tungsten damaged by irradiation with thermonuclear neutrons. The main methods for studying hydrogen retention in tungsten are thermal desorption spectroscopy, secondary ion mass spectrometry, nuclear reaction analysis and positron annihilation spectroscopy (the last three methods allow one to obtain the depth distribution of hydrogen over the samples) in combination with microscopy to study the microstructure. Modeling of transport and retention of hydrogen in tungsten is carried out in codes such as TMAP, TESSIM, MHIMS, etc. The binding energy of a hydrogen atom with a trap can be obtained both by simulation and directly from experiment (using the Kissinger method).

Based on the results of the review, the following ranges of binding energies of hydrogen atoms with various types of traps in tungsten can be distinguished:

- dislocations: 0,65–1,25 eV, average value ~1,0 eV,
- 1st hydrogen atom in a vacancy: 1,05–1,55 eV, average value ~1,4 eV,
- 2nd, etc. hydrogen atom in a vacancy: 1,00–1,35 eV, average value ~1,2 eV,
- dislocation structures: 1,65–1,85 eV, average value ~1,8 eV,
- vacancy clusters: 1,70–2,25 eV, average value ~2,0 eV,
- voids: 2,05–2,45 eV, average value ~2,2 eV.

It should be noted a certain lack of experimental data for high sample temperatures (>1000 K) and for samples damaged by a neutron flux.

REFERENCES

1. Philipps V. J. Nucl. Mater. 2–9 (2011) 415.
2. Causey R. A., Venhaus T. J. Phys. Scr. 9–15 (2001) 94.

Дугин Дмитрий Сергеевич
НИЦ «Курчатовский институт»
Лаборант-исследователь
123182, г. Москва,
пл. Академика Курчатова, д. 1,
Материалы ТЯР, изотопы водорода,
численное моделирование

Dugin Dmitriy
NRC «Kurchatov Institute»
Laboratory assistant - researcher
123182, Moscow, Akademika Kurchatova sq., 1
TNR materials, hydrogen isotopes,
numerical simulation
dmitrydugin@gmail.com



ОСОБЕННОСТИ МОДЕЛИРОВАНИЯ И РАСЧЕТОВ КОЛИЧЕСТВА ПОВРЕЖДЕНИЙ В МАТЕРИАЛАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОГРАММЫ SRIM

Д. С. Дугин, Н. П. Бобырь, Д. А. Козлов

НИЦ «Курчатовский институт»

В области исследований взаимодействия изотопов водорода с материалами термоядерных реакторов существенной частью являются экспериментальные исследования с материалами содержащими дефекты структуры. В связи с тем, что эксперименты с нейтронно-облученными образцами времязатратны и радиационно опасны, почти все исследования проводятся с образцами подвергнутыми имитационным облучениям ускоренными частицами (легкие ионы, тяжелые ионы, электроны). В процессе расчета повреждающих доз, а так же при сравнении различных результатов возникают трудности из-за отсутствия единого подхода к моделированию процессов.

Международная стандартизация подхода в расчетах дефектов структуры имеет решающее значение для количественного сравнения результатов радиационного воздействия, полученных различными исследовательскими группами с использованием различных бомбардирующих частиц.

Параметр смещений на атом (сна, dpa) является наиболее распространенной единицей измерения, используемой для количественной оценки первичного радиационного повреждения, а текущее международное стандартное определение сна основано на модификации Норгета – Робинсона – Торренса (NRT) оригинальной модели Кинчина-Пиза для производства дефектов [1].

SRIM – это набор программных пакетов, которые вычисляют многие особенности переноса ионов в веществе. Для расчета количества повреждений используется пакет TRIM (TRansport of Ions in Matter) – компьютерная программа Монте-Карло, которая вычисляет взаимодействия энергичных ионов с аморфными мишенями [2].

В данной работе проведено моделирование в программе SRIM в пакете TRIM с использованием химических элементов, которые являются основными в термоядерных реакторах и установках: Fe, Cu, W при различных условиях моделирования (энергия бомбардирующих ионов, метод расчета, величина различия масс бомбардирующих ионов и атомов мишени). Было показано, что при различных условиях моделирования изменяются результаты расчета оценки повреждений. Расхождение результатов расчета связано с тем, что SRIM основан на приближениях BCA (binary collision approximation, приближение бинарных столкновений) и Кинчина-Пиза. В связи с этим нельзя утверждать, что какое-либо из этих значений определено «правильно» или «неправильно». При наличии стандартного значения высокоточного эксперимента или моделирования с помощью метода молекулярной динамики, эти данные можно принять за основу для выбора способа расчета SRIM для использования. В настоящее время не существует абсолютно надежного эталонного значения.

Использование SRIM для вычисления количества повреждений весьма проблематично, поскольку разные способы дают разные результаты. В связи с этим важно при использовании SRIM указать номер версии программы, вводимые параметры моделирования и каким способом был произведен расчет.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 8 «Физика изотопов водорода».

ЛИТЕРАТУРА

1. On the use of SRIM for calculating vacancy production: Quick calculation and full-cascade options / S. Agarwal, Y. Lin, C. Li, R. E. Stoller,

S. J. Zinkle – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2021. Vol. 503. P. 11–29, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.018>.

2. James Ziegler – SRIM & TRIM. – URL: <http://srim.org>.

FEATURES OF MODELING AND CALCULATING THE AMOUNT OF DAMAGE IN MATERIALS USING THE SRIM PROGRAM

D. S. Dugin, N. P. Bobyr, D. A. Kozlov

NRC «Kurchatov Institute»

In the field of research on the interaction of hydrogen isotopes with materials of fusion reactors, an essential part is experimental studies with materials containing structural defects. Due to the fact that experiments with neutron-irradiated samples are time-consuming and radiation-hazardous, almost all studies are carried out with samples subjected to simulated irradiation with accelerated particles (light ions, heavy ions, electrons). In the process of calculating damaging doses, as well as when comparing different results, difficulties arise due to the lack of a unified approach to modeling processes.

International standardization of defect production is crucial for quantitative comparison of radiation exposure results obtained by different research groups using different bombarding particles. The parameter of displacements per atom (dpa) is the most common unit of measurement used to quantify primary radiation damage, and the current international standard definition of dpa is based on the Norgett–Robinson–Torrens (NRT) modification of the original Kinchin-Pease model for the production of defects [1].

SRIM is a set of software packages that calculate many features of ion transport in a substance. To calculate the amount of damage, the TRIM (TRansport of Ions in Matter) package is used – a Monte Carlo computer program that calculates the interactions of energetic ions with amorphous targets [2].

In this paper, modeling was carried out in the SRIM program in the TRIM package using chemical elements that are basic in thermonuclear reactors and installations: Fe, Cu, W under various modeling conditions (energy of bombarding ions, calculation method, the magnitude of the difference in the masses of bombarding ions and target atoms). It was shown that under different model-

ing conditions, the results of calculating the damage assessment change. The discrepancy in the calculation results is due to the fact that SRIM is based on the BCA (binary collision approximation) and Kinchin-Pease approximations. In this regard, it cannot be argued that any of these values are definitely «right» or «wrong». If there is a standard value of a high-precision experiment or simulation using the molecular dynamics method, these data can be taken as the basis for choosing the SRIM calculation method to use. There is currently no absolutely reliable reference value.

Using SRIM to calculate the amount of damage is very problematic, since different methods give different results. In this regard, it is important when using SRIM to specify the version number of the program, the modeling parameters entered and how the calculation was performed.

The study was carried out within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, № 8 «Physics of Hydrogen Isotopes».

REFERENCES

1. On the use of SRIM for calculating vacancy production: Quick calculation and full-cascade options / S. Agarwal, Y. Lin, C. Li, R. E. Stoller, S. J. Zinkle – Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2021. Vol. 503. P. 11–29, <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2021.06.018>.
2. James Ziegler – SRIM & TRIM. – URL: <http://srim.org>.

Кузенов Сергей Ризабекевич

СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Аспирант

Россия, г. Санкт-Петербург,

пр. Большевиков, д. 22/1

Водородная энергетика, физическая химия

Sergei Kuzenov

The Bonch-Bruевич Saint Petersburg State

University of Telecommunications

PhD student

Russia, Saint-Petersburg

Hydrogen Energy, Physical chemistry

skuzenov@ya.ru

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕГРАДАЦИЯ КАТАЛИТИЧЕСКОГО
ПОКРЫТИЯ МЕМБРАН НА ОСНОВЕ МЕТАЛЛОВ 5 ГРУППЫ***С. Р. Кузенов, А. О. Буснюк, В. Н. Алимов,**А. И. Лившиц, Е. Ю. Передистов*

СПбГУТ им. проф. М. А. Бонч-Бруевича

Мембраны из ванадия и его сплавов должны иметь покрытие на входной и выходной стороне, обеспечивающее каталитическое разложение молекул H_2 и защиту материала мембраны от коррозии, но не препятствующее при этом транспорту водорода сквозь мембрану. Этим требованиям удовлетворяет покрытие из палладия толщиной не более нескольких микрон [1, 2]. Мембраны из сплавов ванадия *нецелесообразно* использовать при температуре ниже $300\text{ }^\circ\text{C}$ из-за резкого снижения скорости диссоциативной абсорбции молекул H_2 на поверхности палладиевого покрытия [3]. Однако при температурах выше $300\text{ }^\circ\text{C}$ время эксплуатации мембран может быть ограничено из-за термической деградации каталитического покрытия из-за интердиффузии между палладиевым покрытием и материалом мембраны [4]. В процессе интердиффузии образуется слой интерметаллида между покрытием и материалом мембраны, который блокирует перенос водорода через мембрану [5].

В настоящее время в литературе существуют экспериментальные данные по исследованию термической деградации каталитического покрытия при $T > 400$ °C [4–6] и отсутствуют данные по изучению скорости деградации палладиевого покрытия, нанесенного на ванадиевые мембраны в температурном диапазоне 300–400 °C.

В связи с этим был интерес провести исследование термостабильности палладиевого покрытия ванадиевых мембран в температурном диапазоне 300–400 °C и определить оптимальную температуру, при которой проникающий поток H_2 через мембраны сохраняется в течении 10000 часов эксплуатации.

ЛИТЕРАТУРА

1. Cooney D. A., Way J. D., Wolden C. A. A Comparison of the Performance and Stability of Pd/BCC Metal Composite Membranes for Hydrogen Purification. *Int. J. Hydrog. Energy* (2014) 19009–19017.
2. 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 Materials*. 2008, № 3, p. 169–176.
3. Alimov V. N., Hatano Y., Busnyuk A. O., Livshits D. A., Notkin M. E., Livshits A. I. Hydrogen permeation through the Pd–Nb–Pd composite membrane: Surface effects and thermal degradation. *Int. J. Hydrogen Energy* (2011) 7737–7746.
4. Edlund D. J., McCarthy J. The relationship between intermetallic diffusion and flux decline in composite-metal membranes: implications for achieving long membrane lifetime // *J. Membr. Sci.* 1995. Vol. 107. P. 147–153.
5. Feifei Huang, Xinzhong Li, Xingrun Shan, Jingjie Guo, Fausto Gallucci, Martin van Sint Annaland, Dongmei Liu. Hydrogen transport through the V–Cr–Al alloys: Hydrogen solution, permeation and thermal-stability. *Separation and Purification Technology*, 240 (2020), 116654.
6. Katsuhiko Sasaki, Masashi Hattori, Kentaro Tsuchimoto, Hiroshi Yukawa, Shigeo Arai, Tomoharu Tokunaga, Yoshinori Murata, Takahisa Yamamoto. Microstructural analysis of thermal degradation of palladium-coated niobium membrane. *Journal of Alloys and Compounds* 573 (2013) 192–197.

THE THERMAL DEGRADATION OF CATALYTIC COATING FOR MEMBRANES BASED ON 5 GROUP METAL

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

Bonch-Bruевич Saint-Petersburg State University of Telecommunications,
St. Petersburg, Russia

The membranes of V or its alloys should have a coating on the input and output sides that ensures the catalytic decomposition of H₂ molecules and protects the membrane material from corrosion, but does not prevent the transport of hydrogen through the membrane. These requirements are met by a coating of palladium with a thickness of no more than a few microns [1, 2]. The membranes from V alloys are impractical to use at temperatures below 300 °C due to a sharp decrease in the rate of dissociative absorption of H₂ molecules on the surface of the palladium coating [3]. However, at temperatures above 300 °C, the operating time of the membranes may be limited due to the thermal degradation of the catalytic coating due to the interdiffusion between the palladium coating and the membrane material [4]. In the process of interdiffusion between the coating and the membrane material, an intermetallic layer is formed, which blocks the transfer of hydrogen through the membrane [5].

Currently, there are experimental data in the literature on the study of thermal degradation of a catalytic coating at $T > 400$ °C [4–6] and there is no data on the study of the degradation rate of palladium coating applied to vanadium membranes in the temperature range of 300–400 °C.

In this regard, it was of interest to conduct a study of the thermal stability of the palladium coating of vanadium membranes in the temperature range of 300–400 °C and determine the optimal temperature at which the penetrating flow of H₂ through the membranes is maintained for 10,000 hours of operation.

REFERENCES

1. Cooney D. A., Way J. D., Wolden C. A. A Comparison of the Performance and Stability of Pd/BCC Metal Composite Membranes for Hydrogen Purification. *Int. J. Hydrog. Energy* (2014) 19009–19017.
2. 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 Materials*. 2008, № 3, p. 169–176.

3. Alimov V. N., Hatano Y., Busnyuk A. O., Livshits D. A., Notkin M. E., Livshits A. I. Hydrogen permeation through the Pd–Nb–Pd composite membrane: Surface effects and thermal degradation. *Int. J. Hydrogen Energy* (2011) 7737–7746.
4. Edlund D. J., McCarthy J. The relationship between intermetallic diffusion and flux decline in composite-metal membranes: implications for achieving long membrane lifetime // *J. Membr. Sci.* 1995. Vol. 107. P. 147–153.
5. Feifei Huang, Xinzhong Li, Xingrun Shan, Jingjie Guo, Fausto Gallucci, Martin van Sint Annaland, Dongmei Liu. Hydrogen transport through the V–Cr–Al alloys: Hydrogen solution, permeation and thermal-stability. *Separation and Purification Technology*, 240 (2020), 116654.
6. Katsuhiro Sasaki, Masashi Hattori, Kentaro Tsuchimoto, Hiroshi Yukawa, Shigeo Arai, Tomoharu Tokunaga, Yoshinori Murata, Takahisa Yamamoto. Microstructural analysis of thermal degradation of palladium-coated niobium membrane. *Journal of Alloys and Compounds* 573 (2013) 192–197.

Сомкина Евгения Владимировна
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Инженер-исследователь
Россия, г. Саров Нижегородской обл.
Химия гидридов, технология
и материаловедение гидридов металлов

Somkina Evgenia Vladimirovna
FSUE «RFNC-VNIIEF»
Research engineer
Russia, Sarov Nizhny Novgorod region.
Hydride chemistry, technology and materials
science of metal hydrides
evsomkina@vniief.ru

ВЛИЯНИЕ ЛАКОВЫХ И МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ НА ВЛАГОПРОНИЦАЕМОСТЬ И ВОДОРОДПРОНИЦАЕМОСТЬ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Е. В. Сомкина, А. А. Тарасов, Ю. С. Белова,
Н. С. Золотова, Н. Н. Балашова

Государственная корпорация по атомной энергетике «РОСАТОМ»
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ», г. Саров Нижегородская обл.
evsomkina@vniief.ru

В работе исследована возможность снижения проницаемости полимерных материалов путем нанесения на их поверхность тонкого металлического или лакового слоя. Исследования проводились на образцах, изготовленных из полиэтилена и поликарбоната, и их комбинациях с фторопластовой пленкой, металлическим или лаковым покрытием. Экспериментально установлены значения коэффициентов влаго- и водородопроницаемости однослойных и многослойных образцов. Установлено, что лаковые покрытия эффективнее снижают проницаемость полимерных материалов, чем металлические покрытия, нанесенные методом холодного газодинамического напыления. Зафиксировано, что комбинации полимеров с фторопластовой пленкой имеют низкую селективность проницаемости паров воды и водорода.

**INFLUENCE OF LACQUER AND METAL COATINGS ON
MOISTURE AND HYDROGEN PERMEABILITY OF POLYMER
MATERIALS**

E. V. Somkina, A. A. Tarasov, Yu. S. Belova, N. S. Zolotova, N. N. Balashova

State Atomic Energy Corporation «ROSATOM»
FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov, Nizhny Novgorod region
evsomkina@vniief.ru

The possibility of reducing the permeability of polymer materials by applying a thin metal or lacquer layer to their surface is investigated in this work. Studies were carried out on samples made of polyethylene and polycarbonate, and their combinations with a fluoroplastic film, metal or lacquer coating. Values of coefficients of moisture and hydrogen permeability of single-layer and multilayer samples are experimentally established. It has been found that lacquer coatings reduce the permeability of polymeric materials more effectively than metal coatings applied by cold gas-dynamic spraying. It is stated that the combinations of polymers with the fluoroplastic film have a low selectivity of water and hydrogen vapor permeability.

Ерискин Александр Александрович

ФИАН

Научный сотрудник

Москва, Ленинский пр-т, 53.

Плазменный фокус, физика плазмы,
конструкционные материалы и покрытия,
тонкие пленки, модификация материалов.

Alexander Eriskin

LPI

Researcher

Moscow, Leninskii pr. 53.

Plasma focus, plasma physics, structural
materials and coatings, thin films, material
modification.

subzerno@gmail.com



ОБРАТНОЕ ПРОНИКНОВЕНИЕ ДЕЙТЕРИЯ ИЗ ДЕЙТЕРИРОВАННОГО ПОЛИЭТИЛЕНА В ФОЛЬГИ ИЗ Nb И Ta

*А. А. Ерискин¹, В. Я. Никулин¹, П. В. Силин¹, В. Н. Колокольцев²,
В. С. Куликаускас³*

¹ ФИАН, 119991 Москва, Ленинский пр-т 53.

² ИМЕТ, 119334 Москва, Ленинский пр-т 49.

³ НИИЯФ МГУ, 119234, ГСП-1, Москва, Ленинские горы, д. 1, с. 2.

В работе представлены результаты по исследованию влияния импульсной аргоновой плазмы, генерируемой на установке плазменный фокус ПФ-4 [1] (ФИАН), на перераспределение примесного водорода, а также дейтерия, который изначально находился в дейтерированном полиэтилене $(CD_2)_n$. Были исследованы три сборки фольг: 1) $Ta|(CD_2)_n|Ta$, с толщиной Ta-фольг по 100 мкм; 2) $Ta|Ta|(CD_2)_n|Ta|Ta$, с толщиной Ta-фольг по 50 мкм; 3) $Nb|(CD_2)_n|Nb$, с толщиной Nb-фольг по 105 мкм. Во всех трех случаях толщина дейтерированного полиэтилена составляла 240 мкм. Сборки располагались на расстоянии 45 мм от анода. Изучение распределения водорода и дейтерия осуществлялось методом детектирования упруго рассеянных атомов отдачи (ERDA) водорода и дейтерия при

резерфордовском обратном рассеянии (RBS). Все ERDA спектры были получены с использованием анализирующего пучка ионов гелия с энергией 2,3 МэВ при скользящем угле падения на образец в 15° на ускорителе Ван-де-Граафа «HVEE AN-2500» [2] (НИИЯФ МГУ). Обработка спектров проводилась с применением стандартной программы SIMNRA 6.06 [3]. Обнаружено, что дейтерий переносится из дейтерированного полиэтилена в находящуюся перед ним металлическую фольгу (как в случаях Ta, так и в случае Nb) на существенную глубину (до ~ 250 нм) и практически не переносится в металлическую фольгу с другой стороны от дейтерированного полиэтилена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Дидык А. Ю. и др. Перспективные материалы 29–38 (2015) № 9.
2. Черных П. Н., Чеченин Н. Г. Методика ионно-пучкового анализа на ускорителе HVEE AN-2500. Учебное пособие. М.: МГУ, 2011, 41 с.
3. Mayer M. SIMNRA User's guide, Germany: Max-Planck-Institut fur plasmaphysic, 1997–2002. 156 p.

BACKWARD PENETRATION OF DEUTERIUM FROM DEUTERATED POLYETHYLENE INTO NB AND TA FOILS

*A. A. Eriskin¹, V. Ya. Nikulin¹, P. V. Silin¹, V. N. Kolokoltsev²,
V. S. Kulikauskas³*

¹ LPI, 119991 Moscow, Leninskii pr. 53.

² Baikov Institute of Metallurgy and Materials Science, RAS, 119334 Moscow, Leninskii pr. 49.

³ SINP MSU, 119234, GSP-1, Moscow, Leninskie gory 1(2).

The paper presents the results of studying the effect of pulsed argon plasma generated at the PF-4 plasma focus facility (LPI) [1] on the redistribution of impurity hydrogen, as well as deuterium, which was originally in deuterated polyethylene $(CD_2)_n$. Three foil assemblies were investigated: 1) Ta $|(CD_2)_n|$ Ta, with Ta-foil thicknesses of 100 μm ; 2) Ta|Ta $|(CD_2)_n|$ Ta|Ta, with Ta-foil thickness of 50 μm ; 3) Nb $|(CD_2)_n|$ Nb, with a thickness of Nb foils of 105 μm . In all three cases, the thickness of the deuterated polyethylene was 240 μm . The as-

semblies were located at a distance of 45 mm from the anode. The distribution of hydrogen and deuterium was studied by the method of Elastic recoil detection analysis (ERDA) of hydrogen and deuterium atoms with Rutherford backscattering (RBS). All ERDA spectra were obtained using an analyzing beam of helium ions with an energy of 2.3 MeV at a sliding angle of incidence on the sample of 15° at the Van de Graaff accelerator HVEE AN-2500 [2] (SINP MSU). The spectra were processed using the SIMNRA 6.06 standard program [3]. It was found that deuterium is transferred from the deuterated polyethylene into the metal foil located in front of it (both in the cases of Ta and in the case of Nb) to a significant depth (up to ~ 250 nm) and is practically not transferred to the metal foil on the other side of the deuterated polyethylene.

REFERENCES

1. Didyk A. Yu. et al. *Perspektivnye Materialy* 29–38 (2015) № 9.
2. Chernykh P. N., Chechenin N. G. *Method of ion-beam analysis on the HVEE AN-2500 accelerator. Tutorial*. M.: MSU, 2011, 41 p.
3. Mayer M. *SIMNRA User's guide*, Germany: Max-Planck-Institut fur plasmaphysic, 1997–2002. 156 p.

Секция 2

A8–A11, C6

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

Session 2

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

Литовченко Игорь Юрьевич

Институт физики прочности и материаловедения
СО РАН

Ведущий научный сотрудник
634055, г. Томск, пр-т Академический, 2/4
Область научных интересов: конструкционные
стали ядерной энергетики, дефектная
микроструктура, фазовый состав,
механические свойства

Igor Litovchenko

Institute of Strength Physics and Materials Science
SB RAS

Leading Researcher

2/4, pr. Akademicheskii, Tomsk, 634055, Russia

Fields of interest: structural steels of nuclear
power engineering, deformed microstructure,
phase composition, mechanical properties

E-mail address of the author: litovchenko@ispms.ru

**КОНСТРУКЦИОННЫЕ СТАЛИ ДЛЯ ЯДЕРНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ:
МИКРОСТРУКТУРА, МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА,
СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ**

И. Ю. Литовченко^{1,2}

¹ Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, Томск

² Томский государственный университет, Томск

Во многих современных ядерных энергетических установках в качестве конструкционных материалов оболочек тепловыделяющих элементов и других деталей первой стенки реактора используются хромоникелевые аустенитные стали типа ЧС-68 (Fe-16Cr-15Ni-2Mo-Mn-Ti-V-B) и ЭК-164 (Fe-16Cr-19Ni-2Mo-2Mn-Nb-Ti-B) с высоким содержанием хрома и никеля. Эти стали имеют повышенную по сравнению другими конструкционными сталями жаропрочность и сопротивление радиационному и гелиевому охрупчиванию вплоть до доз облучения около 100 с.н.а. Однако при более высоких дозах облучения в таких материалах наблюдается склон-

ность к радиационному распуханию (более 7 %). Для реакторов нового (IV-го поколения) разрабатываются новые конструкционные материалы, которые должны удовлетворять возрастающим требованиям ядерной энергетики – максимальная рабочая температура 650–700 °С, максимальные дозы облучения более 120 с.н.а., повышенное сопротивление радиационному и гелиевому охрупчиванию. Для обеспечения выполнения этих требований в настоящее время разработаны и совершенствуются новые конструкционные хромоникелевые и хромомарганцевые аустенитные стали и ферритно-мартенситные стали (включая малоактивируемые композиции).

В докладе представлено современное состояние научных исследований в области материаловедения конструкционных сталей (дореакторные исследования и механические испытания). Обсуждаются результаты исследований особенностей их микроструктуры, механических свойств, особенностей пластической деформации и разрушения после различных термических и термомеханических обработок. Показано влияние высокотемпературной термомеханической обработки на измельчение структуры и повышение дисперсности и объемной доли частиц карбидных (карбонитридных) фаз. Это способствует повышению высокотемпературной прочности и ударной вязкости ферритно-мартенситных сталей. Показана высокая термическая стабильность микроструктуры и механических свойств ферритно-мартенситных сталей после длительных (до 13500 ч.) высокотемпературных (до 620 °С) отжигов. Обсуждается формирование плотных оксидных пленок, защищающих материал от коррозии, на поверхности ферритно-мартенситных сталей в свинцовом теплоносителе при длительной выдержке при температурах до 600 °С

Работа выполнена в рамках государственного задания ИФПМ СО РАН, тема номер FWRW-2021-0008

**STRUCTURAL STEELS FOR NUCLEAR POWER ENGINEERING:
MICROSTRUCTURE, MECHANICAL PROPERTIES, STATE
OF THE ART AND PROSPECTS FOR DEVELOPMENT**

I. Yu. Litovchenko^{1,2}

¹ Institute of Strength Physics and Materials Science SB RAS, Tomsk

² National Research Tomsk State University, Tomsk

In many modern nuclear power plants, chromium-nickel austenitic steels of the ChS-68 (Fe-16Cr-15Ni-2Mo-Mn-Ti-V-B) and EK-164 (Fe-16Cr-19Ni-2Mo-2Mn-Nb-Ti-B) with a high Cr and Ni content are used. These steels have increased heat resistance and resistance to radiation and helium embrittlement compared to other structural steels up to radiation doses of about 100 d.p.a. However, at higher irradiation doses, such materials exhibit a tendency to radiation swelling (more than 7 %). New structural materials are being developed for the new (IV-th generation) reactors, which must meet the increasing requirements of nuclear power engineering – the maximum operating temperature is 650–700 °C, the maximum radiation doses are more than 120 d.p.a., increased resistance to radiation and helium embrittlement. To meet these requirements, new structural chromium-nickel and chromium-manganese austenitic steels and ferritic-martensitic steels (including low-activated compositions) have now been developed and are being improved.

The report presents the current state of scientific research in the materials science of structural steels (pre-reactor studies and mechanical tests). The results of studies of the microstructure features, mechanical properties, features of plastic deformation and fracture after various thermal and thermomechanical treatments. The effect of high-temperature thermomechanical treatment on structure refinement and increase of dispersion and volume fraction of carbide (carbonitride) phases particles is shown. This helps to increase the high-temperature strength and toughness of ferritic-martensitic steels. The high thermal stability of the microstructure and mechanical properties of ferritic-martensitic steels after long-term (up to 13500 hours) high-temperature (up to 620 °C) annealings is shown. The formation of dense oxide films (protecting the material from corrosion) on the surface of ferritic-martensitic steels in a lead coolant during long-term holding at temperatures up to 600 °C is discussed.

Бойцов Игорь Евгеньевич
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Старший научный сотрудник
607188, Россия, г. Саров Нижегородской
обл., пр-т Мира, 37

Boytsov Igor
RFNC-VNIIEF
Senior researcher
607188, Sarov, Nizhny Novgorod region,
Russia
arkad@triton.vniief.ru

МЕТОДЫ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ МАТЕРИАЛОВ НА ИХ СТОЙКОСТЬ К ВОДОРОДНОМУ ОХРУПЧИВАНИЮ

И. Е. Бойцов

Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики,
г. Саров, Россия (ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)
arkad@triton.vniief.ru

Рассмотрены методы механических испытаний, применяемые при исследовании стойкости конструкционных материалов (КМ) к различным видам водородного охрупчивания. Особенное внимание уделено методам изучения стойкости КМ к охрупчиванию внешним водородом. Представлены конструкции и устройство установок для проведения механических испытаний материалов в среде водорода: на несущую способность давлением водорода мембранных и трубчатых образцов, на растяжение, трещиностойкость, усталость. Проведено сравнение чувствительности различных методов при оценке стойкости КМ к охрупчиванию внешним водородом и степени влияния водорода на различные характеристики механических свойств. Представлены подходы и испытательные установки, разработанные в РФЯЦ-ВНИИЭФ для исследования водородостойкости КМ в диапазоне температур от -150 до $+600$ °С при давлении водорода до 500 МПа.

THE MECHANICAL TESTING METHODS TO STUDY MATERIAL RESISTANCE TO HYDROGEN EMBRITTLEMENT

I. E. Boitsov

The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute
of Experimental Physics, Sarov, Russia
arkad@triton.vniief.ru

Mechanical testing methods to research resistance of structural materials (SM) to different hydrogen embrittlement types are considered. Particular attention was paid to the methods analyzing the material resistance to embrittlement with external hydrogen. The design and arrangement of the facilities for the material mechanical tests in the hydrogen environment are described that allow looking at the carrying ability of the membrane and tubular samples under hydrogen pressure, their tension, crack-resistance, and fatigue. Sensitivities of different methods were compared, when evaluating the SM resistance to the external hydrogen embrittlement, as well as degrees of the hydrogen influence on different mechanical characteristics. There are presented the approaches and testing facilities developed at the RFNC-VNIIEF for research of the SM resistance to hydrogen within the temperature range from -150 to $+600$ °C at the hydrogen pressure of up to 500 MPa.

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

Chukanov Alexander Nikolaevich
L. N. Tolstoy TSPU
Leading Researcher
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



НИЗКОТЕМПЕРАТУРНОЕ ЛОКАЛИЗОВАННОЕ ОБЕЗУГЛЕРОЖИВАНИЕ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ В ХОДЕ ВОДОРОДНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

А. Н. Чуканов, А. А. Яковенко, А. Н. Сергеев, С. Н. Кутенов, Е. В. Цой

ФГБОУ ВО «ТГПУ им. Л. Н. Толстого», Россия, Тула

Введение. Эффективным методом контроля концентрации углерода в феррите является ее определение по параметрам эффекта несовершенной упругости Снука, как следствия диффузии атомов внедрения под напряжением. Авторы на основе указанного эффекта выявили снижение концентрации углерода в феррите конструкционных углеродистых и малолегированных сталей, подвергнутых деструктивным воздействиям – деформации и насыщению водородом. В ходе деструктивного воздействия в исходной структуре сталей наблюдали формирование обедненных углеродом ферритных участков, прилегающих к развивающимся микротрещинам и порам. В ходе интенсификации внешнего деструктивного воздействия фиксировали немонотонную зависимость концентрация углерода. Ее характер связывали с влиянием локальных полей внутренних

напряжений развивающихся структурных дефектов. Считали, что поля напряжений этих локальных концентраторов дополнительно (помимо внешних напряжений) стимулируют локальную диффузионную подвижность атомов внедрения (ускоренные «перескоки» в энергетически выгодные позиции решетки феррита), что ведет к усилению диссипации энергии в ходе измерения механической спектроскопии. Возможность указанного процесса может накладываться на классический механизм эффекта Снука и влиять на объективность расчета концентрации примесей внедрения в феррите исследованных сталей. **Цель работы** – изучить влияние эволюции ансамбля несплошностей на развитие эффекта Снука, концентрацию углерода и его перераспределение в деформированных и наводороженных конструкционных сталях. **Материалы и методики.** Исследовали конструкционные стали марок Ст5, 18ГС, 20ГС, 35ГС, 23Х2Г2Т, 08Г2С, 80С, упрочненных сталей Ст3, 20, модельного сплава Fe – 0,09 % С. Проводили статическую деформацию растяжением (0...30 %). Измеряли характеристики механических свойств (ГОСТ 1497-84). Использовали анодную и катодную поляризацию образцов в кислых электролитах (водных растворы 2,5...8 % H₂SO₄ с добавлением 2,5 % NH₄CNS) при $j = 2,6\text{--}60 \text{ А/м}^2$. Оценивали длительную прочность сталей до разрушения при определенных напряжениях σ_a . Измеряли внутреннее трение – ВТ (амплитудные и температурные зависимости) в низкочастотном (образцы $d = 0,5\text{--}3 \text{ мм}$, $L = 70\text{--}100 \text{ мм}$, релаксатор РДУ-ТПИ, $f \sim 0,5\text{--}3 \text{ с}^{-1}$) и звуковом (образцы $8 \times 200 \text{ мм}$, установка ИДСМ-1, $f \sim 1 \cdot 10^3 \text{ с}^{-1}$ по резонансной методике ГОСТ 25156-82) диапазонах частот. Металлографию микроструктуры сталей и оценку ее количественных характеристик (эволюцию ансамбля микротрещин, объемную долю феррита и перлита) проводили по линейному и точечному методам А. Розиваля и А. А. Глаголева. Изображения микроструктур обрабатывали в ППП ImagePro+4.5 и ACDSee 2.5. Высоту максимума Снука использовали для определения концентрации примесей внедрения (С, N) в феррите. С помощью параметров эффектов неупругости (фон, высота, температура, энергия активации) и данных рентгеноструктурных исследований (микрорискажения, размер блоков, плотность дислокаций) наблюдали субструктурные изменения и контролировали развитие деградации и деструкции сталей. **Выводы.** Установили взаимосвязь локального обезуглероживания в исследованных сталях с развивающимися в ходе внешнего воздействия локальными концентраторами внутренних напряжений (микротрещинами, порами). Присутствие водорода резко усиливает процесс, переводя его с субструктурного на микроструктурный уровень. Влияние водорода уско-

рывает диффузию атомов внедрения, делая возможным образование комплексных сегрегаций на дислокациях и границах зерен. Высказали гипотезу, о необходимости учета влияния полей локальных концентраторов напряжений на релаксацию Снука, величину эффективного коэффициента диффузии и диффузионную проницаемость феррита.

LOW-TEMPERATURE LOCALIZED DECARBURIZATION OF STRUCTURAL STEELS DURING HYDROGEN EXPOSURE

A. N. Chukanov, A. A. Yakovenko, A. N. Sergeev, S. N. Kutepov, E. V. Tsoi

Tula State Pedagogical University named after L. N. Tolstoy

Introduction. An effective method of controlling the carbon concentration in ferrite is its determination by the parameters of the effect of the imperfect elasticity of the Snook, as a consequence of the diffusion of the atoms of the introduction under stress. Based on this effect, the authors revealed a decrease in the carbon concentration in ferrite of structural carbonaceous and low-alloyed steels subjected to destructive influences - deformation and hydrogen saturation in acidic aqueous solutions with passivators. During the destructive action in the initial bainite (and pearlite) structure of steels, the formation of carbon-depleted ferritic sites adjacent to developing microcracks and pores was observed. During the intensification of the external destructive effect, a non-monotonic dependence of the carbon concentration was recorded. Its character was associated with the influence of local internal stress fields of developing structural defects. It was believed that the stress fields of these local concentrators additionally (in addition to external stresses) stimulate the local diffusion mobility of the embedding atoms (accelerated «jumps» to energetically advantageous positions of the ferrite lattice), which leads to increased energy dissipation during the measurement of mechanical spectroscopy. The possibility of this process may overlap with the classical mechanism of the Snook effect and affect the objectivity of calculating the concentration of impurities in the ferrite of the studied steels. **The purpose of the work** – to study the influence of the evolution of an ensemble of discontinuities (microcracks, pores) on the development of the Snook effect, carbon concentration and its redistribution in the structure of deformed and flooded structural steels. **Materials and techniques.** Samples of structural steels of grades St5, 18GS, 20GS, 35GS, 23X2G2T,

08G2S, 80C of hardened carbon steels St3, 20, model alloy Fe – 0,09 % S were studied. Static deformation was performed by stretching (0...30 %). The characteristics of mechanical properties were measured (GOST 1497-84). Anodic and cathodic polarization of samples in acidic electrolytes (aqueous solutions of 2,5...8 % H₂SO₄ with the addition of 2,5 % NH₄CNS) was used at $j = 2,6\text{--}60$ A/m². The long-term strength of the steels before destruction was evaluated at certain stresses σ_a . Internal friction – IF (amplitude and temperature dependences) was measured in low-frequency (samples $d = 0,5\text{--}3$ mm, $L = 70\text{--}100$ mm, RDU-TPI relaxer, $f \sim 0,5\text{--}3$ s⁻¹) and sound (samples 8×200 mm, installation IDSM-1, $f \sim 1 \cdot 10^3$ c⁻¹ by resonance according to the GOST 25156-82 methodology) frequency ranges. Metallography of the microstructure of steels and evaluation of its quantitative characteristics (the evolution of the ensemble of microcracks, the volume fraction of ferrite and perlite) were carried out using linear and point methods by A. Rozival and A.A. Glagolev. Images of microstructures were processed in the ImagePro+4.5 and ACDSec 2.5 SPP. The height of the Snook maximum was used to determine the concentration of impurities (C, N) in ferrite. The parameters of inelasticity effects (background, height, temperature, activation energy) and X-ray structural studies (microdistortions, block size, dislocation density) were used to observe substructural changes and control the development of degradation and destruction of steels.

Conclusions. The relationship of local decarburization in the studied steels with local internal stress concentrators (microcracks, pores) developing during external action was established. The presence of hydrogen dramatically enhances the process, transferring it from the substructural to the microstructural level. The influence of hydrogen accelerates the diffusion of embedding atoms, making possible the formation of complex segregation at dislocations and grain boundaries. We hypothesized that it is necessary to take into account the influence of the fields of local stress concentrators on the relaxation of Snook, the value of the effective diffusion coefficient and the diffusion permeability of ferrite.

Канашенко Сергей Леонидович
Институт Биомедицинской химии
им. В. Н. Ореховича
Ведущий инженер
г. Москва, ул. Погодинская, 10, стр. 8
Область научных интересов
Электронная микроскопия

S. L. Kanashenko
Institute of Biomedical Chemistry
Leading engineer
Moscow, Pogodinskaya st., 10, build 8
Electron microscopy
serkanash@mail.ru

**ИССЛЕДОВАНИЕ СТРУКТУРЫ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ
12X18N10T, СОДЕРЖАЩЕЙ РАДИОГЕННЫЙ ГЕЛИЙ**

С. Л. Канашенко

Институт Биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича

Ялышева Анастасия Васильевна

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Инженер-исследователь

607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл.,

пр-т Мира, 37

Yalysheva Anastasiya

RFNC-VNIIEF

Engineer-researcher

607188, Sarov, Nizhny Novgorod region, Russia

arkad@triton.vniief.ru



ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ВОДОРОДА И ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ 316L, ПОЛУЧЕННОЙ МЕТОДОМ ПОСЛОЙНОГО ЛАЗЕРНОГО СПЛАВЛЕНИЯ

А. В. Ялышева, И. Е. Бойцов, А. В. Бучирин, И. Л. Малков, Р. К. Мусяев

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

607188, г. Саров Нижегородской обл., пр-т Мира, 37

В настоящее время новым способом производства металлических изделий сложной формы является технология послойного лазерного сплавления (ПЛС). Одним из наиболее перспективных конструкционных материалов, изготавливаемых с помощью аддитивных технологий, является нержавеющая сталь 316L-ПЛС. Информация о влиянии на нее водорода представляет интерес для создания оборудования, работающего в водородосодержащих средах, в частности, сосудов высокого давления. На данный момент в научной литературе такой информации недостаточно.

В работе приведены результаты металлографического исследования структуры стали 316L-ПЛС после воздействия на нее водорода при давлении 40 МПа и температурах до 600 °С в течение длительного времени.

В процессе исследования выполнялись измерения микротвердости образцов, изучение их структуры в исходном состоянии и после наводороживания.

Результаты исследования показали, что водород на структуру стали 316L-ПЛС влияния не оказал, микротвердость увеличилась примерно на 10 %.

Изменение структуры стали 316L-ПЛС происходило либо при длительных выдержках (до сотен часов) при температурах до 600 °С, либо во время отжига при 1075 °С. В результате гомогенизирующего отжига структура стали 316L-ПЛС стала практически идентичной структуре аустенитных нержавеющей сталей, изготовленных по традиционной технологии.

RESEARCH OF HYDROGEN AND THERMAL TREATMENT EFFECT ON THE STRUCTURE OF STAINLESS STEEL 316L OBTAINED USING THE LAYER-BY-LAYER LASER SINTERING

A. V. Yalysheva, I. E. Boitsov, A. V. Buchirin, I. L. Malkov, R. K. Musyaev

The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, 607188, Bld. 37, Mira Ave., Sarov, Russia

Presently, the new method for manufacturing metallic items with a complicated shape is the additive technology of layer-by-layer sintering (LLS). One of the most promising structural materials made with the help of the additive technologies is stainless steel 316L-LLS. The data on how it is affected by hydrogen is of great interest in connection with designing equipment operational in hydrogen-containing environments, particularly high-pressure vessels. As of today, data provided in scientific literature are scarce.

The paper cites the metallographic research data for steel 316L-LLS microstructure after its exposure to hydrogen at the pressure of 40 MPa and temperatures of up to 600 °C for a long time. In the course of the studies microhardness of the samples was measured, their structure was analyzed in the initial state and after hydrogenation.

The research data indicated that hydrogen had not affected the structure of steel 316L-LLS, while its microhardness increased approximately by 10 %.

The structure of steel 316L-LLS changed either in case of durable exposures (up to hundreds of hours) to temperatures of up to 600 °C, or during annealing at 1075 °C. As a result of the homogenizing annealing, the structure of steel 316L-LLS became practically identical to that of austenite stainless steels manufactured using the conventional technology.

Секция 3

C7–C13

ГИДРИДЫ И ГИДРИДНЫЕ ПРЕВРАЩЕНИЯ

Session 3

**HYDRIDES AND HYDRIDE
TRANSFORMATIONS**

Эльман Роман Романович

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

Elman Roman

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

**СОРБЦИЯ И ДЕСОРБЦИЯ ВОДОРОДА КОМПОЗИТАМИ
НА ОСНОВЕ ГИДРИДА МАГНИЯ И НАНОСТРУКТУРНЫХ
КАТАЛИТИЧЕСКИХ ДОБАВОК**

Р. Р. Эльман, В. Н. Кудияров, Н. Е. Курдюмов

Томский политехнический университет

Разработка методов аккумулирования водорода является одним из наиболее важных направлений в области водородной энергетики. Гидриды металлов и композиты на их основе являются наиболее предпочтительными кандидатами для выполнения данной роли. Однако, к таким материалам предъявляются серьезные требования по емкости, циклической стабильности, рабочей температуре и давлению, а также скорости сорбции и десорбции водорода. В этом случае использование магния/гидрида магния оправдано, так как магний является доступным и дешевым элементом. В то же время использование чистого гидрида магния ограничено из-за высоких значений энтальпии процессов сорбции и десорбции водорода. Эффективной стратегией улучшения свойств гидридов металлов, в том числе гидрида магния, является создание на их основе композитов с наноматериалами. Углеродные наноматериалы, в частности углеродные нанотрубки, являются одними из известных и эффективных

каталитических добавок. Они недороги, обладают высокой теплопроводностью и обычно содержат наночастицы металлов, которые действуют как катализаторы реакции сорбции и десорбции водорода. Еще одним классом наноструктурированных материалов, рассматриваемых в качестве каталитических добавок, являются металлоорганические каркасные структуры. Так, металлоорганические структуры MIL-101 (Cr) на основе переходных металлов, относительно недороги и просты в производстве, что позволяет использовать их в качестве прекурсоров для нанесения катализатора на поверхность MgH_2 .

В данной работе рассмотрены композитные материалы-накопители водорода на основе гидрида магния и однослойных углеродных нанотрубок, а также гидрида магния и металлоорганических каркасных структур MIL-101 (Cr). Поведение сорбции и десорбции водорода в композите исследовано в диапазонах температур и давлений (593–653) К и (0–3) МПа соответственно. Исследованы основные закономерности фазовых переходов в системе магний-водород для композитов при дегидрировании. На основе полученных результатов предположены механизмы сорбции и десорбции водорода композитами.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания в рамках научного проекта № FSWW-2021-0017, а также в рамках программы повышения конкурентоспособности Томского политехнического университета.

SORPTION AND DESORPTION OF HYDROGEN BY COMPOSITES BASED ON MAGNESIUM HYDRIDE AND NANOSTRUCTURED CATALYSTS

R. R. Elman, V. N. Kudiiarov, N. E. Kurdyumov

Tomsk Polytechnic University

The development of hydrogen storage methods is one of the important areas of research in the field of hydrogen energy. Metal hydrides and metal-hydride based composites are the most preferred candidates for this role. However, such materials are subject to serious requirements in terms of capacity, cyclic stability, operating temperature and pressure, as well as the hydrogen sorption and desorption rate. In this case, the use of Mg/MgH_2 is justified, since

magnesium is an abundant and cheap element. At the same time, the use of pure magnesium hydride is limited due to the high enthalpies of hydrogen sorption and desorption processes. An effective strategy for improving the properties of metal hydrides, including magnesium hydride, is the creation of composites with nanomaterials. Carbon nanomaterials, especially carbon nanotubes, are one of the known and effective catalytic additives. They are inexpensive, have high thermal conductivity, and usually contain metal nanoparticles that act as catalysts for the hydrogen sorption and desorption reaction. Another class of nanostructured materials considered as catalytic additives are metal-organic frameworks. Thus, MIL-101 (Cr) metal-organic frameworks based on transition metals are relatively inexpensive as well and easy to produce, which allows it to be used as a precursor for catalyst deposition on the MgH_2 surface.

In this paper, hydrogen storage composites based on magnesium hydride and single-walled carbon nanotubes, as well as magnesium hydride and MIL-101 (Cr) metal-organic frameworks are considered. The hydrogen sorption and desorption behavior in composite have been investigated for temperatures and pressures ranges (593–653) K and (0–3) MPa, respectively. The main regularities of phase transitions during dehydrogenation have been studied. Based on the results obtained, the mechanisms of hydrogen sorption and desorption by composites are proposed.

The work was funded by Governmental Program, project № FSWW-2021-0017. The authors acknowledge the TPU development program.

Крот Павел Александрович

Московский государственный университет

им. М. В. Ломоносова

Аспирант 1-го года

г. Москва, ул. Ленинские Горы,

д. 1, стр. 11

Твердотельные системы хранения водорода,
металлогидриды, высокоэнтروпийные сплавы



Pavel Krot

M. V. Lomonosov Moscow State University

1st year postgraduate student

Bldg. 11, 1, Leninskie Gory, Moscow, Russia

Solid hydrogen storage systems, metal hydrides,

high-entropy alloys

pavelakrot@gmail.com

**ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОДОРОДА С НЕКОТОРЫМИ
ВЫСОКОЭНТРОПИЙНЫМИ СПЛАВАМИ**

П. А. Крот¹, В. Н. Вербецкий¹, И. С. Терешина²

¹ МГУ им. М. В. Ломоносова, Химический факультет,
кафедра химической технологии и новых материалов,
лаборатория энергоемких и каталитическиактивных веществ

² МГУ им. М. В. Ломоносова, Физический факультет,
Отделение физики твердого тела, Кафедра физики твердого тела

В последние годы интерес к высокоэнтропийным сплавам (ВЭС) непрерывно растет. Яркой иллюстрацией этому служит практически экспоненциальный рост количества публикаций по этой теме в последнее десятилетие [1]. Формально ВЭС можно определить как сплавы, составленные из пяти (иногда и четырех) или большего количества элементов, причем мольная доля каждого из них находится в пределах от 5 до 35 %. Такому химическому составу соответствует чрезвычайно высокое количество состояний системы, что и придает соединению ряд уникальных свойств.

Одно из направлений работы с ВЭС, продвигающееся не столь активно, – это изучение их магнитных свойств. Некоторые редкоземельные металлы (РЗМ, например, Gd) обладают сравнительно близкими к комнатным температурами Кюри/Нееля, что обуславливает возможность их применения в различных магнитных устройствах и для создания постоянных магнитов. Редкоземельные металлы интересны еще и тем, что легко образуют друг с другом фазы твердого раствора, что позволяет создавать высокоэнтропийные сплавы на их основе с известным фазовым составом и кристаллической структурой. Наконец, РЗМ и их сплавы образуют гидриды в относительно мягких условиях, что открывает путь для модификации их свойств (в частности магнитных) с помощью внедрения атомов водорода, а, возможно, и иных атомов малого радиуса [2, 3].

Был выбран ряд сплавов РЗМ, которые бы по своему составу соответствовали классу ВСЭ, а именно сплавы, представляющие собой различные комбинации элементов La, Ce, Gd, Tb, Dy и Ho с эквиатомным соотношением, исследования которых практически не отражены в известной научной литературе. После подготовки шихты из индивидуальных редкоземельных элементов (чистота >99,9 масс. %) проводился синтез сплавов в электродуговой печи, после чего сплавы подвергались высокотемпературному отжигу (900 °С). Исследовались: морфология с помощью сканирующей электронной микроскопии (SEM), элементный состав с помощью энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (EDX) и фазовый состав с помощью рентгенофазового анализа (XRD). Гидрирование образцов проводилось в аппарате типа Sieverts с последующим дегидрированием, строились изотермы реакций дегидрирования, на основании которых вычислялись термодинамические параметры процессов. Присутствие гидридов подтверждалось с помощью РФА. были исследованы магнитные свойства исходных образцов сплавов и их гидридов на вибрационном магнетометре, а именно получены зависимости намагниченности образцов от приложенного магнитного поля и от содержания атомов водорода в их кристаллической решетке.

ЛИТЕРАТУРА

1. Rajendrachari, S. An Overview of High-Entropy Alloys Prepared by Mechanical Alloying Followed by the Characterization of Their Microstructure and Various Properties. *Alloys* 2022, 1, 116–132.
2. Effect of Hydrogenation on Magnetostriction and Magnetocaloric Effect in Gadolinium Single Crystal. I. S. Tereshina, G. A. Politova, V. A. Chetyr-

botskii, E. A. Tereshina-Chitrova, M. A. Paukov and A. V. Andreev. *Physics of the Solid State* 61 (2) 90 (2019).

3. W. E. Wallace, S. K. Malik, T. Takeshita, S. G. Sankar, D. M. Gualtieri; Magnetic properties of hydrides of the rare earths and rare earth intermetallics. *Journal of Applied Physics* 1 March 1978; 49 (3): 1486–1491.

HYDROGEN INTERACTION WITH CERTAIN HIGH-ENTROPY ALLOYS

P.A. Krot¹, V. N. Verbetsky¹, I. S. Tereshina²

¹ Moscow State University, Faculty of Chemistry, Department of Chemical Technology and New Materials

² Moscow State University, Faculty of Physics, Department of Solid State Physics, Chair of Solid State Physics

In recent years high-entropy alloys (HEA) has been attracting more and more attention. This can be illustrated by the exponential growth of the number of publication concerning this topic in the last decade [1]. Formally speaking, any alloy composed of five (sometimes four) or more elements, with atomic percent of each element between 5 and 35 %. Such a chemical composition corresponds to an enormous number of system's microstates, which would explain several unique properties such a compound possesses.

One of the areas of investigation of HEA which has received relatively little attention is the study of their magnetic properties. Some rare-earth elements (REE, i.e. Gd) enjoy comparatively moderate Curie/Néel temperatures, which allows for their application in permanent magnet production and construction of various magnetic devices. Further, the ability of REE to form solid solutions with each other over a wide range of atomic ratios is a useful property enabling the preparation of REE-based HEAs with predetermined phase composition and crystalline structure. Beyond that, REE and REE-based alloys form hydrides under relatively mild conditions paving the way for tailoring their properties, magnetic ones in particular, by means of introducing hydrogen atoms into their lattice, and possibly some other small-radius atoms [2, 3].

A number of REE-based alloys with HEA-qualifying atomic ratios, that is, alloys composed of various combinations of La, Ce, Gd, Tb, Dy, Ho elements and with little to none coverage in available literature were considered. After

individual element-made furnace charges were made, synthesis of respective alloys via arc-melting was carried out. The elements were of >99,9 m. % purity. After that high-temperature annealing (900 °C) of samples obtained was performed. Several investigation techniques were implemented. Firstly, morphology of samples was analyzed by means of Scanning electronic microscopy (SEM). Then elemental composition was obtained through Energy-dispersive X-ray spectroscopy (EDX). Finally, analysis of phase composition was effected by X-ray diffraction method (XRD). Hydrogenation/dehydrogenation cycling of samples in a Sieverts apparatus was performed and pressure-composition isotherms (PCI) were obtained. Computation of hydrogenation reaction parameters for synthesized alloys enabled by the PCI was made. Presence of hydride phases was demonstrated via XRD of hydrogenation products. Finally, magnetic properties of as-synthesized alloys and corresponding hydrides were studied with the help of a vibration magnetometer, that is, magnetization of samples vs external field / hydrogen content in a given sample was plotted.

REFERENCES

1. Rajendrachari, S. An Overview of High-Entropy Alloys Prepared by Mechanical Alloying Followed by the Characterization of Their Microstructure and Various Properties. *Alloys* 2022, 1, 116–132.
2. Effect of Hydrogenation on Magnetostriction and Magnetocaloric Effect in Gadolinium Single Crystal. I. S. Tereshina, G. A. Politova, V. A. Chetyrbotskii, E. A. Tereshina-Chitrova, M. A. Paukov and A. V. Andreev. *Physics of the Solid State* 61 (2) 90 (2019).
3. W. E. Wallace, S. K. Malik, T. Takeshita, S. G. Sankar, D. M. Gualtieri; Magnetic properties of hydrides of the rare earths and rare earth intermetallics. *Journal of Applied Physics* 1 March 1978; 49 (3): 1486–1491.

Веселова Светлана Владимировна

Московский государственный университет

им. М. В. Ломоносова

Инженер 1 категории

119234, г. Москва, ул. Ленинские Горы,

д. 1, стр. 11

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

**Svetlana Veselova**

Lomonosov Moscow State University

1st Category Engineer

Moscow, 119991, Russia, Leninskie gory, 1,

Building 11

Fields of interest: rare earth alloys, intermetallics, hydrides, nitrides, magnetic properties of inorganic materials

E-mail: sv_veselova@mail.ru

**ВЛИЯНИЕ ВОДОРОДА НА СТРУКТУРУ И МАГНИТНЫЕ
СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ****Sm₂(Fe, Al)₁₇***С. В. Веселова, В. Н. Вербецкий, И. С. Терёшина*

Московский государственный университет, Москва

sv_veselova@mail.ru

Интерметаллические соединения на основе 4f-редкоземельных элементов с переходными металлами группы железа представляют интерес для исследования благодаря высоким значениям намагниченности насыщения, температуры Кюри и константы магнитной анизотропии [1]. Установлено, что магнитные свойства интерметаллического соединения Sm₂Fe₁₇ значительно повышаются после внедрения в кристаллическую решетку атомов водорода, углерода и азота. В результате влияния одновременных факторов замещения и внедрения в Sm₂Fe₁₇ можно достичь более высоких значений температуры Кюри (увеличить расстояние

Fe-Fe $\geq 2,45$ Å) и увеличить вклад магнитной подрешетки редкой земли в общей анизотропии вследствие изменения электронной структуры исходных соединений. Подобная трансформация свойств материала связывается, прежде всего, с объемным эффектом (увеличение атомного объема, расстояний Fe-Fe, R-Fe) и химическим эффектом при введении атомов внедрения. На сегодняшний день взаимодействие интерметаллического соединения $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ с водородом, углеродом и азотом наряду со структурными и магнитными свойствами $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}\text{M}_y$, где М – немагнитный элемент, довольно хорошо изучено. Тем не менее данные о влиянии атомов внедрения на структуру и магнитные свойства гидридов на основе $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17}$ с железозамещающими элементами фрагментарны. Цель данной работы – изучение влияния водорода на структуру и магнитные свойства соединений $(\text{Sm}_{1-x}\text{Al}_x)_2\text{Fe}_{17}$ ($x = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4$).

Исходные сплавы были получены методами электродуговой и индукционной плавок в инертной атмосфере аргона, давление которого в рабочей камере после вакуумной дегазации составляло до 1,1 атм. Гомогенизирующий отжиг проводили в кварцевых ампулах при 1273 К в течение 25–30 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 CoK_α -излучении. Уточнение дифракционных профилей проводилось по методу Ритвельда с использованием программы RIETAN-2000. Гидрирование осуществляли прямой реакцией предварительно механически измельченных исходных сплавов с водородом при температуре 473 К и давлении водорода 30 МПа в течение 20–25 ч. Исследование магнитных свойств были выполнены с помощью измерительного комплекса PPMS-9 в широком диапазоне температур, а также на вибромагнитометре VSM-250 в полях до 2 Тл при комнатной температуре.

В соответствии с данными РФА, установлено, что образцы после гомогенизирующего отжига являются двухфазными, помимо основной фазы присутствует примесная магнитомягкая α -Fe. Основная фаза типа 2:17 и 2:17:Н соединений $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Al}_x$ и $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Al}_x\text{H}_y$ кристаллизуется в ромбоэдрической структуре типа $\text{Th}_2\text{Zn}_{17}$ (пр. гр. $R\bar{3}m$).

Синтез гидридов на основе $\text{Sm}_2\text{Fe}_{17-x}\text{Al}_x$ проходил на установке гидрирования при давлении до 40 атм с нагревом исходного образца до 473 К. В результате были получены гидриды с различным содержанием

водорода, которое рассчитывалось по модифицированному уравнению Ван-дер-Ваальса. Максимальное значение $H/Sm_2Fe_{17-x}Al_x$ составило 4 атома на формульную единицу. Внедрение атомов водорода в кристаллическую решетку соединений $(Sm_{1-x}R_x)_2Fe_{17}$ оказывает влияние также на магнитные свойства: при их гидрировании удастся значительно повысить значения намагниченности насыщения и коэрцитивной силы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Coey J.M.D. Magnetism and Magnetic Materials // Cambridge University Press. 2010. 614 p.

EFFECT OF HYDROGEN ON THE STRUCTURE AND MAGNETIC PROPERTIES OF INTERMETALLIC COMPOUNDS $Sm_2(Fe, Al)_{17}$

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

Lomonosov Moscow State University
E-mail: sv_veselova@mail.ru

Ingots $(Sm_{1-x}Al_x)_2Fe_{17}$ ($x = 0.1; 0.2; 0.3; 0.4$) 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 $(Sm_{1-x}Al_x)_2Fe_{17}H_y$ hydrides retain the rhombohedral Th_2Zn_{17} type of crystal structure of the initial compounds. Hydrogenation leads to an increase in the saturation magnetization and coercive force at room temperature.

Романов Иван Александрович
Объединенный институт высоких температур РАН
Научный сотрудник
125412, Москва, ул. Ижорская, д. 13, стр. 2
Металлогидриды, водородная энергетика

Ivan Romanov
Joint Institute for High Temperatures RAS
Researcher
Izhorskaya st. 13 Bd.2, Moscow, Russia 125412
Metal hydrides, hydrogen energy
romanoff_i_a@mail.ru



**ВЛИЯНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ПОЛЯ НА
ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ
СОСТАВА $\text{LaNi}_{4,4}\text{Al}_{0,3}\text{Fe}_{0,3}$ С Водородом**

И. А. Романов, А. А. Еронин, А. Н. Казаков

Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Данная работа посвящена исследованию взаимодействия интерметаллического соединения (ИМС) АВ₅-типа состава $\text{LaNi}_{4,4}\text{Al}_{0,3}\text{Fe}_{0,3}$ с водородом под воздействием электростатического поля различной напряженности и полярности. Исходный образец интерметаллида массой 100 г был приготовлен методом сплавления чистых металлов в электродуговой печи в атмосфере аргона. После гомогенизирующего отжига образец был исследован методом рентгенофазового и рентгеноструктурного анализа. Далее была проведена активация методом проведения десяти последовательных циклов абсорбции и десорбции водорода при температурах от 253 до 373 К и давлении водорода до 3,5 МПа, в результате которой образец превратился в однородный мелкодисперсный порошок. Были измерены РСТ-изотермы абсорбции и десорбции водорода методом Сивертса при температурах от 313 до 353 К.

На следующем этапе образец ИМС разделялся на две части массой 50 г в сухом боксе с инертной атмосферой, одна из которых использовала-

лась в экспериментах с электростатическим полем, а вторая служила в качестве образца сравнения.

Эксперименты с электростатическим полем проводились в полипропиленовом рабочем сосуде, который помещался в жидкостной термостат, заполненный трансформаторным маслом. Электростатическое поле создавалось между двумя цилиндрическими электродами, один из которых располагался по оси рабочего сосуда и служил одновременно трубкой для подачи водорода, а второй представлял собой тонкую пластину, обернутую вокруг рабочего сосуда. Для подачи напряжения от +15 до -15 кВ на осевой электрод использовался источник высокого напряжения «Плазон». В вакуумированный рабочий сосуд подавалась калиброванная порция водорода, после чего фиксировалось изменение давления над образцом со временем.

Эксперименты показали, что в области низких концентраций водорода подача положительного потенциала приводит к ускорению процесса поглощения водорода, а подача отрицательного – к замедлению и появлению излома на кривой зависимости давления от времени. Подача напряжения на электрод после установления равновесия в системе не влияет на давление водорода над образцом.

Исследования выполнены при поддержке РФФ Грант № 22-19-00516.

ELECTROSTATIC FIELD INFLUENCE ON INTERACTION OF INTERMETALLIC COMPOUND $\text{LaNi}_{4,4}\text{Al}_{0,3}\text{Fe}_{0,3}$ WITH HYDROGEN

I. A. Romanov, A. A. Eronin, A. N. Kazakov

Joint Institute for High Temperatures of the Russian Academy of Sciences,
Moscow, Russia

This work is devoted to the study of the interaction of an intermetallic compound (IMC) AB₅-type composition $\text{LaNi}_{4,4}\text{Al}_{0,3}\text{Fe}_{0,3}$ with hydrogen under the influence of an electrostatic field of various strengths and polarities. The initial sample of an intermetallic compound weighing 100 g was prepared by fusing pure metals in an electric arc furnace in an argon atmosphere. After homogenizing annealing, the sample was examined by X-ray diffraction analysis. Next, activation was carried out by conducting ten consecutive cycles of hydrogen absorption and desorption at temperatures from 253 to 373 K and hy-

drogen pressure up to 3,5 MPa, as a result of which the sample turned into a homogeneous fine powder. PCT isotherms of hydrogen absorption and desorption were measured by the Siverts method at temperatures from 313 to 353 K.

At the next stage, the IMC sample was divided into two parts weighing 50 g in a dry box with an inert atmosphere, one of which was used in experiments with an electrostatic field, and the second served as a reference sample.

Experiments with the electrostatic field were carried out in a polypropylene working vessel, which was placed in a liquid thermostat filled with transformer oil. An electrostatic field was created between two cylindrical electrodes, one of which was located along the axis of the working vessel and served simultaneously as a tube for supplying hydrogen, and the second was a thin plate wrapped around the working vessel. A high voltage source «Plason» was used to supply voltage from +15 to –15 kV to the axial electrode. A calibrated portion of hydrogen was fed into the evacuated working vessel, after which the pressure change over the sample was recorded over time.

Experiments have shown that in the region of low hydrogen concentrations, the supply of a positive potential leads to an acceleration of the hydrogen absorption process, and the supply of a negative one leads to a slowdown and the appearance of a fracture on the pressure–time curve. The supply of voltage to the electrode after the equilibrium in the system is established does not affect the pressure of hydrogen over the sample.

Authors acknowledge support from the Russian Science Foundation grant No 22-19-00516.

Курганская Анастасия Александровна

МГУ им. М. В. Ломоносова

Студент

РФ, г. Москва, Ленинские горы, 1

Физика твердого тела

Anastasia Kurganskaya

Lomonosow Moscow State University

Student

Russia, Moscow, Leninskye gory, 1

Solid state physics

kurganskaia.aa17@physics.msu.ru

**ВЛИЯНИЕ ГИДРИРОВАНИЯ НА ТИП МАГНИТНЫХ ФАЗОВЫХ ПЕРЕХОДОВ В СОЕДИНЕНИЯХ R(Ni,Si)***А. А. Курганская, И. С. Терёшина, В. Н. Вербецкий*

МГУ им. М. В. Ломоносова, 119991, Москва, Россия

Интерметаллические соединения R-Ni (R-редкоземельный металл) интересны не только тем, что проявляют значительный магнитокалорический эффект (МКЭ) в области магнитного фазового перехода, который происходит близко к температуре кипения жидкого азота, но и своим свойством легко поглощать водород, образуя стабильные гидриды. При этом гидрирование существенно снижает температуры магнитного перехода и может изменить тип перехода [1, 2, 3]. Образцы с замещениями как в подрешетке RЗМ, так и в подрешетке Ni - $Gd_xDy_{1-x}Ni$ ($x = 0,1; 0,9$) и $(Gd,Dy)Ni_{1-x}Si_x$ ($x = 0,02; 0,05$) – изготавливались в электродуговой печи в атмосфере аргона, а их гидриды $Gd_xDy_{1-x}NiH_3$ ($x = 0,1; 0,9$) и $(Gd,Dy)Ni_{1-x}Si_xH_y$ ($x = 0,02; 0,05; y = 3, 4$) были получены на установке типа Зиверта (рабочий диапазон давления до 100 МПа). Состав гидридов рассчитывался волнометрическим методом, с помощью уравнения Ван-дер-Ваальса. Кристаллическая структура полученных соединений исследовалась с помощью рентгеноструктурного анализа. Было определено, что соединения с высоким содержанием гадолиния кристаллизуются в орторомбической

структуре типа CrB (пространственная группа 63), тогда как соединения $Gd_{0,1}Dy_{0,9}Ni$ и $DyNi_{0,95}Si_{0,05}$ кристаллизуются в структурах типа FeB (пространственная группа 62). При этом все полученные гидриды имели пространственную структуру типа CrB, кроме гидрида $DyNi_{0,95}Si_{0,05}H_4$, сохранившего структуру FeB исходного соединения и после гидрирования. В данной работе для определения типа магнитного фазового перехода был использован анализ кривых Белова-Аррота, а также недавно предложенный в работе [4] анализ величины параметра n , который определялся по формуле:

$$n(T, H) = \frac{d \ln |\Delta S_M|}{d \ln H}.$$

Было обнаружено, что все исходные соединения и полученные гидриды демонстрируют фазовые переходы второго рода, что крайне важно для практического использования данных соединений в качестве рабочих тел магнитных рефрижераторов.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. V. B. Chzhan et al. *Materials Chemistry and Physics*, 264 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124455>.
2. I. S. Tereshina et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 574 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170693>.
3. Chzhan, V. et al. *Technical Physics Letters*. 46 (2020) 303-306. DOI: 10.1134/S1063785020030189.
4. Law, J.Y. et al. *Nat Commun* 9, 2680 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05111-w>.

THE INFLUENCE OF HYDROGENATION ON THE TYPE OF MAGNETIC PHASE TRANSITION IN R(Ni,Si) Compounds

A. A. Kurganskaya, I. S. Tereshina, V. N. Verbetsky

Lomonosov Moscow State University, 119991, Moscow, Russia

Intermetallic compounds of R-Ni (R-rare earth metal) are interesting not only because they exhibit a significant magnetocaloric effect (MCE) in the region of the magnetic phase transition (MPHT), which occurs around the boiling point of liquid nitrogen, but also because of their easeful absorption of hydrogen and formation of stable hydrides. Hydrogenation significantly reduces the temperature of the magnetic transition and can also change the order of the transition [1, 2, 3]. Samples $Gd_xDy_{1-x}Ni$ ($x = 0,1; 0,9$) and $(Gd,Dy)Ni_{1-x}Si_x$ ($x = 0,02; 0,05$) were made in an electric arc furnace under an Ar protective atmosphere, and their hydrides $Gd_xDy_{1-x}NiH_3$ ($x = 0,1; 0,9$) and $(Gd,Dy)Ni_{1-x}Si_xH_y$ ($x = 0,02; 0,05; y = 3, 4$) were synthesised on a Sievert-type setup (operating pressure range up to 100 MPa). The composition of the hydrides was calculated by the volumetric method using the Van der Waals equation. The crystal structure of the compounds was studied using X-ray diffraction analysis. It was determined that compounds with a high gadolinium content crystallize in a CrB-type orthorhombic structure (spatial group 63), whereas compounds $Gd_{0,1}Dy_{0,9}Ni$, and $DyNi_{0,95}Si_{0,05}H_4$, crystallize in FeB type (spatial group 62) structure. At the same time, all the obtained hydrides had a CrB type spatial structure, except for the $DyNi_{0,95}Si_{0,05}H_4$ hydride, which retained the FeB structure of the initial compound even after hydrogenation. To clarify the type of magnetic phase transition, not only the analysis of the Belov-Arrot curves was used, but also the recently proposed [4] quantitative criterion, namely, the analysis of the value of the parameter n , which was determined by the following formula:

$$n(T, H) = \frac{d \ln |\Delta S_M|}{d \ln H}$$

It has been found that all the initial compounds and the resulting hydrides exhibit MPHTs of the second order, which is extremely important for the practical use of these compounds as working bodies of magnetic refrigerators. This work was supported by a grant from the Russian Science Foundation № 22-29-00773, <https://rscf.ru/project/22-29-00773/>.

REFERENCES

1. V. B. Chzhan et al. *Materials Chemistry and Physics*, 264 (2021), <https://doi.org/10.1016/j.matchemphys.2021.124455>.
2. I. S. Tereshina et al. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 574 (2023), <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2023.170693>.
3. Chzhan, V. et al. *Technical Physics Letters*. 46 (2020) 303-306. DOI: 10.1134/S1063785020030189.
4. Law, J.Y. et al. *Nat Commun* 9, 2680 (2018). <https://doi.org/10.1038/s41467-018-05111-w>.

Военнов Артем Вадимович
ФГУП «ВНИИА»
Инженер
Москва, ул. Сушевская, д. 22
Материаловедение

Artem Voennov
VNIIA
Engineer
Moscow, 22 Sushevskaya st.
Materials science
voennov.artem@gmail.com



АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ РАДИОГЕННОГО ГЕЛИЯ НА СТРУКТУРУ ТОНКИХ ПЛЕНОК ТИТАНОВОГО ГИДРИДА

А. В. Военнов, А. С. Хапов, С. В. Чеканов

Федеральное государственное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова»
(ФГУП «ВНИИА»)

В работе проведена оценка изменения структуры и напряженного состояния в зависимости от концентрации радиогенного гелия для гидрида Ti в виде тонких пленок на подложках из Mo с помощью рентгеноструктурного анализа. Описаны ориентационные соотношения взаимного расположения фаз подложка-гидрид. Показано изменение текстурной составляющей гидрида с изменением концентрации ^3He . Сделана расчетная оценка изменения микроструктуры гидрида. Экспериментально подтверждено, что радиогенный гелий имеет тенденцию к неоднородному распределению по объему гидрида, а также показаны места его предпочтительной сегрегации – плоскости типа $\{111\}$. Показано влияние текстурной составляющей гидрида на его микроструктуру. Проведен анализ напряженного состояния гидрида в зависимости от концентрации ^3He . Выявлена неоднородность распределения макронапряжений по плоскости гидри-

да. Показано изменение величины остаточных напряжений по толщине гидрида и в зависимости от концентрации ^3He .

ANALYSIS OF RADIOGENIC HELIUM CONCENTRATION EFFECT ON THE STRUCTURE OF TITANIUM HYDRIDE THIN FILMS

A. S. Khapov, S. V. Chekanov, A. V. Voennov

The Federal State Unitary Enterprise Dukhov Automatics Research Institute
(VNIIA)

The structure and stress state changes were evaluated as a function of radiogenic helium concentration for Ti hydride in the form of thin films on Mo substrates using X-ray analysis. The orientation relationships of the mutual arrangement of the substrate-hydride phases are described. The texture component of the hydride is shown to change with changes in the concentration of ^3He . The estimation of changes in the hydride microstructure was made. Experimentally confirmed that radiogenic helium tends to an inhomogeneous distribution throughout the hydride volume and the locations of its preferential segregation – $\{111\}$ type planes – are shown. The influence of the texture component of the hydride on its microstructure is shown. The stress state of hydride as a function of ^3He concentration was analyzed. The inhomogeneous distribution of macrostresses over the hydride plane has been revealed. The change in the value of residual stresses along the hydride thickness and depending on the ^3He concentration is shown.

Анжигатова Елена Дмитриевна
Томский политехнический университет
Инженер ИЯТШ
г. Томск, пр. Ленина, 43
Область научных интересов:
взаимодействие
водорода с материалами

Anzhigatova Elena
Tomsk Polytechnic University
Engineer
Tomsk, Lenina st., 43
Fields of interest: hydrogen interaction
with materials
eda5@tpu.ru



ПРИМЕНЕНИЕ ИСТОЧНИКА ПОЗИТРОНОВ НА ОСНОВЕ Cu-64 Для IN-SITU ИССЛЕДОВАНИЙ КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НАКОПИТЕЛЕЙ ВОДОРОДА

Е. Д. Анжигатова, В. Н. Кудияров, Р. Р. Эльман, Р. С. Лаптев

Томский политехнический университет

Гидриды металлов наиболее часто используются в качестве материалов-накопителей водорода. Особую роль в процессах сорбции/десорбции водорода гидридообразующими металлами играют дефекты, возникающие при взаимодействии материала с водородом. Образующиеся дефекты могут, как существенно снизить емкость по водороду, так и являться эффективными центрами захвата водорода. Для исследования структурных дефектов в системах металл-водород широко применяются методы позитронной аннигиляции, такие как спектроскопия времени жизни позитронов и спектроскопия доплеровского уширения аннигиляционной линии. Методы позитронной аннигиляции позволяют изучать динамику образования дефектов, их трансформацию и рекомбинацию в процессах сорбции/десорбции водорода. А использование данных методов совместно с традиционными методами рентгеновской дифракции и сканирующей электронной микроскопии позволяет получить более детальную картину

взаимодействия водорода с материалом-накопителем. При этом целесообразно применять короткоживущие источники позитронов с небольшим диапазоном активности. В этой связи, актуальным является применение источника позитронов на основе Cu-64 для изучения эволюции дефектной структуры композитных материалов накопителей водорода.

В ходе работы было проведено экспериментальное исследование *in situ* позитронной спектроскопии материала-накопителя водорода на основе гидрида магния и углеродных нанотрубок в процессе десорбции с использованием источника позитронов на основе Cu-64. Также проведено исследование спектроскопии доплеровского уширения *in situ*. Для серии полученных спектров доплеровского уширения аннигиляционной линии рассчитаны S- и W-параметры.

Работа выполнена при финансовой поддержке Государственного задания «Наука» в рамках научного проекта № FSWW-2023-0005.

APPLICATION OF Cu-64-BASED POSITRON SOURCE FOR IN-SITU INVESTIGATION OF HYDROGEN STORAGE COMPOSITE MATERIALS

E. D. Anzhigatova, V. N. Kudiyarov, R. R. Elman, R. C. Laptev

Tomsk Polytechnic University

Metal hydrides are most commonly used as hydrogen storage materials. A special role in the processes of hydrogen sorption/desorption by hydride-forming metals is played by defects arising from the interaction of the material with hydrogen. The resulting defects can both significantly reduce the hydrogen capacity and be effective hydrogen capture centers. To study structural defects in metal-hydrogen systems, positron annihilation methods are widely used, such as positron annihilation lifetime spectroscopy and Doppler broadening spectroscopy of an annihilation line. Positron annihilation methods make it possible to study the dynamics of defect formation, their transformation and recombination in the processes of hydrogen sorption/desorption. And the use of these methods in conjunction with traditional methods of X-ray diffraction and scanning electron microscopy makes it possible to obtain a more detailed picture of the interaction of hydrogen with the material. In this case, it is advisable to use short-lived positron sources with a small activity range. In this regard, it

is relevant to use a Cu-64-based positron source to study the evolution of the defect structure of composite hydrogen storage materials.

In this work, an experimental study of in situ positron spectroscopy of a hydrogen storage material based on magnesium hydride and carbon nanotubes during desorption using a Cu-64-based positron source was carried out. In situ Doppler broadening spectroscopy was also investigated. S- and W-parameters were calculated for a series of obtained annihilation line Doppler broadening spectra.

Funding: This research was funded by the Governmental Program, Grant № FSWW-2023-0005.

Секция 4

A12–A19, B4–B6, C14–C26

**АППАРАТУРА И МЕТОДЫ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

Session 4

**EQUIPMENT AND RESEARCH
METHODS**

Николаев Евгений Николаевич

Сколтех

Полный профессор, руководитель лаборатории
Институт Энергетических Проблем Химической

Физики им. В. Л. Тальрозе,

Научный руководитель Института

143026, г. Москва, Большой Бульвар, 30

Молекулярная и химическая физика

Масс-спектрометрия, омиксные технологии

**Nikolaev Evgeny N**

Skoltech

Full Professor, Head of Laboratory

Bol'shoy Bul'var, 30, Moscow, Russia 143026

Institute of Energy Problems of Chemical Physics

Russian Academy of Science, Scientific Director.

Molecular and Chemical Physics, Mass Spectrometry, Omics Technologies

ennikolaev@gmail.com

МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ УЛЬТРАВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ*Е. Н. Николаев*Сколковский институт науки и технологий, Институт энергетических
проблем химической физики Российской Академии Наук

Канашенко Сергей Леонидович
Институт Биомедицинской химии
им. В. Н. Ореховича
Ведущий инженер
г. Москва, ул. Погодинская, 10, стр. 8
Область научных интересов
Электронная микроскопия

S. L. Kanashenko
Institute of Biomedical Chemistry
Leading engineer
Moscow, Pogodinskaya st., 10, build 8
Electron microscopy
serkanash@mail.ru

СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОННАЯ МИКРОСКОПИЯ

С. Л. Канашенко

Институт Биомедицинской химии им. В. Н. Ореховича

Кутеев Борис Васильевич

НИЦ «Курчатовский институт»

Зам. руководителя отделения токамаков
123182, Россия, г. Москва, пл. Ак. Курчатова, 1
Термоядерный синтез и гибридные системы

Kuteev Boris V.

Deputy Head of tokamak division

1 Ac. Kurchatov Sq., 123182 Moscow, Russia

Controlled Fusion and Hybrid Systems

Kuteev_BV@nrcki.ru**МАТЕРИАЛЫ ГИБРИДНЫХ СИСТЕМ СИНТЕЗ-СВОЙСТВА
И ПРОБЛЕМЫ***Б. В. Кутеев*

^a НИЦ Курчатовский институт, пл. Ак. Курчатова 1, Москва RU-123182,
Россия

^b НИЯУ МИФИ; Каширское шоссе. 31, Москва, RU-115409, Россия

Материаловедение является важной областью исследовательской деятельности, направленной на разработку термоядерных установок, гибридных систем термоядерного синтеза (FFHS) и их основных вспомогательных технологий. Взаимодействие плазмы с облучаемыми материалами и разработка компактных источников термоядерных нейтронов являются важным направлением международных программ исследований и разработок. Спектральные характеристики источников нейтронов и потоки нейтронов выше $0,2 \text{ МВт/м}^2$ ожидаются в ближайшие 7–10 лет, если деятельность будет начата немедленно. Уровень поверхностных нагрузок $\sim \text{МВт/м}^2$ ожидается после >2035 года. Неиндуктивные разряды длительного действия/стационарные разряды, реализуемые в компактных токамаках, способны обеспечить развитие FFHS до уровня гибридной термоядерной установки к 2040 году и демонстрационной установки к 2055 году.

Источники нейтронов, работающие на основе плазменно-лучевых разрядов, будут перспективными устройствами, если будут решены проблемы обращения с тритием. Такие устройства могут быть созданы к 2030 году.

Открытые системы потребуют дополнительных значительных усилий по исследованию и проектированию, начиная с до-концептуального уровня современного дизайна.

Успешная реализация программы термоядерных и плазменных технологий в Российской Федерации в области материалов потребует не только создания источников нейтронов, но и очень эффективной координации всей исследовательской деятельности. Высокая важность разработки и определения характеристик материалов потребует соответствующих корректировок в национальной программе Российской Федерации по термоядерному синтезу и физике плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кутеев Б. В. и др. Физика плазмы, 2010. Т. 36, № 4. С. 307–346.
2. Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research. 2018. <https://www.goodreads.com/book/show/43328665-final-report-of-the-committee-on-a-strategic-plan-for-u-s-burning-plasm>.

MATERIALS FOR FUSION-FISSION HYBRIDS-PROPERTIES AND PROBLEMS

B. V. Kuteev

^a NRC Kurchatov Institute; Ac. Kurchatov sq., 1, Moscow RU-123182, Russia

^b NRNU MEPhI; Kashira hgw. 31, Moscow, RU-115409, Russia

Materials science is an important area of research activity aimed at the development of thermonuclear facilities, fusion-fission hybrid systems (FFHS) and its' main auxiliary technologies. The interaction of plasma with irradiated materials and the development of compact thermonuclear neutron sources form a valuable direction of international research and development programs. Spectral characteristics of neutron sources and neutron fluxes above $0,2 \text{ MW/m}^2$ are expected in the future 7–10 years, if the activity is started immediately. The

level of surface loads of $\sim\text{MW}/\text{m}^2$ is expected after >2035 . Being implemented in compact tokamaks, non-inductive long-acting/stationary discharges are able to ensure the development of FFHS to the level of a hybrid fusion facility by 2040 and the demonstration plant by 2055.

Neutron sources, operating based on plasma-beam discharges, are promising devices, if the problems of tritium handling were solved. Such devices can be build up by 2030.

Open systems will require additionally significant research and design efforts, starting from the pre-conceptual level of modern design.

The successful implementation of the thermonuclear and plasma technologies program in the Russian Federation in the field of materials will require not only the creation of neutron sources, but also a very effective coordination of all research activities. The high importance of the development and characterization of materials will require appropriate adjustments in the national program of the Russian Federation on thermonuclear fusion and plasma physics.

REFERENCES

1. Kuteev B. V. Plasma Physics, 2010. Vol. 36, No 4. P. 307–346.
2. Final Report of the Committee on a Strategic Plan for U.S. Burning Plasma Research. 2018. <https://www.goodreads.com/book/show/43328665-final-report-of-the-committee-on-a-strategic-plan-for-u-s-burning-plasm>.

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

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



ТОПЛИВНЫЙ ДЕЙТЕРИЙ-ТРИТИЕВЫЙ ЦИКЛ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

С. С. Ананьев

НИЦ «Курчатовский институт», Москва

Осуществление управляемых реакций термоядерного синтеза предполагает создание физических установок (реакторов) для производства высокоэнергетичных нейтронов и энергии – за счет преобразования кинетической энергии нейтронов или заряженных частиц продуктов реакции в электрическую или другие виды энергии. Практически все кандидатные ядерные реакции синтеза предполагают использование изотопов водорода в качестве одного или нескольких компонентов топлива. Тритий будет присутствовать (в качестве компонента топлива и продукта) в реакциях D-T и D-D.

Одной из важнейших систем, необходимых для обеспечения работы термоядерного реактора (ТЯР) с тритием является комплекс систем «трیتیевого» топливного цикла (далее – ТЦ) [1, 2]. Комплекс ТЦ необходим для обеспечения работы любой термоядерной или гибридной (объединяющей в себе технологии синтеза и деления) установки, использующей тритий в любом, даже самом минимальном количестве.

Водород откачивается из камеры с плазмой в виде молекул D_2 , T_2 , H_2 , DT , HT , DH , а также химических соединений. В присутствии кислорода эти молекулы могут образовывать тритированную воду в результате окисления. При дальнейшей переработке из откачиваемой газовой смеси должны быть выведены примесные и вспомогательные газы, а также подготовлено топливо для повторного использования. Технологические потери и сбросы трития с отходами, включая его диффузионные утечки, должны быть сведены к минимуму. Запасы трития на площадке установки должны быть по возможности минимизированы. Должны быть обеспечены санитарно-гигиенические и экологические требования тритиевой безопасности. По технико-экономическим и экологическим соображениям предпочтителен непрерывный замкнутый цикл переработки и регенерации газовой смеси [1].

В физических установках – прообразов термоядерного реактора вакуумная система обеспечивает необходимые условия для формирования, подпитки и удержания плазмы, а также работы средств дополнительного нагрева плазмы, ввода в установку вспомогательных газов и откачки всех отработанных газов (включая изотопы водорода и их химические соединения). В 70–90 годах 20 века были созданы крупные токамаки (установки с магнитным удержанием плазмы) для проведения термоядерных экспериментов, содержащие ТЦ: JET (Евроатом), TFTR (США), ТСП (СССР/Россия). На первых двух были проведены эксперименты с тритием. В 1990-х годах в РФЯЦ ВНИИЭФ для моделирования процессов вакуумно-тритиевого комплекса ТЯР и ресурсных испытаний технологического оборудования был сформирован крупномасштабный тритиевый контур с содержанием трития в контуре до 200 г. Принципиальным отличием ТЯР от экспериментальных установок будет работа с большими количествами трития (в режиме длинных разрядов или стационарном) и наличие бланкета. Бланкет предполагается для утилизации энергии нейтронов и синтеза целевых нуклидов (в том числе, трития). Вакуумная система ТЯР совместно с «тритиевым заводом/комплексом» образуют вакуумно-тритиевый комплекс (ВТК), дополнительными функциями которого является подготовка и подача в реактор компонентов топлива (в т.ч. трития), замкнутая (циклическая) переработка продуктов термоядерной реакции и извлечение синтезируемого в бланкете трития. Функциональные элементы ВТК показаны на рис. 1.

В России исторически хорошо развиты технологии обращения с тритием, однако они в первую очередь ориентированы на двойное применение. Поэтому создание систем ТЦ в России возможно [3–5], но потребует

кооперации и координации работы десятка различных институтов – ведущих организаций в своих областях.

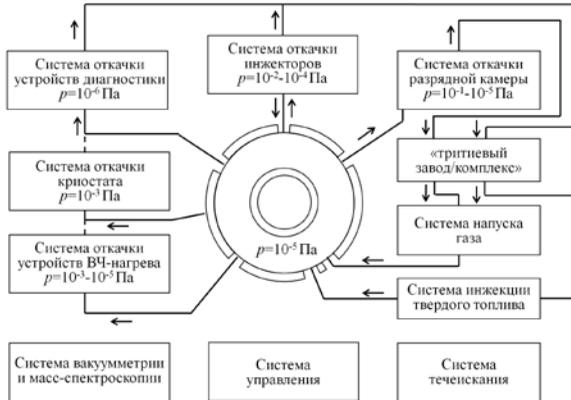


Рис. 1. Условная структурная схема вакуумно-триетиевого комплекса ТЯР с магнитным удержанием [1]

К числу важнейших инженерно-физических вопросов и задач, которые должны быть решены при создании ВТК, относятся:

а) выбор параметров, разработка схем и технологического оборудования для приготовления, ввода, извлечения, переработки и очистки компонентов топлива;

б) определение вакуумных параметров и требований к средствам откачки различных подсистем реактора;

в) выбор газокинетических и теплофизических параметров, компоновки вакуумного тракта и разработка его элементов, отвечающих критериям «абсолютной» эксплуатационной надежности;

г) комплексные исследования взаимодействия изотопов водорода с конструкционными и функциональными материалами (в т. ч. с учетом формирования дефектов структуры и образования радиогенного гелия под воздействием нейтронного облучения) для ТЯР, выбор конструктивных решений;

д) оптимизация технологий очистки (детритизации) вакуумной камеры и трактов;

е) создание надежных способов герметизации и коммутации вакуумного тракта, в том числе при автоматической сборке/дистанционном обслуживании;

ж) совершенствование методов вакуумных измерений и соответствующей аппаратуры, методов оперативного контроля состава газа и плазмы;

з) развитие методов и аппаратуры дистанционного контроля герметичности и устранения течей на различных участках вакуумного тракта;

и) совершенствование технологий контроля плотности и изотопного состава плазмы путем топливной инжекции, дополнительной стимуляции неустойчивостей на краю (ЭЛМ), дополнительного нагрева плазмы, газонапуска и рециклинга;

к) воспроизводство трития в зоне бланкета и его извлечение;

л) обеспечение радиационной безопасности по тритию в эксплуатационных режимах и при аварийных ситуациях;

м) разработка автоматизированной системы управления средствами откачки, блоками регенерации, очистки и подачи топлива, коммутирующей арматурой и контрольно-измерительными приборами;

и др.

В докладе изложены подходы к организации ТЦ для действующих физических установок с магнитным удержанием и прототипов термоядерных реакторов, обозначены взаимосвязанные процессы, определяющие архитектуру ТЦ, перечислены кандидатные технологии для создания замкнутого контура, рассчитанного на непрерывную длительную эксплуатацию, предложены методы для расчета компонентов ТЦ.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики (проект 8 «Физика изотопов водорода»).

ЛИТЕРАТУРА

1. Черковец В. Е., Фрунзе В. В. Тритиевые комплексы термоядерных установок с магнитным удержанием, Москва: Тривант, 2019. 232 с.: ил. Библиогр.: С. 218–232.

2. Ananyev S. S., Ivanov B. V., and Kuteev B. V. Analysis of promising technologies of DEMO-FNS fuel cycle, *Fusion Eng. Des.*, 161, 111940 (2020), <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111940>.

3. Иванов Б. В., Ананьев С. С. Оценка уровня готовности технологий тритиевого цикла в России на примере проекта гибридного реактора ДЕМО-ТИН, ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2021, т. 44, вып. 4. DOI: 10.21517/0202-3822-2021-44-4-5-24.

4. Иванов Б. В., Ананьев С. С. Оценка уровня готовности технологий тритиевого топливного цикла для реактора ДЕМО-ТИН. Часть 2, ВАНТ.

Сер. Термоядерный синтез, 2022, т. 45, вып. 4. DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-4-120-135.

5. Иванов Б. В., Ананьев С. С., Бобырь Н. П. Оценка уровня готовности технологий тритиевого топливного цикла для реактора ДЕМО-ТИН. Часть 3, ВАИТ. Сер. Термоядерный синтез, 2023, т. 46, вып. 1. DOI: 10.21517/0202-3822-2023-46-1-49-63.

FUEL DEUTERIUM-TRITIUM CYCLE OF A CONTROLLED FUSION REACTOR

S. Ananyev

NRC «Kurchatov Institute», Moscow

The implementation of controlled fusion reactions involves the creation of physical facilities (reactors) for the production of high-energy neutrons and energy - by converting the kinetic energy of neutrons or charged particles of reaction products into electrical or other types of energy. Virtually all candidate nuclear fusion reactions involve the use of hydrogen isotopes as one or more fuel components. Tritium will be present (as a fuel and product component) in the D-T and D-D reactions.

One of the most important systems necessary to ensure the operation of a controlled fusion reactor (CFR) with tritium is the complex of systems of the «tritium» fuel cycle (hereinafter referred to as FC) [1, 2]. The FC complex is necessary to ensure the operation of any fusion or hybrid (combining fusion and fission technologies) facilities using tritium in any, even the smallest amount.

Hydrogen is pumped out of the plasma chamber in the form of D₂, T₂, H₂, DT, HT, DH molecules, as well as chemical compounds. In the presence of oxygen, these molecules can form tritiated water as a result of oxidation. During further processing, impurity and auxiliary gases must be removed from the pumped-out gas mixture, and fuel must be prepared for reuse. Technological losses and releases of tritium with waste, including its diffusion leakage, should be minimized. The stocks of tritium at the facility site should be minimized as much as possible. Sanitary-hygienic and environmental requirements of tritium safety must be provided. For technical, economic and environmental reasons, a

continuous closed cycle of processing and regeneration of the gas mixture is preferable [1].

In physical facilities – prototypes of a controlled fusion reactor, the vacuum system provides the necessary conditions for the formation, fueling and confinement of plasma, as well as the operation of additional plasma heating supplies, the introduction of auxiliary gases into the vacuum chamber and the pumping out of all exhaust gases (including hydrogen isotopes and their chemical compounds). In the 70–90s of the 20th century, large tokamaks (facilities with magnetic plasma confinement) were created for conducting fusion experiments, containing FCs: JET (Euroatom), TFTR (USA), T-14/TSP (USSR/Russia). The first two were used for experiments with tritium. In the 90s, a large-scale tritium circuit with a tritium content of up to 200 g in the circuit was formed at the RFNC VNIIEF to simulate the processes of the vacuum-tritium complex of the CFR and life tests of technological equipment. The fundamental difference between the CFR and experimental facilities will be operation with large amounts of tritium (in the mode of long discharges or steady-state) and the presence of a blanket. The blanket is supposed to be used for utilization of neutron energy and synthesis of target nuclides (including tritium). The CFR vacuum system together with the «tritium plant» form a vacuum tritium complex (VTC), the additional functions of which are the preparation and supply of fuel components (including tritium) to the reactor, closed (cyclic) processing of fusion reaction products and extraction of synthesized in tritium blanket. The functional elements of the VTC are shown in Fig. 1.

Tritium handling technologies are historically well developed in Russia, but they are primarily focused on dual use. Therefore, the creation of FC systems in Russia is possible [3–5], but it will require cooperation and coordination of the work of a dozen different institutions – leading organizations in their fields.

Among the most important engineering and physical issues and tasks that must be solved when creating the VTC are:

- a) selection of parameters, development of schemes and technological equipment for the preparation, injection, pumping/extraction, processing and purification of fuel components;
- b) determination of vacuum parameters and requirements for the means of pumping out various subsystems of the reactor;
- c) the choice of gas-kinetic and thermophysical parameters, the layout of the vacuum path and the development of its elements that meet the criteria of «absolute» operational reliability;

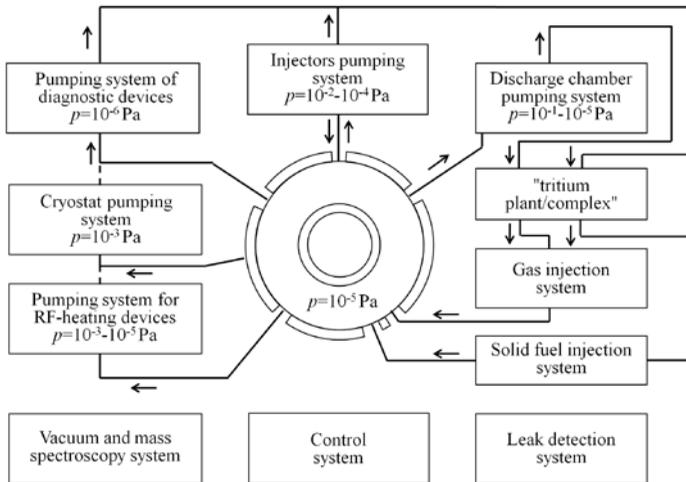


Fig. 1. Conditional block diagram of the vacuum-tritium complex CFR with magnetic confinement [1]

d) comprehensive studies of the interaction of hydrogen isotopes with structural and functional materials (including taking into account the formation of structural defects and the formation of radiogenic helium under the influence of neutron irradiation) for CFR, the choice of design solutions;

e) optimization of technologies for cleaning (detrization) of the vacuum chamber and ducts;

f) creation of reliable methods for sealing and switching the vacuum path, including automatic assembly/remote maintenance;

g) improvement of methods of vacuum measurements and related equipment, methods of operational control of the gas and plasma composition;

h) development of methods and equipment for remote control of tightness and elimination of leaks in various sections of the vacuum path;

i) improvement of technologies for controlling the density and isotopic composition of plasma by fuel injection, additional stimulation/controlling of instabilities at the edge (ELM), additional plasma heating, gas puffing and recycling;

j) reproduction of tritium in the blanket zone and its extraction;

k) ensuring radiation safety in terms of tritium in operational modes and in emergency situations;

l) development of an automated control system for pumping equipment, regeneration, purification and fuel supply units, switching fittings and instrumentation;
and etc.

The report outlines approaches to the organization of FC for existing physical facilities with magnetic confinement and prototypes of fusion reactors, identifies interrelated processes that determine the architecture of FC, lists candidate technologies for creating a closed loop designed for continuous long-term operation, and proposes methods for calculating FC components.

The study was carried out within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics (Project 8 «Physics of Hydrogen Isotopes»).

Крат Степан Андреевич
НИЯУ МИФИ

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

Stepan Krat

NRNU MEPHI

Senior researcher

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



СОЗДАНИЕ НАУЧНЫХ УСТАНОВОК СРЕДНЕГО МАСШТАБА НА ПРИМЕРЕ ОПЫТА УЧЕБНО-ДЕМОНСТРАЦИОННОГО ТОКАМАКА МИФИСТ

*С. А. Крат, А. С. Пришвицын, Н. Е. Ефимов, А. И. Алиева,
Ф. С. Подоляко, А. В. Мельников, Ю. М. Гаспарян*

Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ

Разработка новых научных установок всегда является трудной задачей, сопряженной с проблемами в области инженерии, науки, экономики и бюрократии. В целом, можно выделить три «масштаба» научных устройств: малый масштаб, где для полного цикла разработки необходим один или, самое большее, два человека, большой масштаб, требующий сотрудничества крупных групп ученых и различных организаций, и средний масштаб, при котором вклад отдельного человека они по-прежнему имеют решающее значение, но один человек не способен добиться успеха. В небольших масштабах доминируют наука и инженерия, а в крупных узкими моментами часто являются логистические и административные. Именно установки среднего масштаба, где масштабы научных и административных задач сопоставимы и одинаково сложны, являются темой данной работы. На примере проекта создания среднemasштабного научно-

го устройства токамак МЕРНIST обсуждаются проблемы, ограничения и возможные решения таких проектов.

Проект токамак МЕРНIST (сферический токамак МИФИ) [1] является первым образовательным токамаком в Российской Федерации. Большой радиус токамака составляет 0,25 м, малый радиус – 0,13 м, тороидальное магнитное поле может быть до 0,8 Тл. Ожидаемая продолжительность разряда составляет всего ~30 мс из-за ограниченного источника питания.

Являясь устройством среднего масштаба с ограниченным бюджетом и минимальными инфраструктурными требованиями, МЕРНIST включает в себя ряд оригинальных инженерных решений. Система тороидальных катушек [2] состоит из единого тороидального соленоида, для упрощения управления питанием и синхронизации катушек, чем-то напоминая торсо-трон. Распределенный воздушный индуктор используется для минимизации рассеянных магнитных полей на начальных стадиях разряда без необходимости использования полоидальных катушек [3, 4]. Для изготовления вакуумной камеры МЕРНIST-0 [5] требуется всего 18 сварных швов, а ее размер был ограничен коммерчески доступной простой технологией изготовления. Токмак организован таким образом, что в принципе для управления им необходим только один человек, а поддерживать его работу может команда из ~3 человек. Небольшие размеры устройства позволяют быстро заменять внутренние компоненты, такие как компоненты первой стенки, обращенные к плазме, и облегчают очистку после кондиционирования стенок камеры.

В то же время, как учебное заведение, токамак МЕРНIST должен отражать общие принципы и лучшие практики, применяемые на более крупных установках, таких как токамак Т-15МД, проект ITER. Система сбора и обработки данных МЕРНIST основана на системе EPICS, которая используется на ряде ускорителей элементарных частиц и токамаков, включая ITER. Ряд диагностических средств, таких как ИК-интерферометрическая система, являются маломасштабными версиями диагностических средств, которые разрабатываются или используются для Т-15МД. Токмак оснащен широким спектром диагностик: электромагнитными, такими как пояс Роговского, подвижным электрическим зондом, оптической диагностикой, такой как спектрометры, интерферометры и быстродействующая камера. Подвижный ввод зонда оснащен системой быстрой замены головок, позволяющей менять типы используемых зондов без развакуумирования разрядной камеры, а также устанавливать различные коллекторные зонды для изучения взаимодействия плазменной стенки.

ЖИТЕПАТЫПА

1. Krat S., Prishvitsyn A., Alieva A., Efimov N., Vinit'skiy E., Ulasevich D. et al. MEPHIST-0 Tokamak for Education and Research, *Fusion Sci. Technol.* (2023) 1–19. doi:10.1080/15361055.2022.2149033.

2. Krat S. A., Pryshvitsyn A. S., Alieva A. I., Efimov N. E., Vinit'skiy E. A., Bulgadaryan D. G. et al. MEPHIST-0 Tokamak Toroidal Magnetic Field System, *Phys. At. Nucl.* 84 (2021) 1995–2003. doi:10.1134/S1063778821120024.

3. Sychugov D. Y., Soloviev S. Y., Zhilkin A. S., Melnikov A. V., Krat S. A. Application of integrated simulation environment SIEMNED to the analysis of the MEPHIST-0 tokamak operation, *Plasma Sci. Technol.* 25 (2023) 035602. doi:10.1088/2058-6272/ac9f05.

4. Ulasevich D. L., Khayrutdinov R. R., Lukash V. E., Alieva A. I., Prishvitsyn A. S., Efimov N. E. et al. Optimization of poloidal magnetic system of MEPHIST-0 Tokamak, *Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion.* 45 (2022) 98–107. doi:10.21517/0202-3822-2022-45-1-98-107.

5. Vorobyov G. M., Krat S. A., Mironov V. D., Kurnaev V. A. Vacuum Chamber of the MEPHIST-1 Tokamak, *Phys. At. Nucl.* 83 (2020) 1–7. doi:10.1134/S1063778820100257.

CREATION OF MEDIUM-SCALE SCIENTIFIC INSTALLATIONS ON THE EXAMPLE OF THE EXPERIENCE OF THE EDUCATION AND DEMONSTRATION TOKAMAK MEPHIST

S. A. Krat, A. S. Prishvitsyn, N. E. Efimov, A. I. Alieva, F. S. Podolyako, A. V. Melnikov, Yu. M. Gasparyan

National Research Nuclear University MEPHI

Development of new scientific installations is always an arduous task, with challenges in the fields of engineering, science, economics and logistics. In general, three «scales» of scientific devices can be defined: small scale, where one or, at most, two people are needed for the full cycle of development, large scale, when large groups of people have to cooperate and organize, and the middle scale, at which an individual's contributions are still critical, but a single person is incapable of succeeding. At small scale, science and engineer-

ing dominate, and at large scale, the bottlenecks are often logistical and administrative. It is the middle scale installations, where the scope of scientific and administrative challenges are comparable and equally daunting that are the topic of this work. Using an example of MEPHIST tokamak medium scale scientific device creation project challenges, limitations and possible solutions are discussed.

Tokamak MEPHIST (MEPHI Spherical Tokamak) [1] project is the first dedicated educational tokamak in Russian Federation. The large radius of the tokamak is 0.25 m, the small radius is 0.13 m, toroidal magnetic field can be increased up to 0.8 T. The expected discharge duration is only ~ 30 ms due to limited power supply.

As a medium scale device with limited production budget, and logistical footprint, MEPHIST incorporates a number of novel engineering solutions. Toroidal coil system [2] consists of a single toroidal solenoid, somewhat similar to torsatron, in order to simplify power handling and coil synchronization. Distributed air inductor is used to minimize scattered magnetic fields during the initial stages of the discharge without having to use poloidal coils [3, 4]. Vacuum vessel of MEPHIST-0 [5] only requires 18 welds to produce, and its size was limited by the commercially available simple manufacturing technology. The tokamak is organized in such a way that in principle only one person is necessary to operate it, and a team of ~ 3 people can maintain its operation. The small size of the device allows for a quick change in internal components, such as plasma facing first wall components, and for ease of cleaning after wall conditioning.

At the same time, as a training facility, MEPHIST tokamak has to be representative of common principles and best practices employed in larger facilities, such as T-15MD tokamak, ITER project. Data collection and processing system of MEPHIST is based upon EPICS system, which is employed in a number of particle accelerators and tokamaks, including ITER. A number of diagnostics, such as IR interferometer system, are small scale versions of diagnostics that are being developed or used for T-15MD. The tokamak is equipped with a wide range of diagnostic devices: electromagnetic diagnostics such as Rogovsky coil, movable electric probe, optical diagnostics, such as spectrometers, interferometers and fast camera. The movable probe feedthrough is equipped with a quick change system, allowing one to change the types of probes used without venting the discharge chamber, and to equip a variety of collector probes to study plasma wall interaction.

REFERENCES

1. Krat S., Prishvitsyn A., Alieva A., Efimov N., Vinitkiy E., Ulasevich D. et al. MEPHIST-0 Tokamak for Education and Research, *Fusion Sci. Technol.* (2023) 1–19. doi:10.1080/15361055.2022.2149033.
2. Krat S. A., Pryshvitsyn A. S., Alieva A. I., Efimov N. E., Vinitkiy E. A., Bulgadaryan D. G. et al. MEPHIST-0 Tokamak Toroidal Magnetic Field System, *Phys. At. Nucl.* 84 (2021) 1995–2003. doi:10.1134/S1063778821120024.
3. Sychugov D. Y., Soloviev S. Y., Zhilkin A. S., Melnikov A. V., Krat S. A. Application of integrated simulation environment SIEMNED to the analysis of the MEPHIST-0 tokamak operation, *Plasma Sci. Technol.* 25 (2023) 035602. doi:10.1088/2058-6272/ac9f05.
4. Ulasevich D. L., Khayrutdinov R. R., Lukash V. E., Alieva A. I., Prishvitsyn A. S., Efimov N. E. et al. Optimization of poloidal magnetic system of MEPHIST-0 Tokamak, *Probl. At. Sci. Technol. Ser. Thermonucl. Fusion.* 45 (2022) 98–107. doi:10.21517/0202-3822-2022-45-1-98-107.
5. Vorobyov G. M., Krat S. A., Mironov V. D., Kurnaev V. A. Vacuum Chamber of the MEPHIST-1 Tokamak, *Phys. At. Nucl.* 83 (2020) 1–7. doi:10.1134/S1063778820100257.

Трифонов Сергей Александрович

АО «НИИЭФА»

Ведущий исследователь

196641, Россия, Санкт-Петербург,

дор. на Металлострой, д. 3

Область научных интересов: вакуумная
и плазменная электроника, карбидные покрытия,
ускорительная техника, источники ионов

Sergei Trifonov

JSC NIEFA

Lead researcher

Russia, 196641, St. Petersburg,

road to Metallostroy, 3

Fields of interest: vacuum and plasma electronics,
carbide coatings, accelerator technology,

ion sources

Triser89@gmail.com

**УСКОРИТЕЛИ ИОНОВ И ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА
ДЛЯ МАТЕРИАЛОВЕДЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ***С. А. Трифонов*

АО «НИИЭФА»

Введение. В настоящее время ускорители заряженных частиц становятся все более востребованы для решения прикладных задач в области исследования материалов. АО «НИИЭФА» является одним из лидирующих отечественных предприятий по разработке, изготовлению и установке таких типов ускорителей, как нейтронные генераторы, циклотроны (для задач науки, медицины, материаловедения и др.) и комплексы на их базе. Высокие эксплуатационные характеристики позволяют конкурировать с ведущими мировыми производителями подобного оборудования [1].

Нейтронные генераторы. Генераторы нейтронов предназначены для получения потока нейтронов в стационарном и импульсном режимах работы и применяются для проведения исследований и испытаний на ради-

ационную стойкость различных объектов и материалов; исследований воздействия нейтронного излучения на биологические объекты, при нейтронно-активационном анализе и создании технологий радиационного воздействия нейтронного и гамма-излучения для прикладных целей: медицины, сельского хозяйства, экологии; а также создании комплексов для контроля и поиска взрывчатых и делящихся веществ; а также в составе комплексов аппаратуры для калибровки и сертификации источников нейтронов и приборов для измерения параметров потоков нейтронного излучения.

Генераторы нейтронов серии НГ относятся к высоковольтным ускорителям прямого действия и представляют собой ускорители изотопов водорода с тритиевой мишенью. Источник ускоряющего напряжения обеспечивает $U_{\text{уск}}$ с положительной полярностью относительно земли при номинальном токе нагрузки. Работа генератора нейтронов НГ-10М основана на использовании ядерной реакции по формуле (1):



Ионы дейтерия, образованные в источнике ионов, извлекаются в виде пучка, ускоряются до энергии $W_{\text{макс}}$, кэВ в ускорительной трубке и бомбардируют атомы трития, содержащиеся в мишени. В результате реакции генерируются нейтроны с энергией около 14 МэВ и α -частицы [2]. Современные генераторы нейтронов типа НГ позволяют получать потоки нейтронов до 10^{13} и током пучка до 60 мА.

Внешний вид нейтронного генератора НГ-10М представлен на рис. 1.

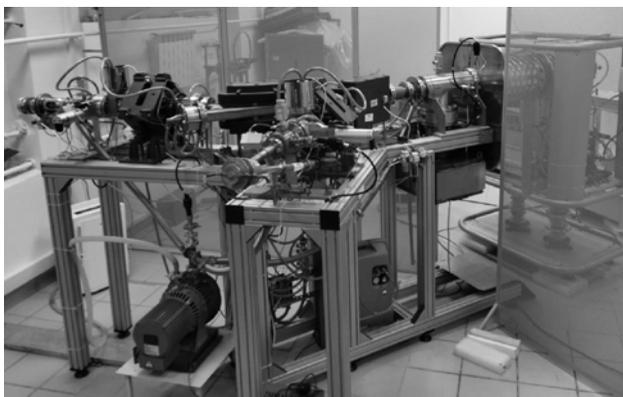


Рис. 1. Генератор нейтронов НГ-10

Заключение. Утвержденный план правительства РФ по реализации федеральной программы развития синхротронных и нейтронных исследований на 2019–2027 годы включает в себя создание установок класса «мегасайенс», среди которых роль АО «НИИЭФА» является одной из ключевых. Продолжается развитие линейки нейтронных генераторов типа НГ, серии циклотронов типа СС, ведется разработка компактного циклотрона с локальной защитой для снижения радиационной нагрузки на персонал. Среди перспективных разработок можно особенно выделить работы по созданию ускорительного комплекса многозарядных ионов для имитаций условия космического пространства с целью испытаний ЭКБ на радиационную стойкость с энергией $8\div 15$ МэВ, а также ускорителя протонов с изменяемой энергией в диапазоне $30\div 250$ МэВ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ворогушин М. Ф., Строкач А. П., Филатов О. Г. Ускорители НИИЭФА прикладного назначения // Письма в ЭЧАЯ. 2016. Т. 13. № 7(205). С. 1251–1256.
2. Воронин Г. Г., Морозов А. В., Свиньин М. П., Солнышков Д. А. и др. Современное состояние и перспективы развития генератора нейтронов НГ-12И для нейтронной терапии и прикладных исследований // Атомная энергия. 2003. Т. 94. Вып. 2. С. 127.

ION AND HYDROGEN ISOTOPE ACCELERATORS FOR MATERIALS SCIENCE RESEARCH

S. Trifonov

JSC NIEFA

At present, charged particle accelerators are becoming more and more in demand for solving applied problems in the field of materials research. JSC «NIEFA» is one of the leading domestic enterprises in the development, manufacture and installation of such types of accelerators as neutron generators, cyclotrons (for the tasks of science, medicine, materials science, etc.) and complexes based on them. High performance characteristics make it possible to compete with the world's leading manufacturers of such equipment [1, 2].

REFERENCES

1. Vorogushin M. F., Strokach A. P., Filatov O. G. NII EFA accelerators applied purpose // *Letters to ECHAYA*. 2016. T. 13. No 7 (205). P. 1251–1256.
2. Voronin G. G., Morozov A. V., Svinin M. P., Solnyshkov D. A. et al. Current status and development prospects of the NG-12I neutron generator for neutron therapy and applied research // *Atomic Energy*. 2003. T. 94. Issue. 2. P. 127.

Розенкевич Михаил Борисович

Российский химико-технологический
Университет им. Д. И. Менделеева
Профессор

125047, Москва, Миусская площадь, 9

Область научных интересов:

Физико-химические методы разделения
изотопов легких элементов

Rozenkevich Mikhail

Mendeleev University of Chemical
Technology of Russia
Professor

125047, Russia, Moscow, Miusskaya Sq. 9

Field of scientific interest: Separation of light ele-
ment isotopes by physico-chemical methods
rozenkev@mail.ru

**ТЕРМОДИНАМИКА И КИНЕТИКА ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ
ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ**

М. Б. Розенкевич

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
Москва, Россия

Открытый в 1932 году Гарольдом Юри изотоп водорода – дейтерий – занимает особое место среди всех других изотопов легких элементов. Это связано с тем, что он нашел широкое применение уже начиная с 40-х годов прошлого века, сначала – военное, а позднее – мирное в качестве замедлителя и теплоносителя в тяжеловодных энергетических реакторах. Поэтому объем производства этого изотопа по сравнению с другими и в настоящее время является наиболее крупномасштабным, а в 70–80-х годах мировой объем производств тяжелой воды (D₂O) достигал нескольких тысяч тонн в год. В этой связи оптимизация экономических затрат на производство играет важную роль. Определяющее значение для этих за-

трат имеют термодинамические и кинетические характеристики используемых процессов разделения.

В настоящем докладе рассматриваются теоретические основы равновесных процессов разделения изотопов водорода с использованием реакций химического изотопного обмена, основной характеристикой которых является однократный эффект разделения, характеризуемый величиной коэффициента разделения α или коэффициента обогащения ε . Анализируется связь значений α с величиной константы равновесия соответствующей химической реакции. С использованием метода статистической термодинамики приводится способ расчета величины коэффициента разделения на основе спектральных данных о собственных частотах колебания молекул, участвующих в реакции изотопного обмена. Обращается внимание на особенности реакций изотопного обмена с участием изотопов водорода: концентрационную зависимость величины коэффициента разделения и закономерности разделения тройных изотопных смесей протий-дейтерий- тритий. В заключительной части доклада рассматривается кинетика реакций изотопного обмена с участием водорода и приводятся частные случаи, позволяющие экспериментально определить скорость реакции с использованием законов реакции первого порядка

THERMODYNAMICS AND KINETICS OF HYDROGEN ISOTOPE SEPARATION BY PHYSICAL-CHEMICAL METHODS

M. B. Rozenkevich

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

The isotope of hydrogen, deuterium, discovered in 1932 by Harold Urey, occupies a special place among all other isotopes of light elements. This is due to the fact that it has found wide application since the 40s of the last century, first – military, and later – peaceful as a moderator and coolant in heavy water power reactors. Therefore, the volume of production of this isotope in comparison with others is currently the largest, and in the 70–80s the world production of heavy water (D₂O) reached several thousand tons per year. In this regard, the optimization of economic costs of production plays an important role. The thermodynamic and kinetic characteristics of the separation processes used are of decisive importance for these costs.

This report discusses the theoretical foundations of equilibrium hydrogen isotope separation processes using chemical isotope exchange reactions, the main characteristic of which is a single separation effect, characterized by the value of the separation factor α or the enrichment factor ε . The relationship between the values of α and the value of the equilibrium constant of the corresponding chemical reaction is analyzed. Using the method of statistical thermodynamics, a method is given for calculating the value of the separation factor based on spectral data on the natural vibration frequencies of the molecules involved in the isotope exchange reaction. Attention is drawn to the features of isotope exchange reactions involving hydrogen isotopes: the concentration dependence of the value of the separation factor and the laws governing the separation of ternary isotopic mixtures of protium-deuterium-tritium. In the final part of the report, the kinetics of isotope exchange reactions involving hydrogen is considered and special cases are given that make it possible to experimentally determine the reaction rate using first-order reaction laws.

Растунова Ирина Леонидовна

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

125047, Москва, Миусская площадь, 9

Область научных интересов: Физико-химические
методы разделения изотопов легких элементов



Rozenkevich Mikhail

Mendeleev University of Chemical
Technology of Russia
Head of department

125047, Russia, Moscow, Miusskaya Sq., 9

Field of scientific interest: Separation
of light element isotopes
by physico-chemical methods
rastunova.i.l@muctr.ru

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ПРОЦЕССОВ РАЗДЕЛЕНИЯ
ИЗОТОПОВ ЛЕГКИХ ЭЛЕМЕНТОВ**

И. Л. Растунова

Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева,
Москва, Россия

Развитие атомно-водородной и термоядерной энергетики, электроники и вычислительной техники, молекулярной биологии и медицины требует создания высокоэффективных технологий получения особо чистых и моноизотопных материалов. Разделение изотопов легких элементов основано на очень малом различии их различных свойств, поэтому было разработано множество методов разделения и способов их практической реализации. Это обстоятельство существенно затрудняет выбор наиболее эффективного процесса разделения конкретной смеси. Определение оптимального для заданных условий способа разделения является важной задачей теории.

В докладе изложены основы общей теории процессов тонкого разделения смесей физико-химическими методами, включающей в себя понятия типов разделительных элементов, в которых осуществляются необратимые (разделительный элемент 1-го типа) и обратимые (разделительный элемент 2-го типа) процессы разделения, теорию построения из них каскадов разделительных элементов и их оптимизации. Для обратимых процессов разделения, наиболее часто используемых для разделения изотопов легких элементов, подробно рассматриваются теоретические основы расчета потоков и числа теоретических ступеней разделения 2-го типа, а также расчета времени достижения стационарного состояния таких каскадов и времени, необходимого для достижения заданной концентрации продукта, и начала его отбора. Рассмотрены примеры расчета технологических схем разделения изотопов водорода.

THEORETICAL FOUNDATIONS OF PROCESSES OF ISOTOPE SEPARATION OF LIGHT ELEMENTS

I. L. Rastunova

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

The development of atomic hydrogen and thermonuclear power engineering, electronics and computer technology, molecular biology and medicine requires the creation of highly efficient technologies for producing highly pure and monoisotopic materials. The separation of isotopes of light elements is based on a very small difference in their various properties; therefore, a lot of separation methods and methods for their practical implementation have been developed. This circumstance significantly complicates the choice of the most efficient process for separating a particular mixture. Determination of the separation method optimal for the given conditions is an important task of the theory.

The report outlines the fundamentals of the general theory of processes for fine separation of mixtures by physical and chemical methods, which includes the concepts of types of separating elements in which irreversible (separating element of the 1st type) and reversible (separating element of the 2nd type) separation processes are carried out, the theory of construction of which cascades of separating elements and their optimization. For reversible separation processes, most commonly used for the separation of isotopes of light elements,

the theoretical basis for calculating flows and the number of theoretical type 2 separation steps, as well as calculating the time to reach the steady state of such cascades and the time required to reach a given concentration of the product, and the beginning of its selection. Examples of calculation of technological schemes for the separation of hydrogen isotopes are considered.

Мусяев Рафаэль Камилевич

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Ведущий научный сотрудник

607190, Россия, г. Саров, пр. Мира, д. 37
Тритиевые технологии, гидриды металлов,
физика плазмы, изотопы водорода

Musyaev Rafael

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

Leading Researcher

Sarov, Nizhny Novgorod region, RU-607190
Tritium technology, hydride of metals, plasma
physic, hydrogen isotopes
RKMusyaev@vniief.ru

ВОДОРОДОПРОНИЦАЕМОСТЬ МЕМБРАННЫХ ОБРАЗЦОВ СТАЛИ, ПОЛУЧЕННЫХ АДДИТИВНЫМ ПЛС-МЕТОДОМ

Р. К. Мусяев

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

607188, г. Саров Нижегородской обл., пр-т Мира, 37

Современное применение аддитивных технологий при производстве различных узлов из конструкционных материалов (КМ), контактирующих с водородом, требует практического подтверждения сохранения характеристик этих КМ или получения обновленных данных, отличающихся от традиционных. Одними из важных характеристик таких КМ, изготовленных аддитивным методом, при взаимодействии с водородом являются параметры водородопроницаемости.

В докладе, в виде обзора различных методик измерений, рассмотрены известные способы расчета параметров проницаемости, диффузии и растворимости водорода для плоских металлических мембран с использованием экспериментальных данных, полученных методом «прорыва» как

при стационарных или импульсных значениях входного давления, так и при условиях динамического вакуума или накопления газа на выходной стороне. Для выбора оптимальной постановки опыта приведены преимущества и недостатки этих экспериментальных методик для различных условий (диапазонов давлений/температур и характеристик образцов). Показаны результаты расчета параметров водородопроницаемости на примере образцов стали 316L и Inconel 718, полученных аддитивным методом послойного лазерного спекания (ПЛС). Рассмотрено влияние геометрии конструкции модельной сборки с мембранным образцом, аналогичным по габаритам ПЛС-образцу, на характер экспериментальной кривой проницаемости (с использованием программных пакетов типа САПР) и возможные погрешности измерений параметров водородопроницаемости, возникающие при таком влиянии.

С использованием классических моделей проницаемости водорода через металлы на основе уравнения Фика показано возможное влияние «ловушек» водорода в дефектах структуры материала в виде пор в ПЛС-образцах на динамику проницаемости водорода через мембрану и на погрешность определения эффективного коэффициента диффузии по характеристическим временам. На примерах микроструктуры и технологических данных изготовления ПЛС-образцов рассматривается возможное влияние пористости на показания растворимости водорода.

HYDROGEN PERMEABILITY OF THE MEMBRANE SAMPLES OBTAINED USING THE ADDITIVE LLS METHOD

R. K. Musyaev

The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute
of Experimental Physics, 607188, Bld. 37, Mira Ave., Sarov, Russia

Advanced additive technology applications for manufacturing different units from structural materials (SM) contacting with hydrogen require practical confirmation of the SM characteristic stability, or obtaining updated data different from conventional ones. Among the most important characteristics of such SM manufactured with the help of the additive method, are their hydrogen permeability parameters, when contacting with hydrogen.

The paper reviews different measuring methods, considers known methods for calculating the parameters of the hydrogen permeability, diffusion and solubility with respect to planar metallic membranes, using experimental data obtained with the help of «the breakthrough» method both at steady or pulsed input pressures, or under dynamic vacuum or gas accumulation at the output side. In order to choose an optimal experimental setup, the advantages and disadvantages of these experimental methods are provided with respect to different conditions (i.e. the pressure/temperature ranges and sample characteristics). Computational hydrogen permeability data are provided for the samples of steel 316L and Inconel 718 obtained with the help of the additive layer-by-layer laser sintering (LLS). It is considered the influence of the geometry of the model assembly with the membrane sample, whose sizes are similar to those of the LLS sample, on the nature of the experimental permeability curves (using SAPR codes), as well as possible errors in measuring the hydrogen permeability parameters resulting from such influence.

Using classical models for hydrogen permeability through metals based on the Fick equation, it is shown the possible influence of hydrogen «traps» in the material structural defects in the form of pores in the LLS samples on the dynamics of the hydrogen permeability through the membranes and errors in defining the effective diffusion factor by characteristic times. Exemplified by the LLS sample microstructure and their manufacturing data, the possible influence of porosity on the hydrogen solubility is shown.

Черкез Дмитрий Ильич

НИЦ «Курчатовский институт»

Старший научный сотрудник

123182, пл. Ак. Курчатова, 1

Термоядерный синтез, взаимодействие плазмы
с материалами, изотопы водорода

Cherkez Dmitriy

NRC «Kurchatov institute»

Senior researcher

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

Fusion, plasma-material interaction, hydrogen
isotopes

Cherkez_DI@nrcki.ru



**УСТАНОВКИ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ
ПЛАЗМЫ С МАТЕРИАЛАМИ ЛВГПМ НИЦ «КУРЧАТОВСКИЙ
ИНСТИТУТ»**

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 термо-ядерных реакторов (ТЯР) является выбор материалов для защиты вакуумной камеры от воздействия плазмы. В качестве обращенных к плазме материалов (ОПМ) для установки ИТЭР, как известно, рассматривались вольфрам и бериллий. Однако на проведенном недавно рабочем совещании поднимался вопрос об отказе от использования бериллия как основного (по площади) материала первой стенки в пользу вольфрама. Данное обстоятельство, а также ряд уже известных особенностей и проблем с ОПМ свидетельствует об отсутствии универсального решения проблемы первой стенки и обуславливает необходимость в расширении перечня материалов и тщательной проработке методов и подходов к ее организации в ТЯР следующих поколений. 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 количества трития в установке, оценки жизненного цикла ОПМ и отработки технологии их детритизации и т. д. Для проведения прикладных исследований в области взаимодействия плазмы с поверхностью применительно к задачам термоядерных установок наиболее интересны высокопоточные плазменные генераторы, которые позволяют имитировать плазменные потоки ТЯР в наиболее нагруженной области – в диверторе [1], ввиду повышенных требований к стойкости материалов. В тоже время целесообразно проведение исследований и при умеренных величинах плазменных потоков, характерных для первой стенки, ввиду большой площади ее поверхности в ТЯР.

В данной работе будет представлен обзор по некоторым плазменным установкам, расположенным в НИЦ «Курчатовский институт», на которых возможно проведение исследований в области взаимодействия плазмы с материалами: установке с СВЧ источником плазмы ПИМ [2], и установке с ВЧ источником плазмы геликонного типа ГПИ-2 [3]. Будут рассмотрены некоторые особенности данных установок, а также представлены наиболее интересные и свежие научные результаты, полученные с их помощью.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 8 «Физика изотопов водорода».

ЛИТЕРАТУРА

1. G. J. van Rooij (2012), Fusion Science and Technology, 61:2T, 266–272.
2. Голубева В. и др. Приборы и техника эксперимента. 2017, № 6. С. 67–77.
3. Черкез Д. И. и др. ВАНТ, Сер.: Термоядерный синтез. 2020. Т. 43, № 3. С. 101–110.

**INSTALLATIONS FOR PLASMA-MATERIAL INTERACTION
INVESTIGATION IN LIGPM NATIONAL RESEARCH CENTER
«KURCHATOV INSTITUTE»**

D. I. Cherkez, N. O. Stepanov, S. S. Ananiev, 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 the plasma-facing materials (PFMs) for vacuum chamber protection from plasma exposure. As is known, tungsten and beryllium were considered PFMs for the ITER. However, at a recent workshop, the issue of abandoning the beryllium usage as the main (by area) material of the first wall was raised in favor of tungsten. This circumstance, as well as a number of already known features and problems with the PFMs, indicates the absence of a universal solution of the first wall problem and necessitates the expansion of the list of materials and a thorough study of methods and approaches to its organization in the next-step FR. For the operation of PFMs in the FR, it is necessary to conduct a number of studies in the field of the interaction of hydrogen isotopes in the form of 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 PFMs 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 PFMs and to develop the technology of their detritization, etc. For applied research in the field of plasma interaction with the surface in relation to the problems of thermonuclear installations, high-flux plasma generators are of most interest, which allow simulating FR plasma flows in the most loaded region - in the divertor [1], due to the increased requirements for the resistance of materials. At the same time, it is expedient to conduct research at moderate values of plasma flows characteristic of the first wall, due to the large area of its surface in the FR.

This paper will present an overview of some plasma facilities located at the National Research Center «Kurchatov Institute», where it is possible to conduct research in the field of interaction of plasma with materials: a PIM facility with microwave plasma source [2], and a facility with a helicon-type HF plasma source GPI -2 [3]. Some features of these installations will be considered, as well as the most interesting and recent scientific results obtained with their help.

The study was carried out within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, direction No. 8 «Physics of Hydrogen Isotopes».

REFERENCES

1. G.J. van Rooij (2012), *Fusion Science and Technology*, 61:2T, 266-272
2. Golubeva V. et al. *Instruments and Experimental Technique*. 2017, No. 6. P. 67–77.
3. Cherkez D. I. et al. *VANT, Series: Thermonuclear synthesis*. 2020. V. 43. No. 3. S. 101–110.

Алексеев Иван Александрович
НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ
Заведующий лабораторией разделения
изотопов водорода
188300, Ленинградская обл., г. Гатчина,
мкр. Орлова роща, д. 1
Разделение изотопов водорода

Ivan Alekseev
NRC «Kurchatov Institute» – PNPI
Head of Hydrogen Isotope Separation Laboratory
Orlova Roshcha, 1, Gatchina, Leningrad District,
Russia, 188300
Separation of hydrogen isotopes
Alekseev_IA@pnpi.nrcki.ru



ТЯЖЕЛАЯ ВОДА. ПРИМЕНЕНИЕ И ПОЛУЧЕНИЕ

И. А. Алексеев, Т. В. Васянина, О. А. Федорченко, В. В. Уборский

НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ

Представлен обзор свойств тяжелой воды и ее применения как в ядерной отрасли, так и в других отраслях науки и техники. Рассмотрены основные способы разделения изотопов водорода и промышленные установки получения тяжелой воды из природного сырья на их основе. Обсуждается получение тяжелой воды из тяжеловодных отходов на опытно-промышленной установке ЭВИО в НИЦ «Курчатовский институт» – ПИЯФ и перспективы создания в России установок получения тяжелой воды из природного сырья.

HEAVY WATER. APPLICATION AND OBTAINING

I. A. Alekseev, O. A. Fedorchenko, T. V. Vasyanina, V. V. Uborsky

NRC «Kurchatov Institute» – PNPI

The report provides an overview of the properties of heavy water and its application both in the nuclear industry and in other branches of science and technology. The main methods of hydrogen isotope separation and industrial plants to produce heavy water from natural raw materials based on them are considered. The production of heavy water from heavy water waste at the EVIO pilot plant at the National Research Center «Kurchatov Institute» – PNPI and the prospects for creating installations to produce heavy water from natural raw materials in Russia are discussed.

Кошлань Владислав Игоревич

НИЦ «Курчатовский институт»

Лаборант-исследователь

123182, Россия, Москва,

пл. Ак. Курчатова, д. 1

Пристеночная плазма, термоядерный реактор,

моделирование пристеночной плазмы

токамаков, взаимодействие пристеночной

плазмы с материалами токамака

Vladislav Koshlan

NRC «Kurchatov institute»

Student, 4th year of Bachelor's degree

Academician Kurchatov Square, 1, Moscow,

Russia, 123182

Scrape-Off Layer (SOL) Plasma, fusion neutron

source, Scrape-Off Layer Plasma Simulation

(SOLPS) , interaction of Scrape-Off Layer Plasma

with tokamak materials

Koshlan_VI@nrcki.ru



**SOLPS – ИНСТРУМЕНТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПОВЕДЕНИЯ
ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В ПРИСТЕНОЧНОЙ ОБЛАСТИ
ТОКАМАКА**

В. И. Кошлань¹, С. С. Ананьев¹

¹ НИЦ «Курчатовский институт», пл. Академика Курчатова, 1,
Москва, Россия, 123182

В рамках задачи проектирования тритиевого цикла термоядерных установок недостаточно рассматривать системы подпитки плазмы термоядерным топливом по-отдельности. Плазма выступает в виде «коллектора», где смешиваются потоки частиц из отдельных систем. Таким образом, плазму следует рассматривать как составную часть топливного цикла и необходимо проводить моделирование поведения изотопов водорода (компонентов термоядерного топлива) в основной и пристеночной плазме установки.

Помимо моделирования основной плазмы важной задачей является моделирование процессов переноса частиц в пристеночной области, ограниченной последней замкнутой магнитной поверхностью, или сепаратрисой, – с одной стороны и стенкой вакуумной камеры – с другой стороны. Частицы, покидающие плазму, переносятся по незамкнутым линиям магнитного поля в область дивертора. Наряду с этим, нейтрализованные частицы проникают обратно через сепаратрису и оказывают влияние на параметры основной плазмы. В пристеночной области (SOL – scrape-off layer) и диверторе происходит наибольшее количество реакций взаимодействия частиц из плазмы с материалами токамака (обращенными к плазме компонентами). Ее моделирование позволяет получать оценки нагрузок и потока частиц на внутрикамерные компоненты установки для дальнейших расчетов транспорта частиц и их накопления.

Моделирование процессов в основной плазме токамака, контроль параметров и поведения были основным направлением термоядерных исследований на протяжении многих десятилетий. В процессе развития токамаков с диверторными конфигурациями были разработаны вычислительные инструменты для SOL: SOLPS [1], UEDGE, EDGE2D [2], SOLEEDGE [3] и др. Один из них - SOLPS, разработанный на основе объединения плазменно-жидкостного кода B2.5 [4, 5] и кинетического кода EIRENE [4, 5] для расчета переноса нейтральных частиц, был принят в качестве основного расчетного кода для моделирования пристеночной плазмы на ITER. За счет дальнейшего развития и верификации на крупнейших установках во всем мире со временем он стал самым популярным инструментом на сегодняшний день. Текущая модификация кода SOLPS-ITER позволяет получать хорошее соответствие экспериментальным данным (в отличие от других кодов) и обладает, таким образом, наилучшей предсказательной способностью.

На базе SOLPS реализовано согласованное моделирование (integrated modeling) как инструмент для анализа экспериментальных данных и предсказательного моделирования. Эти возможности появляются за счет объединения различных кодов (в том числе, ASTRA и SOLPS) [6], моделирующих параметры основной плазмы и SOL. Развитие данной методики наиболее интересно для сквозного моделирования компонентов топлива во всех системах термоядерного топливного цикла токамака, включая плазму. В докладе описываются методика расчетов с помощью версии кода SOLPS-ITER и перспективы применения данного инструмента при моделировании перспективных установок.

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

ЛИТЕРАТУРА

1. Bonnin X. et al. *Plasma and Fusion Research*, 2016, 11:1403102-1403102.
2. Chankin A. V. et al. *Plasma Phys. Control. Fusion*, 61, 2019, 075010.
3. Ciraolo G. et al. *Nuclear Materials and Energy*. 2019. Vol. 20. 100685.
4. Schneider R. et al. *Contributions to Plasma Physics*, 2006. Vol. 46.
5. Kotov V. et al. *Juel-Report*, 2007, 4257.
6. Pacher H. D. et al. Impurity seeding in ITER in a carbon-free environment. *J. Nucl. Mater.*, 2015. Vol. 463. P. 591.

SOLPS AS A TOOL FOR HYDROGEN ISOTOPES TRANSPORT SIMULATION IN THE SCRAP-OFF LAYER A TOKAMAK

V. I. Koshlan¹, S. S. Ananyev¹

¹ NRC «Kurchatov institute», Ak. Kurchatov sq. 1, Moscow, Russia, 123128

As part of the task of designing the tritium cycle of fusion-fission reactor, it is not enough to consider plasma fueling systems with fusion fuel separately. Plasma appears as a «collector», where particle flows from individual systems are mixed. Thus, plasma should be considered as an integral part of the fuel cycle and it is necessary to modeling the behavior of hydrogen isotopes (components of fusion fuel) in the main and SOL-plasma (SOL – scrap-off layer) of the reactor.

In addition to modeling the main plasma, an important task is to simulate the processes of particle transport in the SOL-region bounded by the last closed magnetic surface, or separatrix, on the one hand and the wall of the divertor on the other hand. Particles leaving the plasma are transported along open magnetic field lines to the divertor region. Along with this, neutralized particles penetrate back through the separatrix and affect the parameters of the main plasma. In the SOL-region and the divertor, the most reactions of plasma interaction with tokamak materials (plasma-facing components) occur. Its modeling makes it possible to obtain estimates of the loads and particle flow on the in-chamber

components of the facility for further modeling of particle transport and their inventories.

Processes in the main tokamak plasma simulation, control of parameters and behavior have been the main focus of fusion research for many decades. During the development of tokamaks with divertor configurations, computational tools for SOL were developed: SOLPS [1], UEDGE, EDGE2D [2], SOLEDGE [3], etc. One of them, SOLPS, developed on the basis of combining the plasma-liquid code B2.5 [4, 5] and the kinetic code EIRENE [4, 5] for calculating the transfer of neutral particles, was adopted as the main calculation code for modeling SOL-plasma on ITER. Due to further development and verification at the largest reactors around the world, over time it has become the most popular tool today. The current modification of the SOLPS-ITER code makes it possible to obtain a good correspondence to experimental data (unlike other codes) and thus has the best predictive ability.

Integrated modeling is implemented on the basis of SOLPS as a tool for analyzing experimental data and predictive modeling. These possibilities appear due to the combination of various codes (including ASTRA and SOLPS) [6], modeling the parameters of the main plasma and SOL. The development of this technique is most interesting for end-to-end modeling of fuel components in all tokamak thermonuclear fuel cycle systems, including plasma. The report describes the calculation methodology using the SOLPS-ITER version of the code and the prospects for using this tool in modeling promising reactors.

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

Жмуровский Артем Вадимович
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Научный сотрудник
607188, г. Саров, пр-т Мира, 37
Теплопроводность, изотопы водорода

Zhmurovskiy Artem
FSUE «RFNC-VNIIEF»
Junior Researcher
Mira street 37, Sarov, RU-607188
Thermal conductivity, hydrogen isotopes
Arcad@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, г. Саров Нижегородской обл., пр-т 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.

THE FACILITY FOR DEFINING THE POWDER MATERIAL HEAT CONDUCTIVITIES AT HIGH TEMPERATURES AND PRESSURES

*A. V. Zhmurovsky, E. V. Buryak, R. K. Musyaev, V. V. Tikhonov,
A. V. Ryzhukhina*

The Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, 607188, Bld. 37, Mira Ave., Sarov, Russia

One of the main characteristics of porous gas-permeable materials is their heat conductivity. Such materials may be widely applicable in terms of gas environment pressures and temperatures. Serially produced equipment is not suited for obtaining the heat conductivities at the gas pressures (including hydrogen) of up to 150 MPa and temperatures of up to 600 °. In order to address this task, a facility capable of defining the heat conductivities under such conditions was designed and manufactured.

The work describes the facility design and operation. Additionally, the facility calibration data are provided, as well as heat conductivities of several materials.

Эльман Роман Романович

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

Elman Roman

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



МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМЕ ХРАНЕНИЯ ВОДОРОДА НА ОСНОВЕ МАГНИЯ/ГИДРИДА МАГНИЯ

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

Томский политехнический университет

Развитие водородной энергетики привлекает все большее внимание международного сообщества. Одной из ключевых задач для крупномасштабного применения водорода является внедрение безопасной и эффективной системы хранения и транспортировки водорода. Для этой роли рассматривается применение металлогидридных реакторов. На производительность металлогидридного реактора влияет множество различных параметров, и одним из наиболее важных является управление тепловыми характеристиками реактора. Эффективное управление температурой может быть достигнуто за счет конструктивных параметров, таких как оптимальное расположение фильтров, геометрическое распределение гидрида металла внутри контейнера, конструкция ребер и т. д. Известные методы увеличения теплопередачи включают использование пенометаллов, металлогидридных компактов, теплообменников и внешних кожухов. Однако использование теплообменников и различных конструкций ребер является наиболее распространенным способом решения задач тепломассопе-

реноса в металлгидридных реакторах. Чрезвычайно перспективным методом разработки высокоэффективных теплообменников для металлгидридных резервуаров могут стать аддитивные технологии. Аддитивное производство позволяет изготавливать небольшие детали исключительно сложной формы, а также внутренние конструкции и матрицы, невозможные при любом другом способе производства металлов.

В данной работе был рассмотрена модель металлгидридного реактора с материалом-накопителем водорода на основе Mg/MgH₂. Численное моделирование производилось с использованием пакета программ Comsol Multiphysics. Для улучшения теплопередачи в металлгидридной засыпке рассматривался резистивно нагреваемый стержень с медными дисками разной геометрии. Было произведено моделирование течения водорода в свободном объеме и металлгидридной засыпке, а также рассчитана скорость зарядки металлгидридного аккумулятора водорода.

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

SIMULATION OF THERMAL PROCESSES IN A HYDROGEN STORAGE SYSTEM BASED ON MAGNESIUM/MAGNESIUM HYDRIDE

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

Tomsk Polytechnic University

The development of hydrogen energy is attracting more and more attention from the international community. One of the key challenges for large-scale applications of hydrogen is the implementation of safe and efficient hydrogen storage and transportation system. For this purpose, the use of metal hydride reactors is being considered. There are many different parameters that affect the performance of a metal hydride reactor, one of the most important of which is the heat management. Effective thermal management can be achieved through design parameters, such as an optimal filter arrangement, geometric distribution of metal hydride inside the container, design of fins, etc. Known methods for increasing heat transfer include the use of metal foams, compacts, heat exchangers and external jackets. However, the use of heat exchangers and various

fins designs is the most common way to solve the problems of heat and mass transfer in metal-hydride reactors. An extremely promising method for developing highly efficient heat exchangers for metal hydride tanks can be additive manufacturing technologies. Additive manufacturing makes it possible to produce small parts with exceptionally complex shapes, as well as internal structures and matrices not possible with any other type of metal manufacturing.

In this paper, we considered a model of a metal hydride reactor with a hydrogen storage material based on Mg/MgH₂. Numerical simulation was carried out using the Comsol Multiphysics software package. To improve heat transfer in the metal hydride bed, a resistively heated rod with copper fins (disks) of different geometry was considered. Simulation of the flow of hydrogen in the free volume and metal hydride bed was carried out. The charging rate of the hydrogen metal hydride accumulator was calculated as well.

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.

Самарханов Куаныш Канатулы

филиал Институт атомной энергии Национального центра Республики Казахстан
Научный сотрудник
071100, Казахстан, г. Курчатов,
ул. Бейбит атом, 10

Физика низкотемпературной плазмы, газовые лазеры, взаимодействие изотопов водорода с литием

Kuanysh Samarkhanov

Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan
Researcher

071100, Kazakhstan, Kurchatov town,
10 Beybit Atom st.

Low-temperature plasma physics, gas lasers,
interaction of hydrogen isotopes with lithium
samarkhanov@nnc.kz

**ВЫДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ИОНОВ ТРИТИЯ И α -ЧАСТИЦ ИЗ ПРИПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ЛИТИЯ ПРИ НЕЙТРОННОМ ОБЛУЧЕНИИ В АКТИВНОЙ ЗОНЕ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА**

К. Самарханов^{1}, Э. Батырбеков², М. Хасенов¹, Т. Кульсартов¹,
Ю. Гордиенко¹, Ю. Понкратов¹, Е. Тулубаев¹, В. Бочков¹*

¹ Филиал Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан, г. Курчатов, Казахстан

² Национальный ядерный центр Республики Казахстан,
г. Курчатов, Казахстан

В последние годы одним из перспективных направлений в развитии термоядерных установок являются исследования, связанные с использованием лития [1] и его различных соединений [2] в качестве материала, обращенного к плазме. Использование лития в качестве материала, обращенного к плазме, в большинстве случаев реализуется за счет использо-

вания капиллярно-пористой структуры (КПС) в качестве стабилизирующей матрицы [3]. Чтобы обеспечить эффективную генерацию трития, необходимо изучить его взаимодействие с элементами систем термоядерных реакторов и в первую очередь с самим материалом, в котором будет генерироваться тритий. В [4] представлены экспериментальные исследования, показывающие возможность использования метода оптической диагностики высокотемпературной плазмы в термоядерных реакторах. В экспериментах по изучению оптического излучения ядерно-возбуждаемой плазмы, проводимых на ядерных реакторах, газовое возбуждение обычно осуществляют с использованием продуктов экзотермических ядерных реакций, происходящих при взаимодействии тепловых нейтронов с ядрами ${}^3\text{He}$, ${}^{235}\text{U}$, ${}^{10}\text{B}$, ${}^6\text{Li}$ [5]. Менее изученным до наших работ [6, 7] было использование ядерной реакции лития-6 с тепловыми нейтронами. Большая длина свободного пробега ядер трития в литии (130 мкм) и газовых средах (35 см в гелии атмосферного давления) позволяет возбуждать большие объемы газов и обеспечивать большую мощность, вложенную в газ, в сравнении с продуктами реакции ${}^{10}\text{B}$.

В настоящей работе рассматриваются *in-situ* спектроскопические измерения ядерно-возбужденной плазмы инертных газов, в частности, люминесценции инертных газов в широком температурном и спектральном диапазоне, возбуждаемых продуктами ядерной реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$ в активной зоне ядерного реактора. Источником возбуждения газов служит тонкий слой лития, нанесенный на стенки экспериментального устройства [8], стабилизированный в матрице КПС. В ходе внутриреакторных испытаний, проведенных на исследовательском реакторе ИВГ.1М, тепловые нейтроны взаимодействуют по реакции ${}^6\text{Li}(n, \alpha){}^3\text{H}$, а вылетевшие альфа-частицы с кинетической энергией 2,05 МэВ и ионы трития с кинетической энергией 2,73 МэВ возбуждают газовую среду. Интенсивность выделения ионов трития из слоя лития в инертных газах оценивали по интенсивности α -линии Бальмеровской серии атома трития Ta (656,2 нм). Исследованы температурные зависимости интенсивности излучения атомов инертных газов и выделения трития. При температуре, равной 673 К наблюдалось значительное выделение трития за счет начала десорбции термализованных атомов трития, растворенных в жидкой фазе лития.

Полученные результаты представляют интерес с точки зрения выяснения механизмов и разработки моделей, позволяющих описать процессы генерации, диффузии и выделения трития из лития при нейтронном облучении.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tazhibayeva I. et al. Fusion Eng. Des. Vol. 146. P. 402–405, 2019.
2. Kulsartov T. et al. Fusion Eng. Des. Vol. 172. 112703, 2021.
3. Lyublinski I. et al. J. Nucl. Mater. Vol. 463. P. 1156–1159, 2015.
4. Apruzzese G. M. et al. Fusion Eng. Des. Vol. 117. P. 145–149, 2017.
5. Mel'nikov S. P. et al. «Lasers with Nuclear Pumping», Springer. P. 455, 2015.
6. Ponkratov Yu. et al. Fusion Sci. Technol. Vol. 77, Issue 4. P. 327–332, 2021.
7. Batyrbekov E. et al. J. Lumin. Vol. 220, 116973, 2020.
8. Samarkhanov K. et al. Sci. Technol. Nucl. Vol. 2020, 8891891, 2020.

HIGH-ENERGY TRITIUM IONS AND α -PARTICLES RELEASE FROM THE NEAR-SURFACE LAYER OF LITHIUM DURING NEUTRON IRRADIATION IN THE NUCLEAR REACTOR CORE

K. Samarkhanov¹, E. Batyrbekov², M. Khasenov¹, T. Kulsartov¹, Y. Gordienko¹, Y. Ponkratov, Y. Tulubayev¹, V. Bochkov¹

¹Institute of Atomic Energy Branch of the National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

²National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan, Kurchatov, Kazakhstan

In recent years, one of the promising directions in the development of fusion facilities is research, related to the use of lithium [1] and its various compounds [2] as a plasma-facing material. The use of lithium as a plasma-facing material in most cases is realized by using a capillary-porous structure (CPS) as a stabilizing matrix [3]. To ensure effective tritium generation, it is necessary to study its interaction with the elements of fusion reactor systems and foremost with the material itself, in which the tritium will be generated. In [4] describes experimental studies that show the possibility of using the method of optical diagnostics of high-temperature plasma in fusion reactors. In experiments to study the optical radiation of nuclear-excited plasma conducted at nuclear reactors, gas excitation is usually carried out by using products of exothermic nuclear reactions occurring the interaction of thermal neutrons with ³He, ²³⁵U,

^{10}B , ^6Li nuclei [5]. Less studied before our works [6, 7] was the use of a nuclear reaction with lithium-6 with thermal neutrons. The large mean free path of tritium nuclei in lithium (130 μm) and gaseous media (35 cm in atmospheric pressure helium) makes it possible to excite large volumes of gases and provide a larger amount of power nested in the gas in comparison with reaction products with ^{10}B .

The present paper examines *in-situ* spectroscopic measurements of nuclear-excited plasma of noble gases, in particular, the luminescence of noble gases in a wide temperature and spectral range, excited by the $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ nuclear reaction products in the core of a nuclear reactor. A thin layer of lithium applied on the walls of the experimental device [8], stabilized in the matrix of CPS, serves as a source of gas excitation. During in-pile tests, conducted at the IVG.1M research reactor, thermal neutrons interact via the $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ reaction, and the emergent alpha particles with a kinetic energy of 2,05 MeV and tritium ions with a kinetic energy of 2,73 MeV excite gaseous medium. The intensity of tritium release from the lithium layer in noble gases was estimated by the intensity of the alpha line of the Balmer series of the tritium atom $\text{T}\alpha$ (656,2 nm). The temperature dependence of intensity of the emission of atoms of noble gases and tritium release were studied. A significant tritium release was observed at 673 K due to the beginning of desorption of thermalized tritium atoms dissolved in the liquid phase of lithium. The results are of interest in terms of clarifying the mechanisms and developing models that allow describing the processes of generation, diffusion, and release of tritium from lithium during neutron irradiation.

REFERENCES

1. Tazhibayeva I. et al. Fusion Eng. Des. Vol. 146. P. 402–405, 2019.
2. Kulsartov T. et al. Fusion Eng. Des. Vol. 172. 112703, 2021.
3. Lyublinski I. et al. J. Nucl. Mater. Vol. 463. P. 1156–1159, 2015.
4. Apruzzese G. M. et al. Fusion Eng. Des. Vol. 117. P. 145–149, 2017.
5. Mel'nikov S. P. et al. «Lasers with Nuclear Pumping», Springer. P. 455, 2015.
6. Ponkratov Yu. et al. Fusion Sci. Technol. Vol. 77, Issue 4. P. 327–332, 2021.
7. Batyrbekov E. et al. J. Lumin. Vol. 220, 116973, 2020.
8. Samarkhanov K. et al. Sci. Technol. Nucl. Vol. 2020, 8891891, 2020.

Шишкова Татьяна Александровна
НИЦ «Курчатовский институт»
Лаборант-исследователь
123182, пл. Ак. Курчатова, 1
Термоядерный синтез, изотопы водорода

Shishkova Tatyana
NRC Kurchatov institute
Research assistant
Ac. Kurchatov sq., 1, Moscow RU-123182
Fusion, hydrogen isotopes
anfimova_t_a@mail.ru



МЕТОДЫ ДЕТРИТИЗАЦИИ МАТЕРИАЛОВ В ТЕРМОЯДЕРНЫХ РЕАКТОРАХ

Т. А. Шишкова^{1, 2}, А. В. Голубева¹, М. Б. Розенкевич²

¹ НИЦ «Курчатовский институт», Москва, Россия

² Российский химико-технологический университет им. Д. И. Менделеева, Москва, Россия

Поскольку накопление трития в материалах является потенциальной проблемой для термоядерных реакторов (ТЯР), разработка технологий извлечения трития, то есть детритизации, является одной из приоритетных задач в развитии термоядерной энергетики. Необходимость ее решения обусловлена вопросами безопасности, так как проникновение трития в окружающую среду через реакторные материалы может представлять потенциальную угрозу для здоровья персонала и населения. Кроме того, из-за высокой стоимости трития его извлечение и возврат в топливный цикл являются необходимыми с точки зрения снижения экономических потерь. Задача извлечения трития актуальна также в рамках подготовки материалов к окончательной утилизации для удовлетворения требованиям радиационной безопасности.

Несмотря на то, что бериллий и вольфрам – одни из основных кандидатов материалов первой стенки ТЯР – характеризуются низкой растворимостью водорода, захват в дефектах кристаллической структуры может

обусловить высокую скорость накопления. Чтобы поддерживать безопасную и эффективную работу термоядерного реактора, в процессе его эксплуатации необходимо проводить периодическую детритизацию вакуумной камеры. Для решения этой задачи требуются эффективные методы, позволяющие без нарушения целостности и формы элементов реактора обеспечить необходимую степень детритизации материала. В качестве таких методов рассматривают прогрев в вакууме, изотопный обмен, продувку инертным газом, облучение плазменным разрядом, импульсное лазерное облучение. Прогрев в вакууме в настоящее время является основной технологией детритизации материалов реактора ИТЭР [1].

Целью данного доклада является обобщение и систематизация результатов литературных данных, посвященных исследованиям эффективности различных методов детритизации. Большая часть экспериментальных исследований проводится с легкими изотопами водорода ввиду их доступности и простоты обращения, и условия в лабораторных экспериментах далеки от условий в ТЯР (потoki и плотности потоков, как правило, существенно ниже). Тем не менее, можно отметить ряд закономерностей, которые будут справедливы и при детритизации материалов термоядерного реактора.

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 8 «Физика изотопов водорода».

ЛИТЕРАТУРА

1. Shimada M. et al. J. Nucl. Mater. S1013-S1016 (2011) 415.

METHODS OF TRITIUM REMOVAL FROM FUSION REACTOR MATERIALS

T. Shishkova^{1, 2}, A. Golubeva¹, M. Rozenkevich²

¹ National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow (Russia)

² Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, Moscow (Russia)

Since the tritium retention in materials is a potential problem for fusion reactors, the development of tritium removal technologies is one of the priority

challenges in the development of fusion energy reactors. The need to solve this problem is due to safety issues, since the tritium release into the environment through reactor materials can pose a potential hazard to the health of personnel and the public. In addition tritium cost is very high, and its removal and return to the fuel cycle is necessary in terms of reducing economic losses. The problem of tritium removal is also relevant when preparing reactor structural elements for final disposal to meet radiation safety requirements.

The candidate materials for the plasma-facing components of fusion reactors (tungsten, beryllium) have low hydrogen solubility, but the trapping of fuel isotope in structural defects can determine the high rate of tritium retention. To maintain the safe and efficient operation of a fusion reactor it is necessary to periodically remove tritium from vacuum chamber materials. For this purpose cost-effective methods are required to ensure the necessary degree of tritium removal without violating the integrity and shape of the reactor elements. Vacuum heating, isotope exchange, inert gas purge, plasma discharge irradiation, and pulsed laser irradiation are considered in the literature as such methods. Vacuum heating is considered as a technology of tritium removal from ITER reactor materials [1].

The purpose of this work is to generalize and systematize the literature data on studies of the effectiveness of various tritium removal methods. Most of the experimental studies are carried out with light hydrogen isotopes due to their availability and ease of handling, also the conditions simulated in the experiments are not the same as real plasma fluxes and fluencies in fusion reactors. Despite this fact, a number of important regularities can be noted that will be fair at tritium removal from fusion reactor materials.

The study was carried out within the framework of the scientific program of the National Center for Physics and Mathematics, № «Physics of Hydrogen Isotopes».

REFERENCES

1. Shimada M. et al. J. Nucl. Mater. S1013-S1016 (2011) 415.

Пшеницын Михаил Борисович

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

Аспирант

125480, Москва, ул. Героев Панфиловцев, д. 20

Технология производства жидкого водорода,
концентрирование дейтерия, изотопный обмен,
наноматериалы

Mikhail Pshenitsyn

D. Mendeleev University of Chemical Technology
of Russia

Graduate student

125480, Moscow, st. Geroev Panfilovtsev, 20

Liquid hydrogen production technology, deuterium
concentration, isotopic exchange, nanomaterials

Pshenmichail@gmail.com



**НИЗКОТЕМПЕРАТУРНАЯ КОНВЕРСИЯ МОДИФИКАЦИЙ
ВОДОРОДА И ДЕЙТЕРО-ВОДОРОДНЫЙ ОБМЕН В ПРОЦЕССАХ
ОЖИЖЕНИЯ И РАЗДЕЛЕНИЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА
КРИОГЕННОЙ РЕКТИФИКАЦИЕЙ**

М. Б. Пшеницын, О. А. Боева

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Российский химико-технологический университет
им. Д. И. Менделеева»

Получение жидкого водорода увеличивается с каждым годом. Он необходим для водородной энергетики, разделения изотопов водорода криогенной ректификацией, а также для высокоэффективного ракетостроения различного назначения. Согласно энергетической стратегии Российской Федерации, к 2035 г. страна должна войти в число мировых лидеров по производству и потреблению водорода. На данный момент инфраструктура водорода в России представлена в большинстве своем заводами, являющимися частью производств крупнотоннажной химической промышленности. В свою очередь, для развития данной инфраструктуры необхо-

димо иметь возможность транспортировки и длительного хранения. Наиболее экономически выгоден для этого жидкий водород. В производстве жидкого водорода присутствует стадия каталитической реакции орто-пара конверсии протия, заключающаяся в изменении ориентации спинов ядер в молекуле водорода с параллельной на антипараллельную. Тепловыделение данной реакции превышает теплоту испарения, что приводит к значительной потере продукта. Реакция происходит самопроизвольно только в жидком водороде, поскольку он обладает магнитными свойствами. Для решения этой проблемы необходимо в процессе ожижения проводить принудительную конверсию, которая требует высокоэффективного катализатора.

В процессе криогенной ректификации водорода также необходим катализатор для разложения дейтеро-водородной смеси.

В данной работе представлены результаты исследования катализаторов на основе наночастиц металлов 1-Б группы. Показано, что наночастицы металлов обладают достаточно высокой каталитической активностью в обеих реакциях. Недостаток данных катализаторов заключается в неустойчивости к температурам выше 150–200 °С. Медные наночастицы к тому же склонны к окислению на воздухе. Однако проблемы можно решить формированием биметаллических частиц. Взаимодействие металлов при нахождении в одном наноагрегате приводит к проявлению синергии, заключающейся в повышении как каталитических свойств, так и устойчивости к воздействиям внешней среды.

Работа выполнена в рамках программы развития РХТУ им. Д. И. Менделеева «Приоритет-2030».

**LOW-TEMPERATURE CONVERSION OF HYDROGEN
MODIFICATIONS AND DEUTERIUM-HYDROGEN EXCHANGE IN
THE PROCESSES OF LIQUEFACTION AND SEPARATION OF
HYDROGEN ISOTOPES BY CRYOGENIC DISTILLATION**

M. B. Pshenitsyn, O. A. Boeva

Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «Russian
University of Chemical Technology named after D. I. Mendeleev»

The production of liquid hydrogen is increasing every year. It is necessary for hydrogen energy, separation of hydrogen isotopes by cryogenic distillation, as well as for highly efficient rocket science for various purposes. According to the energy strategy of the Russian Federation, by 2035 the country should become one of the world leaders in the production and consumption of hydrogen. At the moment, the hydrogen infrastructure in Russia is represented mainly by plants that are part of the large-capacity chemical industry. In turn, for the development of this infrastructure, it is necessary to have the possibility of transportation and long-term storage. Liquid hydrogen is the most cost-effective for this. In the production of liquid hydrogen, there is a stage of the catalytic reaction of the ortho-para conversion of protium, which consists in changing the orientation of the spins of the nuclei in the hydrogen molecule from parallel to antiparallel. The heat release of this reaction exceeds the heat of vaporization, which leads to a significant loss of the product. The reaction occurs spontaneously only in liquid hydrogen, since it has magnetic properties. To solve this problem, it is necessary to carry out forced conversion in the liquefaction process, which requires a highly efficient catalyst.

In the process of cryogenic hydrogen distillation, a catalyst is also needed to decompose the deuterium-hydrogen mixture.

This paper presents the results of a study of catalysts based on nanoparticles of metals of group 1-B. It has been shown that metal nanoparticles have a sufficiently high catalytic activity in both reactions. The disadvantage of these catalysts is the instability to temperatures above 150–200 °C. Copper nanoparticles are also prone to oxidation in air. However, the problems can be solved by the formation of bimetallic particles. The interaction of metals when they are in one nanoaggregate leads to the manifestation of synergy, which consists in an increase in both catalytic properties and resistance to environmental influences.

The work is performed in the framework of the development program «Priority-2030» of the Mendeleev University of Chemical Technology of Russia.

Киселев Святослав Сергеевич

Уральский федеральный университет имени
первого Президента России Б. Н. Ельцина

Аспирант

620002, Свердловская область,

г. Екатеринбург, ул. Мира, д. 19

Область научных интересов: разделение
изотопов, масс-спектрометрия

Kiselev Svyatoslav Sergeevich

Ural Federal University named after the first

President of Russia B. N. Yeltsin

Graduate student

620002, Sverdlovsk region, Yekaterinburg,
st. Mira, 19

Fields of interest: isotope separation,

mass spectrometry

avtofan96rus@gmail.com

**ПРИМЕНЕНИЕ ГАЗОВЫХ ЦЕНТРИФУГ ДЛЯ РАЗДЕЛЕНИЯ
ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА (МНОГОКОМПОНЕНТНОЕ
РАЗДЕЛЕНИЕ)**

С. С. Киселев

Уральский федеральный университет имени первого Президента России
Б. Н. Ельцина

Центрифуга остается эффективным разделительным устройством, способным конкурировать с более новыми технологиями, например, лазерным разделением. Это обусловлено как самим принципом разделения, так и существованием хорошо отработанных и испытанных устройств.

Центрифуга, первоначально, была разработана для разделения бинарной газовой смеси. Современные потребности разделения требуют приспособления центрифуги для разделения многокомпонентных смесей. Это требует доработки конструкции самой центрифуги и теоретического

исследования оптимального разделения многокомпонентных смесей в этом устройстве.

Одной из проблем, которую необходимо решить, является организация дополнительного отбора. Центрифуга для разделения бинарной смеси с двумя отборами не способна обеспечить эффективное выделение из многокомпонентной смеси молекул с промежуточными массами. Даже в случае, когда целью разделения является получение компонента с минимальной или максимальной массой, наличие в смеси составляющих с промежуточными массами препятствует эффективному обогащению смеси целевым компонентом. Как было показано в работах [1, 2], одним из перспективных способов повышения эффективности разделения является организация в бинарном каскаде дополнительного отбора для выведения компонента с промежуточной массой.

В работе проведен расчет местоположения (радиус) дополнительного отбора промежуточного компонента в прямоточной центрифуге с условием максимизации коэффициента разделения. Проанализирована зависимость коэффициента разделения от концентрации компонент смеси.

Получено выражение для коэффициента разделения для всех компонент. Показано, что оптимальная точка отбора промежуточного компонента зависит от отношения концентраций легкого и тяжелого компонентов. Полученные выражения применены для промежуточного компонента водорода (масса 3) и могут также применяться к различным газообразным веществам, а впоследствии быть частью расчета многокомпонентного разделительного каскада.

ЛИТЕРАТУРА

1. Палкин В. А. Многопоточные каскады для разделения многокомпонентных изотопных смесей // Атомная энергия. 2015. Т. 119, № 2. С. 101–105.
2. Палкин В. А., Сбитнев Н. А., Фролов Е. С. Расчет оптимальных параметров каскада для разделения многокомпонентной смеси изотопов // Атомная энергия. 2002, № 92(2), С. 130–133.

THE USE OF GAS CENTRIFUGES FOR THE SEPARATION OF HYDROGEN ISOTOPES (MULTICOMPONENT SEPARATION)

S. S. Kiselev

Ural Federal University named after the first President of Russia B. N. Yeltsin

The centrifuge remains an efficient separation device that can compete with newer technologies such as laser separation. This is due both to the very principle of separation, and the existence of well-developed and tested devices.

The centrifuge was originally designed to separate a binary gas mixture. Modern separation needs require the adaptation of a centrifuge to separate multi-component mixtures. This requires refinement of the design of the centrifuge itself and a theoretical study of the optimal separation of multicomponent mixtures in this device.

One of the problems that needs to be solved is the organization of additional selection. A centrifuge for separating a binary mixture with two selections is not capable of providing efficient separation of molecules with intermediate masses from a multicomponent mixture. Even when the goal of separation is to obtain a component with a minimum or maximum mass, the presence of components with intermediate masses in the mixture prevents the effective enrichment of the mixture with the target component. As shown in [1, 2], one of the promising ways to increase the efficiency of separation is to organize additional selection in a binary cascade to remove a component with an intermediate mass.

In the work, the location (radius) of the additional selection of the intermediate component in the once-through centrifuge was calculated with the condition of maximizing the separation factor. The dependence of the separation factor on the concentration of the mixture components is analyzed.

An expression for the separation factor for all components is obtained. It is shown that the optimal sampling point for the intermediate component depends on the ratio of the concentrations of the light and heavy components. The resulting expressions are applied to the intermediate component of hydrogen (mass 3) and can also be applied to various gaseous substances, and subsequently be part of the calculation of a multicomponent separation cascade.

REFERENCES

1. Palkin V. A. Multiflow cascades for separating multicomponent isotope mixtures // *Atomic Energy*. 2015. Vol. 119, No. 2. P. 101–105.
2. Palkin V. A., Sbitnev N. A., Frolov E. S. Calculation of the optimal parameters of the cascade for the separation of a multicomponent mixture of isotopes // *Atomic Energy*. 2002. No. 92 (2). P. 130–133.

Рогожина Марина Анатольевна
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Старший научный сотрудник
607188, Россия, г. Саров Нижегородской
обл., пр-т Мира, 37

Rogozhina Marina
FSUE «RFNC-VNIIEF»
Senior researcher
607188, Sarov, Nizhny Novgorod region,
Russia
oefimova@otd13.vniief.ru



ФОРМИРОВАНИЕ МОНОКРИСТАЛЛИЧЕСКОГО СЛОЯ ДЕЙТЕРИЯ В СФЕРИЧЕСКОЙ ОБОЛОЧКЕ

М. А. Рогожина¹, Е. Ю. Зарубина^{1,2}, И. А. Чугров¹

¹ Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

² МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, физический факультет,
филиал МГУ в г. Сарове
oefimova@otd13.vniief.ru

Для формирования однородного твердого слоя изотопов водорода в сферической оболочке необходимо обеспечить однородное тепловое окружение оболочки, источник тепловыделения в слое льда и монокристаллическую структуру вещества. Приведены результаты экспериментов в одной и той же сферической оболочке с формированием слоя дейтерия методом быстрого замораживания (поликристаллическая структура) и методом выращивания монокристалла. Показано влияние динамики кристаллизации дейтерия на качество получаемого слоя.

Для проведения исследований в области лазерного термоядерного синтеза необходимо создать криогенную мишень с гладким однородным твердым слоем водородного топлива в сферической оболочке. К криоген-

ному слою предъявляются высокие требования: отклонения от сферичности, концентричности не должна превышать 1 % [1], шероховатость внутренней поверхности криослоя должна быть в пределах 1 мкм для всех мод [2].

Для формирования криогенного слоя заданных параметров используется метод радиальных температурных градиентов [3]. Для реализации данного метода необходимо обеспечить однородное тепловое окружение оболочки с топливом и источник объемного тепловыделения в слое топлива. Объемный нагрев приведет к тому, что более толстые области твердого вещества будут иметь более высокую температуру и, следовательно, более высокое давление пара. Лед будет перераспределяться до тех пор, пока внутренняя поверхность вещества не станет изотермической. В качестве источника объемного тепловыделения может использоваться ИК-нагрев в оболочках пропускающих ИК-излучение или бета-распад в тритий-содержащих слоях.

Если бы объемный нагрев был единственным фактором, определяющим профиль слоя, вещество сформировалось бы в однородный сферический слой внутри изотермической сферической капсулы. Однако качество кристалла также влияет на окончательную форму слоя. Слои, выращенные методом быстрого охлаждения, обычно приводят к образованию шероховатого поликристаллического слоя льда [4]. Для снижения шероховатости льда необходимо исключить или хотя бы снизить количество кристаллографических дислокаций (внешние грани, границы зерен) внутри льда и трещин на внутренней поверхности льда, которые могут развиваться во время фазы роста кристалла [5].

В данной работе представлены результаты экспериментов по выращиванию монокристалла дейтерия в сферической оболочке при ИК-нагреве. Показано влияние динамики кристаллизации дейтерия на качество получаемого слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Tianliang Yan. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement // *Optics and Laser Technology*. 2021. Vol. 134. P. 6.
2. Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S. et al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion // *PHYSICS OF PLASMAS*. 2007. Vol. 14. P. 1.

3. Rogozhina M. A., Zarubina E. Yu. Formation of a Cryogenic Deuterium Uniform-Thickness Layer in a Spherical Shell as a Step in Making a Cryogenic Target for Laser Fusion // Physics of Atomic Nuclei. 2022. Vol. 85. No. 10. P. 1642–1645.

4. Koziowski B. J., McEachern R. L., London R. A., Bittner D. N. Infrared heating of hydrogen layers in hohlraums/ UCRL-JC-145172, Lawrence Livermore National Laboratory. 2001.

5. Cryogenic Targets. Current Status and Future Development // LLE Review. 2009. Vol. 114.

FORMATION OF A SINGLE CRYSTAL LAYER OF DEUTERIUM IN A SPHERICAL SHELL

M. A. Rogozhina¹, E. Yu. Zarubina^{1,2}, I. A. Chugrov¹

¹ RFNC – All-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

² Lomonosov MSU, Moscow, Faculty of Physics, MSU Branch in Sarov
oefimova@otd13.vniief.ru

In order to form a uniform solid layer of hydrogen isotopes in a spherical shell, the uniform thermal surrounding of the shell, heat release source in the ice layer and single crystal matter structure should be provided. Data are cited regarding experiments in one and the same spherical shell dealing with the Deuterium layer formation, using the fast freezing method (the polycrystalline structure) and the single crystal growing method. The Deuterium crystallization dynamics influence on the resulting layer quality is demonstrated.

With respect to laser fusion research, it is necessary to design a cryogenic target with a smooth, uniform hydrogen fuel layer in the spherical shell. Stringent requirements are imposed on the cryogenic layer, i.e.: deviation from sphericity should not exceed 1 % [1], and the cryogenic layer internal surface roughness should be within 1mcm for all modes [2].

In order to form the cryogenic layer with the preset parameters, the method of radial temperature gradients is used [3]. The method implementation requires uniform thermal surrounding of the fuel-containing shell and a source of bulk heat release in the fuel layer. The bulk heating will lead to the situation, when the thicker solid matter areas will have a higher temperature and consequently a higher vapor pressure. The ice will be redistributed until the matter

internal structure becomes isothermal. IR heating in the shells transparent to the IR radiation or beta-decay in tritium-containing layers may be used as the bulk heat release sources.

If the bulk heating were a single factor defining the layer profile, the matter would form into a uniform spherical layer inside the isothermal spherical capsule. However, the crystal quality also affects the final layer shape. The layers obtained with the help of the fast freezing method typically produce a rough polycrystalline ice layer [4]. The roughness may be reduced by means of exclusion of the crystallographic dislocation number or at least by their reduction (the external faces, grain boundaries) inside the ice, and the number of cracks at the ice internal surface that may develop during the crystal growth phase [5].

The present paper cites the experimental data on the Deuterium single crystal growing in the spherical shell subjected to the IR heating. The Deuterium crystallization dynamics influence on the resulting layer quality is demonstrated.

REFERENCES

1. Tianliang Yan. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement // *Optics and Laser Technology*. 2021. Vol. 134. P. 6.
2. Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S. et al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion // *PHYSICS OF PLASMAS*. 2007. Vol. 14. P. 1.
3. Rogozhina M. A., Zarubina E. Yu. Formation of a Cryogenic Deuterium Uniform-Thickness Layer in a Spherical Shell as a Step in Making a Cryogenic Target for Laser Fusion // *Physics of Atomic Nuclei*. 2022. Vol. 85. No. 10. P. 1642–1645.
4. Kozioziemski B. J., McEachern R. L., London R. A., Bittner D. N. Infrared heating of hydrogen layers in hohlraums/ UCRL-JC-145172, Lawrence Livermore National Laboratory. 2001.
5. Cryogenic Targets. Current Status and Future Development // *LLE Review*. 2009. Vol. 114.

Зарубина Елена Юрьевна
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Инженер-исследователь
607188, Россия, г. Саров
Нижегородской обл., пр-т Мира, 37

Zarubina Elena
FSUE «RFNC-VNIIEF»
Researcher engineer
607188, Sarov, Nizhny Novgorod region,
Russia
oeffimova@otd13.vniief.ru



ДИАГНОСТИКА ПАРАМЕТРОВ КРИОГЕННОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Е. Ю. Зарубина^{1,2}, М. А. Рогожина¹, И. А. Чугров¹

¹ Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский
научно-исследовательский институт экспериментальной физики
(ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»)

² МГУ им. М. В. Ломоносова, г. Москва, физический факультет,
филиал МГУ в г. Сарове
oeffimova@otd13.vniief.ru

Приведены результаты разработки методов и средств диагностики параметров криогенного слоя изотопов водорода в мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза.

Криогенные мишени, предоставляемые в лазерный эксперимент по зажиганию, должны соответствовать высоким требованиям: шероховатость внутренней поверхности криослоя должна быть в пределах 1 мкм [1], отклонения от однородности, сферичности, концентричности слоев должны быть менее 1–2 % [2]. В данной работе приведены результаты разработки методов контроля изотопов водорода в криогенной мишени. Оптический теневой метод используется для оптически прозрачных

оболочек, рентгеновский метод с фазовым контрастом - для оптически непрозрачных оболочек.

Проведено двумерное моделирование прохождения пучка видимого излучения через криогенную мишень методом трассировки лучей, где переменными параметрами являются неконцентричность и несферичность поверхностей мишени, расходимость и наклон пучка относительно оптической оси наблюдения, смещение плоскости локализации изображения относительно экватора мишени, апертура наблюдения, показатели преломления слоев, число лучей и т. д. Моделирование необходимо для исследования влияния вышеперечисленных факторов на формирование теневого изображения криомишени и, соответственно, на вычисление параметров криогенного слоя, а также для исследования границ применимости оптического теневого метода.

Для получения твердого криогенного слоя требуемой толщины разработана программа вычисления видимой высоты мениска жидкого топлива оптическим теньевым методом при наполнении оболочки в процессе проведения экспериментов. Разработана программа для теневого контроля параметров твердого криослоя, в которой при известном диаметре и толщине оболочки по теньевому изображению автоматически вычисляются и записываются в файл следующие параметры криослоя: профиль, шероховатость, спектр мощности Фурье, отклонения от концентричности и сферичности внутренней поверхности криослоя, средней толщине криослоя.

Проведено двумерное моделирование прохождения параллельного пучка рентгеновских лучей через сферически симметричную криогенную мишень, где переменными параметрами являются внешний диаметр мишени, толщины и материалы слоев, расстояние от криомишени до детектора. Результатом работы программы является смоделированное рентгеновское теньевое изображение и нанесенные на него реальные границы криомишени. На основе данной теоретической модели будет написана программа обработки рентгеновского изображения криомишени с автоматическим вычислением параметров криослоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S. et al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion // PHYSICS OF PLASMAS. 2007. Vol. 14. P. 1.

2. Tianliang Yan. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement // Optics and Laser Technology. 2021. Vol. 134. P. 6.

THE PARAMETER DIAGNOSTICS OF THE CRYOGENIC HYDROGEN ISOTOPE LAYER IN THE INDIRECT IRRADIATION TARGET

E. Yu. Zarubina^{1,2}, M. A. Rogozhina¹, I. A. Chugrov¹

¹ RFNC – AI-Russian Research Institute of Experimental Physics, Sarov

² MSU named after M.V. Lomonosov, Moscow, the Physical Faculty, MSU
Branch in Sarov

[oefimova@otd13.vniief.ru](mailto: oefimova@otd13.vniief.ru)

The results of the method and means development aiming at the diagnostics of the cryogenic hydrogen isotope layer parameters in the laser fusion indirect irradiation target are provided.

The cryogenic targets provided for laser ignition experiments should meet high requirements, namely: the roughness of the cryogenic layer's internal surface should be within the limits of 1 mcm [1], deviations from uniformity, sphericity and concentricity of the layers should be less than 1–2 % [2]. This work cites the results of the method development for the hydrogen isotope control in the cryogenic targets. The optical shadow method is used for optically transparent shells, the X-ray method with the phase contrast is used for optically non-transparent shells.

The two-dimensional simulation of the visual radiation beam passage through the cryogenic target was performed, using the beam tracing method, where the variable parameters were non-concentricity and non-sphericity of the target surfaces, beam divergence and slope relatively to the observable optical axis, displacement of the image localization plane relatively to the target equator, observation aperture, refraction indices of the layers, number of the beams etc. The simulation is necessary to study the influence of the aforementioned factors on the formation of the cryogenic target shadow image and, consequently, on the cryogenic layer parameter calculations, as well as for the research of the optical shadow method applicability limits.

In order to obtain a solid cryogenic layer of the required thickness, a code was developed to calculate the visual meniscus height of the liquid fuel, using the optical shadow method, when filling the shell during the experiments. Also, a code was developed for the shadow control of the solid cryogenic layer parameters, where, if the shell diameter and thickness are known, the shadow image allows automatic calculating and writing into a file of the following cryogenic layer parameters, i.e.: its profile, roughness, Fourier power spectrum, deviations from concentricity and sphericity of the cryogenic layer internal surface, average cryogenic layer thickness.

It was performed the 2-dimensional simulation of the parallel X-ray beam passage through the spherically symmetrical cryogenic target, where the variable parameters were the target external diameter, layer and material thicknesses, and the distance from the cryogenic target to the detector. The code application resulted in the simulated X-Ray shadow image with the real target boundaries imposed on it. Based on this theoretical model, a code will be written for processing the cryogenic target X-ray image along with the automatic cryogenic layer parameter calculations.

REFERENCES

1. Sangster T. C., Betti R., Craxton R. S. et al. Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion // *PHYSICS OF PLASMAS*. 2007. Vol. 14. P. 1.
2. Tianliang Yan. Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement // *Optics and Laser Technology*. 2021. Vol. 134. P. 6.

Никитин Александр Александрович

НИЦ «Курчатовский институт»

Старший научный сотрудник

123182, Москва,

пл. Ак. Курчатова, д. 1

Физика твердого тела, материаловедение,
микроскопия**Nikitin Alexander**

NRC «Kurchatov Institute»

Senior researcher

pl. Akademika Kurchatova 1, Moscow,

123182 Russia

Condensed matter physics, material science,
microscopy

aleksandr.nikitin@gmail.com

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ АТОМНО-ЗОНДОВОЙ ТОМОГРАФИИ
ДЛЯ ЛОКАЛИЗАЦИИ ВОДОРОДА И ЕГО ИЗОТОПОВ
В МЕТАЛЛАХ И СПЛАВАХ***А. А. Никитин^{1,2}, С. В. Рогожкин^{1,2}, Н. П. Бобырь¹*¹ Национальный Исследовательский Центр «Курчатовский Институт»,
Москва, Россия² Национальный исследовательский ядерный университет МИФИ,
Москва, Россия

Атомно-зондовая томография (АЗТ) – это новый метод микроскопии [1, 2], обладающий пространственным разрешением на нанометровых масштабах и одновременно возможностью различать атомы отдельных химических элементов, что делает его уникальным методом для исследования процессов накопления и распределения водорода на межфазных границах и структурных дефектах в материалах. В системах водород-металл исследование свойств гидридов на атомных масштабах является интересным подходом для решения проблем, связанных с разработкой материалов для хранения водорода [3, 4]. Более того, прямой анализ локального химического состава и распределения водорода на дислокациях

или на границах зерен, представляет особый интерес для установления фундаментального понимания таких явлений, как водородное охрупчивание [5].

Однако точное обнаружение водорода в металлах является комплексной задачей, из-за повышенной диффузии данных атомов в материале, а также наличием остаточного водорода в вакуумном объеме. Поскольку АЗТ является разрушающим методом контроля, то время анализа в процессе испарения образца под действием электрического поля всегда будут создаваться новые поверхности, и атомы водорода будут диффундировать к этим энергетически более выгодным участкам поверхности. Таким образом, чтобы избежать такого рода поверхностной сегрегации, используются более тяжелые изотопы, такие как дейтерий. Кроме того, дейтерий можно легко отличить от остаточного водорода.

В данной работе представлены общие подходы для анализа содержания водорода и дейтерия на основе данных атомно-зондовой томографии, в частности, проблема наличия фонового сигнала, использование изотопов водорода для повышения качества анализа, а также подходы для получения достоверных количественных оценок состава материала. В качестве образца, который проходил процедуру насыщения дейтерием был взят сплав системы Ti-5Al-4V. Получена подробная картина распределения дейтерия в образце, особое внимание уделено глубине и латеральному распределению атомов дейтерия.

ЛИТЕРАТУРА

1. Al-Kassab T., Wollenberger H., Schmitz G., Kirchheim R. Tomography by atom probe field ion microscopy // High Resolution and Spectrometry of Materials, Springer Verlag, Berlin, 2002.
2. Kelly T. F., Miller M. K. Rev. Sci. Inst. 78, 2007, 031101.
3. Schlappbach L., Zuettel A. Nature 414, 2001, 353–358.
4. Fujii H., Orimo S. Phys. B: Cond. Matter 328, 2003, 77–80.
5. Birnbaum H. K., Sofronis P. Mater. Sci. Eng. A 176, 1994, 191–202.

QUANTIFICATION OF HYDROGEN AND ITS ISOTOPES IN METALS AND ALLOYS USING ATOM-PROBE TOMOGRAPHY ANALYSIS METHODS

A. Nikitin^{1,2}, S. Rogozhkin^{1,2}, N. Bobyr¹

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI (Moscow Engineering Physics Institute), Moscow, Russia

Atom probe tomography (APT) is a new microscopy method [1, 2], which has a spatial resolution of a nanometer scale and at the same time the ability to distinguish atoms of individual chemical elements, which makes it a unique method for studying the processes of accumulation and distribution of hydrogen at inter-phase boundaries and structural defects in steels and alloys. In hydrogen-metal systems, the study of the properties of hydrides on an atomic scale is an interesting approach to solving problems associated with the development of materials for hydrogen storage [3, 4]. Moreover, a direct analysis of the local chemical composition and distribution of hydrogen at dislocations or at grain boundaries is of particular interest for establishing a fundamental understanding of such phenomena as hydrogen embrittlement [5].

However, accurate detection of hydrogen in metals is a complex task, due to the increased diffusion of these atoms in the material, as well as the presence of residual hydrogen in the vacuum volume. Since APT is a destructive control method, during the analysis, during the evaporation of the sample under the action of an electric field, new surfaces will always be created, and hydrogen atoms will diffuse to these energetically more favorable areas of the surface. Thus, to avoid this kind of surface segregation, heavier isotopes such as deuterium are used. In addition, deuterium can be easily distinguished from residual hydrogen.

This work represents general approaches for the analysis of hydrogen and deuterium quantification based on atomic probe tomography data, in particular, the problem of the presence of a background signal, the use of hydrogen isotopes to improve the quality of analysis, as well as approaches to obtain reliable quantitative estimates of the composition of the material. An alloy of the Ti-5Al-4V system was taken as a sample that underwent the deuterium saturation procedure. A detailed picture of the distribution of deuterium in the sample was obtained, with special attention paid to the depth and lateral distribution of deuterium atoms.

REFERENCES

1. Al-Kassab T., Wollenberger H., Schmitz G., Kirchheim R. Tomography by atom probe field ion microscopy // High Resolution and Spectrometry of Materials, Springer Verlag, Berlin, 2002.
2. Kelly T. F., Miller M. K. Rev. Sci. Inst. 78, 2007, 031101.
3. Schlapbach L., Zuettel A. Nature 414, 2001, 353–358.
4. Fujii H., Orimo S. Phys. B: Cond. Matter 328, 2003, 77–80.
5. Birnbaum H. K., Sofronis P. Mater. Sci. Eng. A 176, 1994, 191–202.

Нагорный Серафим Владиславович
НИЦ «Курчатовский институт»
РХТУ им. Д. И. Менделеева, студент
Технология изотопов и водородной энергетики
Москва, Россия

Serafim Nagorny
NRC «Kurchatov Institute»
Mendeleev University of Chemical Technology,
student
Moscow, Russia
Light Isotope Technology
nagorny126@yandex.ru



ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ОБЛУЧЕНИЯ НА СВОЙСТВА ПРОТОНОБМЕННОЙ МЕМБРАНЫ И ПАРАМЕТРЫ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ ЯЧЕЙКИ

С. В. Нагорный^{1,2}, Б. Иванов¹, Н. Иванова¹, М. Синяков^{1,2}, Р. Менишаров¹,
В. Н. Фатеев¹

¹ Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,
Москва

² Российский Химико-Технологический университет
им. Д. И. Менделеева, Москва

Очистка и компримирование водорода с помощью электрохимического водородного насоса (ЭВН) с протонообменной мембраной (ПОМ) является развивающейся, перспективной технологией с широкой сферой применения. ЭВН позволяет очищать и компримировать водород в одну или несколько стадий в едином устройстве [1]. ЭВН отличает: высокая селективность по водороду (до 99,999); высокая степень сжатия ($P_{\text{вых}}/P_{\text{вх}}$) в диапазоне 10–1000; давление до 140 МПа [1]. Преимуществом ЭВН является более высокая термодинамическая эффективность электрохимической компрессии по сравнению с механической компрессией [2]. ЭВН возможно применять в топливном цикле (ТЦ) термоядерного реактора (ТЯР) [3]. Однако в случае применения полимерной протонообменной

мембраны, например, марки Nafion[®], существенным вопросом остается величина и скорость деградации протонпроводящих свойств полимера под действием ионизирующего излучения.

В докладе представлены результаты испытания ЭВН с полимерной протонобменной мембраной в условиях характерных для ТЦ ТЯР на установке «Сивка». Перед испытаниями ПОМ облучали пучком электронов на установке РС-20 (НИЦ «Курчатовский институт») до интегральной дозы 1 кР (рассеянные электроны и рентгеновское излучение). Далее на ее основе была собрана электрохимическая ячейка ЭВН (площадь мембраны 7 см²) по методике, описанной в работе [4].

В результате испытаний получены вольтамперные характеристики ЭВН с облученной мембраной в диапазоне температуры 20–60 °С, давления водорода в анодном пространстве 0,01–0,1 МПа. Методом малоуглового рентгеновского рассеивания исследованы структурные изменения в полимерной мембране. Также исследованы физико-химические свойства мембраны (удельное сопротивление и влагоемкость). Показано, что облучение мембраны снижает величину плотности тока для ЭВН на ее основе во всем исследованном диапазоне напряжения (0–0,5 В) по сравнению с ЭВН на основе необлученной мембраны на 30–70 %. Это вызвано структурными изменениями в ПОМ, связанными с разрушением кристаллитов гидрофобной матрицы и деформацией каналов, приводящим к снижению влагосодержания мембраны и эффективности протонпроводения. Несмотря на снижение плотности тока, ЭВН на основе облученной ПОМ обладает высокой производительностью.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда в рамках проекта № 22–29–01367

STUDY OF RADIATION EFFECTS ON THE PROTON-EXCHANGE MEMBRANE PROPERTIES AND THE ELECTROCHEMICAL CELL PARAMETERS

*S. V. Nagornyy^{1,2}, B. V. Ivanov¹, N. A. Ivanova¹, R. M. Mensharapov¹,
M. Sinyakov^{1,2}, V. N. Fateev¹*

¹National Research Center «Kurchatov Institute», Moscow, Russia

²Russian University of Chemical Technology named after D. I. Mendeleev,
Moscow, Russia

Hydrogen purification and compression using an electrochemical hydrogen pump (EHP) with a proton exchange membrane (PEM) is a developing, promising technology with a wide range of applications. EHP allows to purify and compress hydrogen in one or several stages in a single device [1]. EHP features: high selectivity for hydrogen (up to 99.999); high compression ratio (P_{out}/P_{in}) in the range of 10–1000; pressure up to 140 MPa [1]. The advantage of EHP is the higher thermodynamic efficiency of electrochemical compression compared to mechanical one [2]. EHP can be used in the fuel cycle (FC) of a fusion reactor [3]. However, in the case of using a polymer PEM, for example, the Nafion®, the magnitude and rate of degradation of the proton-conducting properties of the polymer under the effects of ionizing radiation remains a significant issue.

The report presents the results of testing EHP with a polymer proton-exchange membrane under conditions typical for FC of a fusion reactor at the «Sivka» facility. Before testing, PEM was irradiated with an electron beam at the RS-20 facility (NRC «Kurchatov Institute») up to an integral dose of 1 kR (scattered electrons and X-rays). Then, on its basis, an EHP electrochemical cell (membrane area 7 cm²) was assembled according to the procedure described in [4].

As a result of the tests, the IV curves of EHP with an irradiated membrane were obtained in the temperature range of 20–60 °C, hydrogen pressure in the anode space 0,01–0,1 MPa. Structural changes in a polymer membrane have been studied by the method of small-angle X-ray scattering. The physicochemical properties of the membrane (resistivity and moisture capacity) were also studied. It is shown that membrane irradiation reduces the current density for EHP based on it in the entire studied voltage range (0–0,5 V) compared to EHP based on a non-irradiated membrane by 30–70 %. This is caused by structural changes in PEM associated with the destruction of crystallites of the hydropho-

bic matrix and channel deformation, which leads to a decrease in the moisture content of the membrane and the efficiency of proton conduction. Despite the decrease in current density, EHP based on irradiated PEM has a high performance.

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

REFERENCES

1. Durmus G., Colpan C., Devrim Y. A review on the development of the electrochemical hydrogen compressors // *J. of Power Sources*. 2021. Vol. 494. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2021.229743.
2. Onda K. et al. Separation and compression characteristics of hydrogen by use of proton exchange membrane // *J. Power Sources*. 2007. Vol. 164/1. P. 1–8. DOI: 10.1016/j.jpowsour.2006.10.018.
3. Иванов Б. В. и др. О возможности применения электрохимического водородного насоса в топливном цикле ТЯР // *ВАНТ, Сер.: Термояд. синтез*. 2022. Т. 45/4. С. 105–119. DOI: 10.21517/0202-3822-2022-45-4-105-119.
4. Ivanov B. V., Ivanova N. A. et al. Effect of hydrogen pressure on the electrochemical hydrogen pump performance" 2023 5th International Youth Conference on Radio Electronics, Electrical and Power Engineering (REEPE), Moscow, Russian Federation, 2023. P. 1–5. DOI: 10.1109/REEPE 57272.2023.10086860

Вораксо Иван Андреевич

ФГБОУ ВО РХТУ им. Д. И. Менделеева
Ассистент

125047, Москва, Миусская площадь, 9
Область научных интересов: разделение
изотопов, химический изотопный обмен,
гетерогенный катализ

Ivan Vorakso

D. Mendeleev University of chemical
technology of Russia

Assistant

125047, Russia, Moscow, Miusskaya Sq., 9
Field of scientific interest: isotope separation,
chemical isotope exchange, heterogeneous catalysis
gorn200@yandex.ru



**МАССООБМЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗОТОПНОГО
ОБМЕНА ВОДОРОДА С ВОДОЙ В КОНТАКТНЫХ
УСТРОЙСТВАХ МЕМБРАННОГО ТИПА
С ПЕРФТОРИРОВАННЫМИ СУЛЬФОКАТИОНИТНЫМИ
МЕМБРАНАМИ**

И. Л. Растунова, А. Ю. Чеботов, И. А. Вораксо, А. В. Орехов, А. С. Попов

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

Разделение изотопов водорода является наиболее актуальной задачей, решение которой применяется для реализации переработки тяжело-водных отходов, образующихся в результате работы объектов ядерной промышленности. Отчистка от радиоактивного трития [Т] первоначально с экологической точки зрения, а концентрирование дейтерия [D] необходимо для дальнейшего использования воды в качестве замедлителя нейтронов [1, 2].

Ранее в РХТУ им. Д. И. Менделеева было разработано контактное устройство мембранного типа (КУМТ) для проведения процесса химического изотопного обмена (ХИО) в системе вода – молекулярный водород [3]. КУМТ представляет из себя ячейку, в которой поток жидкой воды

отделен от газового потока мембраной, проницаемой только для водяных паров. Поскольку в КУМТ именно через мембрану осуществляется транспорт воды из одного пространства в другое, то проницаемость по воде является ее наиболее важной характеристикой помимо высокой радиационной стойкости и механической прочности. Мембрана также должна оставаться непроницаемой для водорода и предотвращать попадание капель влаги на катализатор [4].

В работе представлены результаты определения проницаемости по воде мембран типа Nafion различной толщины при различных температурах и в зависимости от их состояния. Исследована проницаемость следующих мембран: плоские мембраны МФ-4СК (250 мкм), Nafion 212 (50,8 мкм), Nafion 117 (183 мкм) и трубчатая ТФ-4СК (150 мкм).

Также показано влияние толщины мембраны на массообменные характеристики процесса изотопного обмена водорода с водой в КУМТ с плоской мембраной: использование в мембранном контактном устройстве Nafion 212 толщиной 50,8 мкм приводит к улучшению массообменных характеристик процесса примерно в 2 раза по сравнению с использованием мембраны МФ-4СК толщиной 250 мкм.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреев Б. М., Магомедбеков Э. П., Розенкевич М. Б., Сахаровский Ю. А. Гетерогенные реакции изотопного обмена трития. М.: Эдиториал УРСС, 1999. 208 с.
2. Андреев Б. М., Зельвенский Я. Д., Катальников С. Г. Тяжелые изотопы водорода в ядерной технике. М.: ИздАТ, 2000. 344 с.
3. Контактное устройство для изотопного обмена водорода или углекислого газа с водой: пат. 2375107 Рос. Федерации. № 2008117569/12; заявл. 06.05.2008; опубл. 10.12.2009.
4. Прокунин С. В. Детритизация воды методом химического изотопного обмена водорода с водой в контактных устройствах мембранного типа: дис. канд. техн. наук. М., 2010. 125 с.

MASSTRANFER CHARACTERISTICS OF HYDROGEN ISOTOPE EXCHANGE WITH WATER IN MEMBRANE CONTACT DEVICES WITH PERFLUORINATED SULFONIC CATIONIC MEMBRANES

I. L. Rastunova, A. Yu. Chebotov, I. A. Vorakso, A. V. Orekhov, A. S. Popov

D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia

The separation of hydrogen isotopes is the most urgent problem, the solution of which is used to implement the processing of heavy water waste generated as a result of the operation of nuclear industry facilities. The removal of radioactive tritium [T] is of primary importance from an ecological point of view, and the concentration of deuterium [D] is necessary for the further use of water as a neutron moderator [1, 2].

Previously in D. Mendeleev University of Chemical Technology of Russia, a membrane type contact device (MCD) was developed to carry out the process of chemical isotope exchange (ChIE) in the water–molecular hydrogen system [3]. MCD is a cell in which the liquid water flow is separated from the gas flow by a membrane permeable only to water vapor. Since in MCD it is through the membrane water is transported from one space to another, the water permeability is one of the most important characteristics in addition to high radiation resistance and mechanical strength. The membrane must also remain impermeable to hydrogen and prevent moisture droplets from falling onto the catalyst [4].

The paper presents the results of determining the water permeability of Nafion-type membranes of various thicknesses at various temperatures and depending on their state. The permeability of the following membranes was studied: flat membranes MF-4SK (250 μm), Nafion 212 (50.8 μm), Nafion 117 (183 μm) and tubular TF-4SK (150 μm).

The influence of the membrane thickness on the mass-transfer characteristics of the process of isotope exchange of hydrogen with water in the MCD with a flat membrane is also shown: the use of Nafion 212 with a thickness of 50.8 μm in a membrane contact device leads to an improvement in the mass transfer characteristics of the process by about 2 times compared with the use of an MF-4SK membrane with a thickness of 250 μm .

REFERENCES

1. Andreev B. M., Magomedbekov E. P., Rozenkevich M. B., Sakharovsky Yu. A. Heterogeneous reactions of tritium isotopic exchange. M.: Editorial URSS, 1999. 208 p.

-
2. Andreev B. M., Zelvensky Ya. D., Katalnikov S. G. Heavy isotopes of hydrogen in nuclear technology. M.: Publishing House, 2000. 344 p.
 3. Contact device for isotopic exchange of hydrogen or carbon dioxide with water: Pat. 2375107 Rus. Federation. No. 2008117569/12; dec. May 6, 2008; publ. October 12, 2009.
 4. Prokunin S. V. Detritization of water by the method of chemical isotope exchange of hydrogen with water in membrane-type contact devices: PhD thesis. M., 2010. 125 p.

Фадеева Елена Владимировна
ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
Старший научный сотрудник
607188, Россия, г. Саров Нижегородской обл.,
пр-т Мира, 37

Fadeeva Elena
RFNC-VNIEF
senior researcher
607188, Sarov, Nizhny Novgorod region,
Russia



РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ РЕГЕНЕРАЦИИ ПАЛЛАДИЯ ИЗ ПОРОШКОВЫХ СИСТЕМ

О. Б. Масленникова, И. Е. Капанадзе, Е. В. Фадеева, М. Л. Якунькова

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

В ряде изделий, разрабатываемых во ВНИИЭФ, применяются порошковые системы, содержащие палладий. При создании порошковых систем важным критерием является однородность фракционного состава компонентов этих смесей. Промышленно выпускаемый порошок палладия имеет достаточно широкий диапазон по фракционному составу и не контролируется по величине удельной площади поверхности.

Для создания порошковых систем с необходимыми свойствами во ВНИИЭФ была разработана технология получения порошка палладия с заданными размером частиц и величиной удельной площади поверхности. Эта технология основана на восстановлении палладия из азотнокислого аммиачного комплекса муравьиной кислотой.

В процессе отработки изготавливаемых во ВНИИЭФ изделий порошковые смеси подвергаются различным испытаниям и теряют свои первоначальные свойства и подлежат утилизации. Технология регенерации

палладия из порошковых систем, утративших свои свойства, позволит снизить стоимость разрабатываемых изделий и ускорит процесс оборота палладия при проведении разработок. Данная технология основана на уже известном методе восстановления палладия муравьиной кислотой из азотно-аммиачного комплекса с введением дополнительных стадий. Суммарное содержание примесей в получаемом по данной технологии палладии не превышает 0,3 %.

THE DEVELOPMENT OF THE TECHNOLOGY FOR PALLADIUM RECOVERY FROM POWDER SYSTEMS

O. B. Masslennikova, I. E. Kapanadze, E. V. Fadeeva, M. L. Yakunkova

FSUE «RFNC-VNIIEF», Sarov, Nizhny Novgorod Region

Powder systems containing palladium are used in some items developed at VNIIEF. When developing the powder systems, the important criterion is the fractional composition uniformity of such mixes. The industrial palladium powder ranges quite widely in terms of the fractional composition, and its specific surface area is not controlled.

In order to obtain the powder systems with the required properties, a special technology for getting palladium powder with the preset particle size and specific surface area was developed at VNIIEF. This technology is based on palladium recovery from Nitrogen-Ammonia compound with the help of formic acid.

During processing of the items manufactured at VNIIEF, the powder mixes are tested differently, so they may lose their initial properties and be due for disposal. The technology for palladium recovery from the powder systems with the lost properties will allow reducing the cost of the developed items and accelerating the palladium turnover for R&D applications. This technology is based on the already known principle of palladium recovery from Nitrogen-Ammonia compound with formic acid, though several additional phases should be added. The total impurity content in palladium obtained with the help of this technology is not more than 0,3 %.

АВТОРСКИЙ УКАЗАТЕЛЬ

Алексеев И. А.	Alekseev I. A.	139
Алиева А. И.	Alieva A. I.	117
Алимов В. Н.	Alimov V. N.	56
Ананьев С. С.	Ananyev S. S.	109, 135, 141
Анжигатова Е. Д.	Anzhigatova E. D.	99
Балашова Н. Н.	Balashova N. N.	60
Батырбеков Э.	Batyrbekov E.	150
Белова Ю. С.	Belova Yu. S.	60
Бисикало Д. В.	Bisikalo D. V.	22
Бобырь Н. П.	Bobyр N. P.	52, 172
Боева О. А.	Boeva O. A.	157
Бойцов И. Е.	Boitsov I. E.	69, 76
Бочков В.	Bochkov V.	150
Буряк Е. В.	Buryak E. V.	145
Буснюк А. О.	Busnyuk A. O.	56
Бучирин А. В.	Buchirin A. V.	76
Васянина Т. В.	Vasyanina T. V.	139
Вербецкий В. Н.	Verbetsky V. N.	83, 87, 93
Веселова С. В.	Veselova S. V.	87
Военнов А. В.	Voennov A. V.	97
Вораксо И. А.	Vorakso I. A.	180
Гаспарян Ю. М.	Gasparyan Yu. M.	117
Голубева А. В.	Golubeva A. V.	35, 48, 154
Гордиенко Ю.	Gordienko Yu.	150
Дугин Д. С.	Dugin D. S.	52
Ерискин А. А.	Eriskin A. A.	62
Еронин А. А.	Eronin A. A.	90
Ефимов Н. Е.	Efimov N. E.	117
Жмуровский А. В.	Zhmurovsky A. V.	145

Заика Ю. В.	Zaika Yu. V.	32, 38, 42
Зарубина Е. Ю.	Zarubina E. Yu.	164, 168
Золотова Н. С.	Zolotova N. S.	60
Иванов Б.	Ivanov B. V.	176
Иванова Н.	Ivanova N. A.	176
Казаков А. Н.	Kazakov A. N.	90
Канашенко С. Л.	Kanashenko S. L.	75, 105
Капанадзе И. Е.	Kapanadze I. E.	184
Киселев С. С.	Kiselev S. S.	160
Козлов Д. А.	Kozlov D. A.	52
Колокольцев В. Н.	Kolokoltsev V. N.	62
Костикова Е. К.	Kostikova E. K.	42
Кошлань В. И.	Koshlan V. I.	141
Крат С. А.	Krat S. A.	117
Крот П. А.	Krot P. A.	83
Кудияров В. Н.	Kudiyarov V. N.	80, 99, 147
Кузенов С. Р.	Kuzenov S. R.	56
Куликаускас В. С.	Kulikauskas V. S.	62
Кульсартов Т.	Kulsartov T.	150
Курганская А. А.	Kurganskaya A. A.	93
Курдюмов Н. Е.	Kurdyumov N. E.	80, 147
Кутеев Б. В.	Kuteev B. V.	106
Кутепов С. Н.	Kutepov S. N.	71
Лаптев Р. С.	Laptev R. C.	99
Лившиц А. И.	Livshits A. I.	56
Литовченко И. Ю.	Litovchenko I. Yu.	66
Малков И. Л.	Malkov I. L.	76
Масленникова О. Б.	Masslennikova O. B.	184
Мельников А. В.	Melnikov A. V.	117
Мельников С. А.	Melnikov S. A.	28
Меншарапов Р.	Mensharapov R. M.	176
Москалев О. А.	Moskalev O. A.	23
Мусяев Р. К.	Musyaev R. K.	76, 132, 145
Нагорный С. В.	Nagornyy S. V.	176
Никитин А. А.	Nikitin A. A.	172

Николаев Е. Н.	Nikolaev E. N.	104
Никулин В. Я.	Nikulin V. Ya.	62
Орехов А. В.	Orekhov A. V.	180
Передистов Е. Ю.	Peredistov E. U.	56
Персианова А. П.	Persianova A. P.	48
Пивень В. А.	Piven V. A.	45
Подolyako Ф. С.	Podolyako F. S.	117
Понкратов Ю.	Ponkratov Y.	150
Попов А. С.	Popov A. S.	180
Пришвицын А. С.	Prishvitsyn A. S.	117
Пушилина Н. С.	Pushilina N. S.	147
Пшеницын М. Б.	Pshenitsyn M. B.	157
Растунова И. Л.	Rastunova I. L.	129, 180
Ремпель А. А.	Rempel A. A.	45
Рогожина М. А.	Rogozhina M. A.	164, 168
Рогожкин С. В.	Rogozhkin S. V.	172
Родченкова Н. И.	Rodchenkova N. I.	38
Розенкевич М. Б.	Rozenkevich M. B.	126, 154
Романов И. А.	Romanov I. A.	90
Рыжухина А. В.	Ryzhukhina A. V.	145
Самарханов К.	Samarkhanov K.	150
Сергеев А. Н.	Sergeev A. N.	71
Сидоров Н. И.	Sidorov N. I.	45
Силин П. В.	Silin P. V.	62
Синяков М.	Sinyakov M.	176
Сипатов И. С.	Sipatov I. S.	45
Сомкина Е. В.	Somkina E. V.	60
Спицын А. В.	Spitsyn A. V.	135
Степанов Н. О.	Stepanov N. O.	135
Тарасов А. А.	Tarasov A. A.	60
Терёшина И. С.	Tereshina I. S.	83, 87, 93
Тихонов В. В.	Tikhonov V. V.	145
Трифонов С. А.	Trifonov S. A.	122
Тулубаев Е.	Tulubayev Y.	150

Уборский В. В.	Uborsky V. V.	139
Фадеева Е. В.	Fadeeva E. V.	184
Фатеев В. Н.	Fateev V. N.	176
Федорченко О. А.	Fedorchenko O. A.	139
Хапов А. С.	Khapov A. S.	97
Хасенов М.	Khasenov M.	150
Цой Е. В.	Tsoi E. V.	71
Чеботов А. Ю.	Chebotov A. Yu.	180
Чеканов С. В.	Chekanov S. V.	97
Черкез Д. И.	Cherkez D. I.	135
Чувильдеев В. Н.	Chuvildeev V. T.	27
Чугров И. А.	Chugrov I. A.	164,168
Чуканов А. Н.	Chukanov A. N.	71
Шишкова Т. А.	Shishkova T. A.	154
Эльман Р. Р.	Elman R. R.	80, 99, 147
Юхимчук А. А.	Yukhimchuk A. A.	24
Яковенко А. А.	Yakovenko A. A.	71
Якунькова М. Л.	Yakunkova M. L.	184
Ялышева А. В.	Yalysheva A. V.	76

**Взаимодействие изотопов водорода
с конструкционными материалами
IHISM'23 Junior**

Сборник тезисов докладов
Шестнадцатой Международной Школы
молодых ученых и специалистов им. А. А. Курдюмова

Печатается с оригинальных текстов авторов

Компьютерная подготовка оригинала-макета *М. С. Мещерякова*

Подписано в печать 29.06.2023. Формат 60×84/16.
Печать офсетная. Усл. печ. л. ~11,1. Уч.-изд. л. ~12,5.
Тираж 120 экз. Зак. тип. 1509-2023.

Отпечатано в ИПЦ ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»
607188, г. Саров Нижегородской обл., ул. Силкина, 23