
СЕКЦИЯ 5

ЯДЕРНАЯ И ВОДОРОДНАЯ ЭНЕРГЕТИКА

SECTION 5

NUCLEAR AND HYDROGEN ENERGY

СОДЕРЖАНИЕ

Новый источник нейтронов – пульсирующий исследовательский реактор НЕПТУН в ОИЯИ: текущее состояние и планы

М. В. Булавин

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

A new neutron source is the pulsating NEPTUNE research reactor at JINR: current status and plans

М. V. Bulavin

Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Расчеты динамики мощности периодического импульсного реактора НЕПТУН. Проблема неустойчивости

А. Е. Верхоглядов

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

Calculations of the power dynamics of NEPTUN pulsed reactor. The problem of instability

A. E. Verhoglyadov

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Моделирование работы пассивного каталитического рекомбинатора водорода РВК-500 в комплексных экспериментах с помощью кода CABARET-SC1

В. Ю. Глотов, А. А. Канаев, В. Г. Кондаков

Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

Modelling of Passive Catalytic Recombiner RVK-500 operation in complex experiments using the CABARET-SC1 code

V. Yu. Glotov, A. A. Kanaev, V. G. Kondakov

Nuclear Safety Institute of the RAS, Moscow, Russia

Возможности и модельный ряд дифрактометров Tongda

Д. Г. Голованов

ООО «Мелитэк», Москва, Россия

Models and capabilities of xrd systems from Tongda

D. G. Golovanov

Melytec Ltd., Moscow, Russia

Атомная энергетика как основа устойчивого развития

Н. В. Горин¹, Б. К. Водолага¹, В. П. Кучинов², В. В. Шидловский³

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

³АО «Прорыв», Москва, Россия

Nuclear Energy as a Basis of Sustainable Development

N. V. Gorin¹, B. K. Vodolaga¹, V. P. Kuchinov², V. V. Shidlovskiy³

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³JSC «Proryv», Moscow, Russia

Особенности предстоящего экспорта быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ, как реакция на основные вызовы современности

Н. В. Горин¹, Н. П. Волошин¹, Ю. И. Чуриков¹, В. П. Кучинов², В. В. Шидловский³

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

³АО «Прорыв», Москва, Россия

Features of forthcoming export of fast reactors with closed nuclear fuel cycle as a response to modern challenges

N. V. Gorin¹, N. P. Voloshin¹, Yu. I. Churikov¹, V. P. Kuchinov², V. V. Shidlovskiy³

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³JSC «Proryv», Moscow, Russia

Методические подходы к созданию модели энергоблока АЭС с ВВЭР для реалистического расчетного анализа тяжелых аварий и обеспечения радиационной безопасности

К. С. Долганов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

Methodical approaches to creating a model of a nuclear power plant with VVER for realistic numerical analysis of severe accidents and radiation safety

K. S. Dolganov

Nuclear Safety Institute of the Russian academy of sciences, Moscow, Russia

Методы контроля параметров твердого слоя изотопов водорода в криогенной мишени непрямого облучения

Е. Ю. Зарубина, М. А. Рогожина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров, Россия

The control methods of hydrogen isotopes solid layer parameters in indirect-drive cryogenic target

E. Yu. Zarubina, M. A. Rogozhina

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics", Sarov, Russia

О неэмпирической классификации медленных пламен в водородных газовых смесях

И. А. Кириллов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

On non-emirical classification of the slow flames in hydrogen-containing gas mixtures

I. A. Kirillov

National research centre "Kurchatov institute", Moscow, Russia

Анейтронный синтез протон–бор в осциллирующей плазме миниатюрного вакуумного разряда

Ю. К. Куриленков^{1,2}, А. В. Огинов¹, С. Ю. Гуськов¹, И. С. Самойлов²

¹Физический институт им П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Aneutronic proton–boron fusion in oscillating plasma of miniature vacuum discharge

Yu. K. Kurilenkov^{1,2}, A. V. Oginov¹, S. Yu. Guskov¹, I. S. Samoylov²

¹Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

²Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia

Моделирование системы обращения с ОЯТ на платформе АТЭК

И. Р. Макеева, Н. Д. Дырда, Д. В. Хмельницкий, Л. Р. Файрушина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Simulation of the SNF management system on ATEC platform

I. R. Makeeva, N. D. Dyrda, D. V. Khmel'nikskiy, L. R. Fayrushina

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

Разработка методики определения кислорода методом восстановительного плавления во FLiNaK

А. А. Масленникова, П. Н. Мушников, Ю. П. Зайков

Институт высокотемпературной электрохимии ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Development of the technique for determination of oxygen concentration in FLiNaK by the method of reduction melting

A. A. Maslenikova, P. N. Mushnikov, Yu. P. Zaikov

Institute of High Temperature Electrochemistry IHTE UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Очистка расплава FLiNaK от кислородсодержащих примесей и онлайн мониторинг их концентрации

П. Н. Мушников, К. Р. Каримов, К. Е. Селеверстов, А. А. Масленникова, Ю. П. Зайков

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Purification of FLiNaK melt from oxygen-containing impurities and online monitoring concentration

P. N. Mushnikov, K. R. Karimov, K. E. Seleverstov, A. A. Maslenikova, Yu. P. Zaikov

Institute of High Temperature Electrochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

Изготовление и исследование свойств стеклогерметиков для сборки стеков ТОТЭ и ТОЭ

М. В. Ерпалов^{1,2}, В. А. Никонорова^{1,2}, А. В. Кучугуров^{1,2}, С. Г. Власова², Н. Т. Шардаков²

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

Manufacturing and researching properties of glass sealants for the SOFC and SOC stacks assembly

M. V. Erpalov^{1,2}, V. A. Nikonorova^{1,2}, A. V. Kuchugurov^{1,2}, S. G. Vlasova², N. T. Shardakov²

¹Institute of High Temperature Electrochemistry, Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Результаты и перспективы методов спектроскопии ЯМР при исследовании мононитрида урана

В. В. Оглобличев¹, Ю. В. Пискунов¹, А. М. Потапов²

¹Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Results and perspectives of NMR spectroscopy methods in studying uranium mononitride

V. V. Ogloblichev¹, Y. V. Piskunov¹, A. M. Potapov²

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²Institute of High-Temperature Electrochemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Анализ энерговыделения при горении водорода для различных кинетических схем

Е. Е. Пигасов^{1,2}, М. С. Жарылканова², Ю. М. Ковалев²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²ФГАОУВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Россия

Analise of heat release by hydrogen combustio for a different kinetic schemas

Е. Е. Pigasov^{1,2}, М. S. Zharlykhanova², Y. M. Kovalev²

¹FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

²South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Эволюция дислокационной структуры в сталях под облучением

П. А. Покаташкин

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва, Россия

Steels under irradiation: evolution of the dislocation structure

P. A. Pokatashkin

Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

Отгонка электролита на основе LiCl–KCl при пониженном давлении

А. Б. Салюлев¹, А. М. Потапов^{1,2}, В. Ю. Шишкин¹, Ю. П. Зайков¹

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Distillation of the LiCl–KCl based electrolyte at reduced pressures

A. M. Potapov^{1,2}, A. B. Salyulev¹, V. Yu. Shishkin¹, Yu. P. Zaikov¹

¹Institute of High-Temperature Electrochemistry UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Оценка электропроводности многокомпонентных расплавов, содержащих хлориды одно-, двух- и трехвалентных металлов

А. М. Потапов^{1,2}, А. Б. Салюлев¹

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

Evaluation of the electrical conductivity of multicomponent melts containing chlorides of one-, two- and trivalent metals

A. M. Potapov^{1,2}, A. B. Salyulev¹

¹Institute of High-Temperature Electrochemistry UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Технология создания криогенной мишени непрямого облучения для лазерного термоядерного синтеза

М. А. Рогожина, Е. Ю. Зарубина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров, Россия

Process of creating a cryogenic target of indirect drive for laser thermonuclear fusion

M. A. Rogozhina, E. Yu. Zarubina

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics", Sarov, Russia

Расчет магнитного поля пирамидальных объектов в среде Comsol Multiphysics

В. В. Савельев, В. А. Сапунов, А. В. Сергеев

ФГАО АУ ВО Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

Calculation of the pyramidal objects magnetic field in Comsol Multiphysics

V. V. Saveliev, V. A. Sapunov, A. V. Sergeev

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

Водород – его значение и связанные с ним опасности на пути развития нашей Цивилизации в прошлом, настоящем и будущем

В. А. Симоненко

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Hydrogen with its mission and potential hazards for the world in the past, present and future

V. A. Simonenko

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

Численное моделирование аварийного истечения водорода из сосуда высокого давления в открытое пространство

Ю. А. Томилов, Е. М. Щенникова

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

ФГАОУ «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Россия

Numerical simulation of accident hydrogen release from a high-pressure vessel into open space

Yu. A. Tomilov, E. M. Shchennikova

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

Snezhinsk physicotchnical institute of National research nuclear university MEPHI, Snezhinsk, Russia

Анализ требований российских нормативных документов для регулирования безопасности на АЭС при промышленном производстве водорода из воды электрохимическим методом

Н. Л. Харитонов¹, И. А. Кириллов¹, В. А. Симоненко², В. М. Крюков²

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Analysis of russian regulatory requirements for safety at NPPs to industrial production of hydrogen from water by electrochemical method

N. L. Kharitonova¹, I. A. Kirillov¹, V. F. Simonenko², V. M. Kruykov²

¹National Research Center "Kurchatov Institute", Moscow, Russia

²FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

Изготовление нержавеющей стали ферритного класса для производства стэков ТОТЭ и ТОЭ

П. А. Чугунов, М. В. Ерпалов, В. А. Никонорова, Г. Н. Старостин

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

Creation the ferritic grade stainless steel for the production of SOFC and SOE sell

P. A. Chugunov, M. V. Erpalov, V. A. Nikonorova, G. N. Starostin

Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

Особенности динамики пульсирующего реактора НЕПТУН

Е. П. Шабалин

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

Features of the dynamics of the pulsating NEPTUNE reactor

E. P. Shabalin

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

Электрохимическое восстановление таблетированной смеси порошков UO_2 -Pd в расплаве $LiCl-Li_2O$ при $650^\circ C$

А. В. Шишкин, В. Ю. Шишкин, А. А. Масленникова, Ю. П. Зайков

Институт высокотемпературной электрохимии ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Electrochemical reduction of pelletized UO_2 -Pd powder mixture in the $LiCl-Li_2O$ melt at $650^\circ C$

A. V. Shishkin, V. Yu. Shishkin, A. A. Maslenikova, Yu. P. Zaikov

Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

Критические и нейтронно-активационные benchmark-эксперименты с размножающими системами из металлического плутония без отражателя для валидации ядерно-физических данных и компьютерных кодов, моделирующих перенос нейтронов

В. А. Адарченко, С. А. Андреев, А. А. Вайвод, С. С. Бесов, Д. А. Прокопьев, И. И. Костенко, Д. И. Сергина, Д. В. Хмельницкий, А. А. Юдов

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Critical and neutron activation benchmark experiments with multiplying systems of metal plutonium without a reflector intended for validation of nuclear physics data and computer codes simulating neutron transport

V. A. Adarchenko, S. A. Andreev, A. A. Vaivod, S. S. Besov, D. A. Prokopyev, I. I. Kostenko, D. I. Sergina, D. V. Khmel'nitsky, A. A. Yudov

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics", Snezhinsk, Russia

НОВЫЙ ИСТОЧНИК НЕЙТРОНОВ – ПУЛЬСИРУЮЩИЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ РЕАКТОР НЕПТУН В ОИЯИ: ТЕКУЩЕЕ СОСТОЯНИЕ И ПЛАНЫ

М. В. Булавин

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

E-mail: bulavin85@inbox.ru

Текущее состояние работ

В процессе исследования вопросов стабильности и устойчивости работы реактора «НЕПТУН» был сделан вывод, что главным фактором негативного влияния на стабильность и устойчивость работы реактора на всех режимах является динамический изгиб тепловыделяющих элементов и тепловыделяющих сборок твэлов. Полностью рассмотрена динамика реактора с одним усредненным твэлом в осцилляторном приближении. Показано, что любые периодические колебания реактивности, больше определенной величины по амплитуде, усиливаются из-за запаздывания отрицательной обратной связи и приводят к решениям с медленным асимптотическим разгоном или к значительным колебаниям мощности реактора. В рамках осцилляторного приближения изучалась также система взаимодействующих и не взаимодействующих между собой твэлов в количестве до нескольких сотен штук, а также зависимость хода динамических процессов от конструкции опор твэлов и величины трения в опорах.

На основе полученных результатов стало возможным сформулировать требования к оптимальной конструкции твэлов и композиции активной зоны реактора НЕПТУН, обеспечивающей устойчивую работу реактора на установленной мощности 10–15 МВт. Предпочтительным вариантом компоновки активной зоны является вариант с жестким креплением одного из концевиков твэлов, не собранных в ТВС (потвэльная сборка), и крепление, обеспечивающее ограниченные малые поперечные и неограниченные продольные смещения, для другого концевика.

Продолжаются работы по оптимизации конфигурации криогенного замедлителя с водяным предзамедлителем. Были проведены расчеты для различных материалов криогенного замедлителя при различных температурах и при различных толщинах водяного предзамедлителя. Предварительные расчеты показали, что максимальная плотность потока холодных нейтронов получается при использовании в расчетах модели мезитиленового криогенного замедлителя, толщиной 2 см, с водяным предзамедлителем, толщиной 5 см.

Совместно с АО «ВНИИИМ им. А. А. Бочвара» (ГК «Росатом») начата подготовка к выполнению научно-исследовательской, опытно-конструкторской и опытно-технологической работы «Разработка нитрид-нептуниевоего топлива и твэлов на его основе для реактора НЕПТУН». На данном этапе планируется изготовить топливную таблетку из нитрида нептуния, определить ее физико-химические и технологические свойства.

Совместно с АО «НИКИЭТ им. Н. А. Доллежала (ГК «Росатом») разработано техническое задание на выполнение НИОКР «Расчетные обоснования конструктивных решений модулятора реактивности импульсного реактора периодического действия НЕПТУН». Основными задачами, которые должны быть выполнены в результате НИОКР, являются разработка двух вариантов (с кожухом и без кожуха) конструкции модулятора реактивности, работоспособного во всех заданных условиях эксплуатации и принятие решения о применении одного из вариантов, а также разработка варианта конструкции корпуса реактора, обладающего наименьшей тепловой нагруженностью. Выполнение данной работы позволит перейти на стадию эскизного проектирования реактора НЕПТУН.

Совместно с «РФЯЦ – ВНИИТФ» (ГК «Росатом») начата подготовка к выполнению прецизионных расчетов нестационарного изгиба твэла в условиях, характерных для реактора НЕПТУН, с целью верификации созданной в ЛНФ расчетной методики. Проводится изучение возможности проведения

экспериментальных исследований с целью верификации расчетов в обоснование нейтронно-физических и динамических характеристик реактора НЕПТУН.

Совместно с АО «ГНЦ РФ – ФЭИ» (ГК «Росатом») ведется обсуждение возможности моделирования активной зоны реактора НЕПТУН на быстром физическом стенде, а также проведения расчетов и моделирования модулятора реактивности.

Работы в рамках семилетнего плана ОИЯИ 2024–2030 гг.

В рамках семилетнего плана ОИЯИ работа по созданию нового источника нейтронов будет вестись по следующим направлениям:

1. Реализация программы НИОКР по разработке нового реактора НЕПТУН: исследование динамики импульсных реакторов, оптимизация корпуса нового реактора и его модулятора реактивности в части снижения тепловых нагрузок и формоизменения, разработка нитрид-нептуниевого топлива и твэлов на его основе, оптимизация конфигурации комплекса замедлителей, разработка испытательного стенда модулятора реактивности и испытательного стенда криогенного замедлителя.

2. Разработка и развитие научной программы и концепции приборной базы для проведения исследований по физике конденсированных сред и ядерной физике и прикладных исследований на новом реакторе НЕПТУН.

3. Разработка эскизного и инфраструктурного (обликового) проектов нового реактора НЕПТУН, обоснования инвестиций. Подготовка и направление ходатайства о намерениях в ГК «Росатом» и Правительство Московской области. Направление обоснования инвестиций в государственные структуры РФ, его утверждение.

4. Разработка технико-экономического обоснования (ТЭО). Оформление заявки для включения объекта – нового реактора НЕПТУН в федеральную целевую программу.

5. Подготовка к получению лицензии Ростехнадзора на размещение и сооружение нового реактора НЕПТУН. Подготовка технического задания на проектирование. Разработка технического проекта.

6. Моделирование экспериментальной инфраструктуры нового источника, включая элементы экспериментальных установок с прототипированием отдельных компонентов на реакторе ИБР-2.

A NEW NEUTRON SOURCE IS THE PULSATING NEPTUNE RESEARCH REACTOR AT JINR: CURRENT STATUS AND PLANS

M. V. Bulavin

Frank Laboratory of Neutron Physics, Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

E-mail: bulavin85@inbox.ru

Current status of works

In the process of studying the issues of stability and stability of the operation of the NEPTUNE reactor, it was concluded that the main factor of negative influence on the stability and stability of the reactor operation in all modes is the dynamic bending of fuel elements and fuel assemblies of fuel rods. The dynamics of a reactor with one averaged fuel element in the oscillatory approximation is fully considered. It is shown that any periodic fluctuations in reactivity greater than a certain magnitude in amplitude are amplified due to the delay of negative feedback and lead to solutions with slow asymptotic acceleration or to significant fluctuations in reactor power. Within the framework of the oscillatory approximation, a system of interacting and non-interacting fuel rods in the amount of up to several hundred pieces was also studied, as well as the dependence of the course of dynamic processes on the design of the fuel rods and the amount of friction in the supports.

Based on the results obtained, it became possible to formulate requirements for the optimal design of fuel rods and the composition of the core of the NEPTUNE reactor, ensuring stable operation of the reactor at an installed capacity of 10–15 MW. The preferred option for the core layout is the option with a rigid attachment of one of the end caps of fuel rods not assembled in the fuel assembly (fuel assembly), and a mount providing limited small transverse and unlimited longitudinal displacements for the other end cap.

Works on optimizing the configuration of a cryogenic moderator with a water pre-moderator are continued. Calculations for various cryogenic moderator materials at different temperatures and at different thicknesses of the water pre-moderator were carried out. Preliminary calculations have shown that the maximum density of the cold neutron flux is obtained by using a model of a mesitylene cryogenic moderator, 2 cm thick, with a water pre-moderator, 5 cm thick.

An agreement with “JSC A.A. Bochvar VNIINM” (Rosatom State Corporation) for the performance of research, development and development work “Development of nitride-neptunium fuel and fuel rods based on it for the NEPTUNE reactor. Stage 2022–2023” is signed. At this stage, it is planned to produce a fuel tablet from neptunium nitride, to determine its physical, chemical and technological properties.

Together with “JSC NIKIET” (Rosatom State Corporation), a technical task for the implementation of R&D “Design justifications of design solutions for the reactivity modulator of the NEPTUNE periodic pulsed reactor” was developed. The main tasks to be performed as a result of R&D are the development of two variants (with a casing and without a casing) of the design of a reactivity modulator that is operable under all specified operating conditions and making a decision on the use of one of the options, as well as the development of a design variant of the reactor vessel with the lowest thermal load. The implementation of this work will allow us to move to the stage of preliminary design of the NEPTUNE reactor. The conclusion of the contract is planned to be held in 2023.

Together with “RFNC – VNIITF” (Rosatom State Corporation), preparations for performing precision calculations of non-stationary bending of fuel rods under conditions typical of the NEPTUNE reactor in order to verify the calculation methodology created in the FLNP have begun. The possibility of conducting experimental studies in order to verify calculations to substantiate the neutron-physical and dynamic characteristics of the NEPTUNE reactor is being studied.

Together with “JSC SSC RF – FEI” (Rosatom State Corporation), the possibility of modeling the core of the NEPTUNE reactor on a fast physical stand, as well as calculations and modeling of the reactivity modulator is being discussed.

Works within the framework of the JINR seven-year plan 2024–2030

Within the framework of the JINR seven-year plan, work on the creation of a new neutron source will be carried out in the following areas:

1. Implementation of the R&D program for the development of the new NEPTUNE reactor: study of the dynamics of pulsed reactors, optimization of the new reactor vessel and its reactivity modulator in terms of reducing thermal loads and shape change, development of neptunium nitride fuel and fuel rods based on it, optimization of the configuration of the moderator complex, development of the reactivity modulator test stand and the cryogenic moderator test stand.

2. Development of the scientific program and the concept of the instrument base for conducting research in condensed matter physics and nuclear physics and applied research at the new NEPTUNE reactor.

3. Development of preliminary and infrastructural projects of the new NEPTUNE reactor, justification of investments. Preparation and submission of a petition of intent to the Rosatom State Corporation and the Government of the Moscow Region. The direction of the justification of investments in state structures of the Russian Federation, its approval.

4. Development of a feasibility study. Registration of an application for the inclusion of the object – the new NEPTUNE reactor in the federal target program.

5. Preparation for obtaining a license from Rostekhnadzor for the placement and construction of a new NEPTUNE reactor. Preparation of technical specifications for design. Development of a technical project.

6. Modeling of the experimental infrastructure of a new source, including elements of experimental installations with prototyping of individual components at the IBR-2 reactor.

РАСЧЕТЫ ДИНАМИКИ МОЩНОСТИ ПЕРИОДИЧЕСКОГО ИМПУЛЬСНОГО РЕАКТОРА НЕПТУН. ПРОБЛЕМА НЕУСТОЙЧИВОСТИ

А. Е. Верхоглядов

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

E-mail: verhoglyadov_al@mail.ru

В процессе работы над проектом нового периодического импульсного реактора НЕПТУН был обнаружен феномен динамического изгиба – особенность динамики пульсирующих реакторов, не проявляющая себя в реакторах другого типа, но играющая значительную роль в оценке устойчивости работы. Движения тепловыделяющих элементов (ТВЭЛОВ) под действием периодически изменяющейся температуры могут приводить к сильным изменениям реактивности и колебаниям мощности реактора.

Решение проблемы неустойчивости мощности импульсов и поиск параметров надежной эксплуатации нового реактора потребовали создания математической модели (программы расчета) динамики мощности пульсирующего реактора. При этом эффект динамического изгиба рассматривается как основной фактор нестабильности. Учитываются также температурное удлинение ТВЭЛА, положение модулятора реактивности, источники запаздывающих нейтронов, влияние жидкого натрия на движение ТВЭЛОВ. В докладе освещаются методы расчета динамического изгиба, общая схема модели динамики реактора и ее текущее состояние.

CALCULATIONS OF THE POWER DYNAMICS OF NEPTUN PULSED REACTOR. THE PROBLEM OF INSTABILITY

A. E. Verhoglyadov

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

E-mail: verhoglyadov_al@mail.ru

In the process of working on the project of a new NEPTUN pulsed reactor, the phenomenon of dynamic bending was discovered – a feature of the dynamics of pulsed reactors that does not appear in reactors of other types, but plays a significant role in evaluating the stable operation of the reactor. Movement of fuel elements (fuel rods) under the influence of periodically changing temperature can lead to high changes of reactivity and fluctuations of the reactor power.

Solving the problem of power instability and searching of parameters for reliable operation of a new reactor required the development of a mathematical model (calculation program) of the power dynamics of a pulsed reactor. The effect of dynamic bending is considered as the main factor of instability. The temperature elongation of the fuel element, the position of the reactivity modulator, sources of delayed neutrons, and the effect of liquid sodium on the movement of fuel elements are also taken into account. The report presents the methods of dynamic bending calculation, the general scheme of the dynamics model and its current state.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ПАССИВНОГО КАТАЛИТИЧЕСКОГО РЕКОМБИНАТОРА ВОДОРОДА РВК-500 В КОМПЛЕКСНЫХ ЭКСПЕРИМЕНТАХ С ПОМОЩЬЮ КОДА САВАРЕТ-SC1

В. Ю. Глотов, А. А. Канаев, В. Г. Кондаков

Институт безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

Условия, в которых функционирует пассивный каталитический рекомбинатор водорода (ПКРВ), могут различаться в зависимости от сценария и этапа тяжелой аварии. Для исследования характеристик работы ПКРВ в разных условиях необходимы соответствующие испытания, которые можно разделить на специальные и комплексные. В специальных экспериментах используются отдельные каталитические элементы, массовый расход газа и компонентный состав среды на входе в каталитический блок поддерживается постоянным. В комплексных экспериментах используются масштабные модели ПКРВ, конвективный поток через катализатор развивается естественным образом и оказывает влияние на состав и температуру окружающей ПКРВ атмосферы экспериментальной установки, в свою очередь, существует обратная связь между скоростью рекомбинации и конвективными потоками в экспериментальной установке (определяющими концентрацию водорода и скорость потока на входе ПКРВ). Таким образом, для адекватного моделирования комплексных экспериментов с ПКРВ необходимо не только правильное моделирование работы ПКРВ, но и надежные расчеты параметров газовой среды в атмосфере установки.

Точность моделирования параметров многокомпонентной газовой среды как внутри ПКРВ, так и в объеме экспериментальной установки зависит от выбора численной методики. В ИБРАЭ РАН для моделирования турбулентных течений разрабатывается вихреразрешающий беспараметрический подход, основанный на методике КАБАРЕ [1], обладающий повышенными прогнозными возможностями в части распространения и перемешивания многокомпонентных газовых смесей. Эта методика была реализована в коде САВАРЕТ-SC1 [2] для проведения численного анализа относительно медленных процессов перемешивания и стратификации водородосодержащих газовых смесей под защитной оболочкой АЭС.

В данной работе представлена разработанная и реализованная в коде САВАРЕТ-SC1 гидродинамическая (CFD) модель ПКРВ РВК-500 с двумя подходами (эмпирическим [3] и диффузионным [4]) для скорости рекомбинации водорода, а также представлены результаты расчетов с помощью данной модели комплексных экспериментов на установке БМ-П, выполненных в РФЯЦ – ВНИИТФ.

Работа выполнена с использованием оборудования Центра коллективного пользования сверхвысокопроизводительными вычислительными ресурсами МГУ имени М. В. Ломоносова [5].

Литература

1. **Головизнин, В. М.** Новые алгоритмы вычислительной гидродинамики для многопроцессорных вычислительных комплексов [Текст] / В. М. Головизнин, М. А. Зайцев, С. А. Карабасов и др. – М. : Изд-во МГУ им. М. В. Ломоносова, 2013. – 472 с.
2. **Большов, Л. А.** Валидация кода САВАРЕТ_SC1 на экспериментах по водородной взрывобезопасности на АЭС [Текст] / Л. А. Большов, В. Ю. Глотов, В. М. Головизнин, А. А. Канаев, А. Е. Киселев, Т. А. Юдина // Атомная энергия. – 2019. – Т. 127, № 4. – С. 18–23.
3. **Тарасов, О. В.** Разработка и верификация модели рекомбинаторов РВК-500, -1000 для моделирования защитной оболочки АЭС с ВВЭР методами вычислительной гидродинамики [Текст] / О. В. Тарасов, А. Е. Киселев, А. С. Филиппов, Т. А. Юдина, Д. Г. Григорук, Д. Е. Кошманов и др. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 121. – № 3. – С. 131–135.
4. **Böhm, J.** Modellierung der Prozesse in katalytischen Rekombinatoren. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energietechnik [Text] // Energy Technology. – 2007. – Vol. 61.

5. **Voevodin, VI.** Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community [Text] / VI. Voevodin, A. Antonov, D. Nikitenko, P. Shvets, S. Sobolev, I. Sidorov et al. // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 4–11. DOI:10.14529/jsfi190201.

MODELLING OF PASSIVE CATALYTIC RECOMBINER RVK-500 OPERATION IN COMPLEX EXPERIMENTS USING THE CABARET-SC1 CODE

V. Yu. Glotov, A. A. Kanaev, V. G. Kondakov

Nuclear Safety Institute of the RAS, Moscow, Russia

The conditions under which a passive catalytic recombiner (PAR) operates may vary depending on the scenario and stage of a severe accident. In order to study the characteristics of the PAR operation under different conditions, appropriate experiments are needed, which can be divided into special and complex. In special experiments, separate catalytic elements are used, the mass flow rate and the component composition of the gas at the inlet are kept constant. In the complex experiments, full models of PAR are used, the convective flow through the catalyst develops naturally and affects the composition and temperature of the atmosphere of the experimental facility, in turn, there is a feedback between the recombination rate and convective flows in the experimental facility (determining the hydrogen concentration and the rate of flow at the inlet of the PAR). Thus, in order to adequately simulate complex experiments with PAR, it is necessary not only to correctly simulate the operation of PAR but also to reliably calculate the parameters of the gaseous medium in the facility atmosphere.

The accuracy of modeling the parameters of a multicomponent gaseous medium both inside the PAR and in the volume of the experimental facility depends on the choice of the numerical technique. In NSI RAS, for modeling turbulent flows, an eddy-resolving parameter-free approach based on the CABARET method [1] is being developed, which has increased predictive capabilities in terms of the propagation and mixing of multicomponent gas mixtures. This technique was implemented in the CABARET-SC1 code [2] for numerical analysis of relatively slow processes of mixing and stratification of hydrogen-containing gas mixtures under the NPP containment.

This paper presents the hydrodynamic (CFD) model of the RVK-500 PAR developed and implemented in the CABARET-SC1 code with two approaches (empirical [3] and diffusion [4]) for the hydrogen recombination rate, and also presents the results of calculations using this model of complex experiments on the BM-P facility carried out at VNIITF.

The research is carried out using the equipment of the shared research facilities of HPC computing resources at Lomonosov Moscow State University [5].

References

1. **Goloviznin, V. M.** Novel Algorithms of Computational Hydrodynamics for Multicore Computing [Text] / V. M. Goloviznin, M. A. Zaytsev, S. A. Karabasov, I. A. Korotkin. – M. : Publishing House of Moscow State University. M. V. Lomonosov, 2013. – 472 p.
2. **Bol'shov, L. A.** CABARET-SC1 code validation in experiments on hydrogen explosion safety at NPP [Text] / L. A. Bol'shov, V. Y. Glotov, V. M. Goloviznin, A. A. Kanaev, A. E. Kiselev, T. A. Yudina // Atomic Energy. – 2020. – Vol. 127, No. 4. P. 216–222.
3. **Tarasov, O. V.** Recombiner model development and verification for RVK-500, -1000 for containment simulation by means of computational fluid dynamics [Text] / O. V. Tarasov, A. E. Kiselev, A. S. Filippov, T. A. Yudina, D. G. Grigoruk, D. E. Koshmanov et al. // Atomic Energy. – 2017. – Vol. 121, No. 3. – P. 166–172.
4. **Böhm, J.** Modellierung der Prozesse in katalytischen Rekombinatoren. Schriften des Forschungszentrums Jülich Reihe Energietechnik [Text] // Energy Technology. – 2007. – Vol. 61.
5. **Voevodin, VI.** Supercomputer Lomonosov-2: Large Scale, Deep Monitoring and Fine Analytics for the User Community [Text] / VI. Voevodin, A. Antonov, D. Nikitenko, P. Shvets, S. Sobolev, I. Sidorov et al. // Supercomputing Frontiers and Innovations. – 2019. – Vol. 6, No. 2. – P. 4–11. DOI:10.14529/jsfi190201.

5-4

ВОЗМОЖНОСТИ И МОДЕЛЬНЫЙ РЯД ДИФРАКТОМЕТРОВ TONGDA

Д. Г. Голованов

ООО «Мелитэк», Москва, Россия

Компания Tongda является одним из крупнейших производителей рентгеновских дифрактометров в Китае. Модельный ряд приборов включает в себя настольные модели, а также полноразмерные дифрактометрические системы. Дифрактометры компании Tongda построены с использованием современной компонентной базы и предоставляют широкие аналитические возможности. Дифрактометры могут оснащаться широким кругом аксессуаров, включая температурные камеры, что значительно расширяет исследовательские возможности.

MODELS AND CAPABILITIES OF XRD SYSTEMS FROM TONGDA

D. G. Golovanov

Melytec Ltd., Moscow, Russia

Tongda company is one of the largest manufacturers of X-ray diffractometers in China. The range of devices includes desktop models, as well as full-size diffractometer systems. Tongda diffractometers are built using a modern component and provide wide range of analytical capabilities. Diffractometers can be equipped with a number of accessories, including temperature chambers, which significantly expands research capabilities.

5-5

АТОМНАЯ ЭНЕРГЕТИКА КАК ОСНОВА УСТОЙЧИВОГО РАЗВИТИЯ

Н. В. Горин¹, Б. К. Водолага¹, В. П. Кучинов², В. В. Шидловский³

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

³АО «Прорыв», Москва, Россия

Устойчивое развитие одна из наиболее обсуждаемых проблем в современных выступлениях политических лидеров, представителей деловых кругов, в аналитических обзорах, на конференциях и в научных публикациях. Отмечается, что быстрых решений ожидать не следует, проблемы будут решаться на протяжении жизни нескольких поколений людей. Одна из ключевых задач в целях устойчивого развития ООН и в национальных проектах России – «недорогостоящая и чистая энергия», достижение которой позволит выполнить ряд других целей устойчивого развития. Рассмотрена инициатива России в интересах достижения нескольких целей развития за счет источника экологически чистой атомной энергии как базового источника энергоснабжения. Одновременно чистая энергетика позволит ответить на основные вызовы современности – загрязнение окружающей среды и климатические явления. Названы основные вызовы – глобальное потепление, парниковый эффект из-за выбросов в атмосферу CO₂ и загрязнение окружающей среды и основные загрязнители – объекты углеводородной энергетики, промышленности и транспорт. Для устойчивого развития нужна экологически чистая энергия в количестве не менее десятка млрд т.н.э./год ($>3...5 \cdot 10^{20}$ Дж/г). Возобновляемые источники энергии (солнечная, ветровая и пр.) с этой задачей не справятся, так как у них мала плотность потока энергии. Нужна новая технология, производящая на единицу массы сырья

на несколько порядков больше энергии и меньше отходов. Она предложена – атомная энергетика с реакторами на быстрых нейтронах и замкнутым ЯТЦ [1]. Обоснованы решение проблем нераспространения ядерного оружия [2], показана возможность обнаружения скрытых нарушений режима [3] и обсуждены особенности работы с населением для формирования востребованного отношения к атомной энергетике [4].

Литература

1. **Адамов, Е. О.** Ядерная энергетика с естественной безопасностью: смена устаревшей парадигмы, критерии [Текст] / Е. О. Адамов, В. В. Орлов, В. И. Рачков, И. С. Слесарев, Ю. С. Хомяков // Известия академии наук. Энергетика. – 2015. – № 1. – С. 13–29.
2. **Горин, Н. В.** Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом [Текст] / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков, А. Н. Чебесков, В. П. Кучинов и др. // Атомная энергия. – 2021, – Т. 130. – Вып. 1. – С. 48–51.
3. **Горин, Н. В.** Обнаружение признаков нарушений обязательств по ядерному нераспространению государством-импортером быстрого реактора с установками замкнутого ЯТЦ [Текст] / Н. В. Горин, А. Л. Карманов, В. Н. Первиненко, В. В. Власов, Н. А. Теплых и др. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 131. – Вып. 4. – С. 227–232.
4. **Горин, Н. В.** Воспитание у населения востребованного отношения к атомной энергетике [Текст] / Н. В. Горин, Н. Л. Абрамова, С. В. Нечаева, О. С. Головихина // Государственное управление. Электронный вестник. – 2021. – № 87. – С. 7–18. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18.

NUCLEAR ENERGY AS A BASIS OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

N. V. Gorin¹, B. K. Vodolaga¹, V. P. Kuchinov², V. V. Shidlovskiy³

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³JSC «Proryv», Moscow, Russia

Sustainable development is one of the most discussed issues voiced by political leaders and representatives of the business community in analytical reviews, at conferences, and in scientific publications. It is stated that no quick solutions should be expected; the problems will be resolved throughout the lifetime of several generations of people. One of the key objectives among the goals of sustainable development of the United Nations and in the national projects of Russia is “affordable and clean energy”, the achievement of which will make it possible to accomplish a number of other sustainable development goals. The initiative of Russia in the interests of achieving several goals of sustainable development by means of a source of environmentally friendly nuclear energy as a basic source of power supply has been considered. At the same time, clean energy will make it possible to respond to the main challenges of our time, environmental pollution and climate changes. Global warming and the greenhouse effect due to CO₂ emissions into the atmosphere have been pointed out as the main challenges, while hydrocarbon-based facilities, industry and transport have been named as the main pollutants. Sustainable development requires environmentally clean energy in the amount of at least ten billion TOE a year ($>3 \dots 5 \cdot 10^{20}$ J/year). Renewable energy sources (solar, wind, etc.) will not be able to cope with this task due to their low energy flux density. A new technology is needed that would generate several orders of magnitude more energy and less waste per unit mass of raw materials. And such a technology has been proposed: nuclear energy with fast neutron reactors and a closed nuclear fuel cycle [1]. The solution of the problems of non-proliferation of nuclear weapons has been substantiated [2], the possibility of detecting hidden violations of the regime has been shown [3], and features of outreach and awareness-raising work with the population to form the required attitude towards nuclear energy have been discussed [4].

References

1. **Adamov, E. O.** Nuclear Energy with Inherent Safety: Change of Outdated Paradigm, Criteria [Text] / E. O. Adamov, V. V. Orlov, V. I. Rachkov, I. S. Slesarev, Yu. S. Khomyakov // Proceedings of the Russian Academy of Science. Power Engineering. – 2015. – No 1. – P. 13–29.
2. **Gorin, N. V.** Nuclear Non-Proliferation Security on Exportation of Fast Reactors with a Closed Fuel Cycle [Text] / Gorin, N. V., Voloshin, N. P., Churikov, Y. I. Chebeskov, A. N., Kuchinov at al. // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 130, No. 1. – P. 53–56. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00773-0>;
3. **Gorin, N. V.** Detection the Violations of Nuclear Non-proliferation Obligations by the State Importing Fast Reactor with Closed Nuclear Fuel Cycle [Text] / N. V. Gorin, A. L. Karmanov, V. N. Pervinenko, V. V. Vlasov, N. A. Teplykh at al. // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 131, No. 4. – P. 227–232.
4. **Gorin, N. V.** Fostering Respectful Attitude towards Nuclear Industry [Text] / N. V. Gorin, N. L. Abramova, S. V. Nechaeva, O. S. Golovikhina // Public Administration E-journal. – 2021. – No. 87. – P. 6–24. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18.

5-6

ОСОБЕННОСТИ ПРЕДСТОЯЩЕГО ЭКСПОРТА БЫСТРЫХ РЕАКТОРОВ С ЗАМКНУТЫМ ЯТЦ, КАК РЕАКЦИЯ НА ОСНОВНЫЕ ВЫЗОВЫ СОВРЕМЕННОСТИ

Н. В. Горин¹, Н. П. Волошин¹, Ю. И. Чуриков¹, В. П. Кучинов², В. В. Шидловский³

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

³АО «Прорыв», Москва, Россия

Отмечено, что на планете нет углеводородных ресурсов, которые позволили бы всему населению выйти на уровень потребления развитых стран за счет сжигания нефти и газа; тем более их не будет через несколько десятков лет и в ближайшем будущем на первое место неизбежно выйдут ядерные технологии производства энергии. Только они позволяют на единицу сырья получать на несколько порядков больше энергии и меньше отходов и решить важнейшие проблемы устойчивого развития. Обоснован наиболее эффективный инструмент реагирования на основные вызовы современности (загрязнение окружающей среды и глобальное потепление) – снижение доли углеводородного сырья в энергетическом балансе и переход на экологически чистую атомную энергетику на быстрых реакторах с замкнутым ЯТЦ [1]. Отмечено ее соответствие требованиям, сформулированными Э.Ферми (1947 г.) – безопасность, экономичность, решение проблем отходов и нераспространения. Опровергнуто устоявшееся мнение, что быстрые реакторы с технологиями переработки ОЯТ представляют угрозу проблемам нераспространения [2] и названы основные барьеры препятствующие распространению [3]. Показано отношение населения к ядерным технологиям [4] и оценены экспортные перспективы быстрых реакторов при их распространении в мире [5]. Отмечено, что быстрые реакторы с замкнутым ЯТЦ обеспечат человечество на многие столетия экологически чистой энергией и позволят ему надеяться на дальнейшее устойчивое развитие.

Литература

1. **Орлов, В. В.** Нетрадиционные концепции АЭС с естественной безопасностью (новая ядерная технология для крупномасштабной ядерной энергетики следующего этапа) [Текст] / В. В. Орлов, Е. Н. Аврорин, Е. О. Адамов и др. // Атомная энергия. – 1992. – Т. 72. – Вып. 4. – С. 317–329.

2. **Горин, Н. В.** Обеспечение режима ядерного нераспространения при экспорте реакторов на быстрых нейтронах с замкнутым топливным циклом [Текст] / Н. В. Горин, Н. П. Волошин, Ю. И. Чуриков и др. // Атомная энергия. – 2021. – Т. 130. – Вып. 1. – С. 48–51.
3. **Горин, Н. В.** Барьеры на путях ядерного распространения при экспорте российских быстрых реакторов с замкнутым ЯТЦ (на примере БРЕСТ ОД-300) [Текст] / Н. В. Горин, Е. В. Кузнецов, В. П. Кучинов и др. // Вестник НЯЦ. – 2021. – Вып. 4(88). – С. 16–21. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21>.
4. **Горин, Н. В.** Воспитание у населения востребованного отношения к атомной энергетике [Текст] / Н. В. Горин, Н. Л. Абрамова, С. В. Нечаева, О. С. Головихина // Государственное управление. Электронный вестник. – 2021. – № 87. – С. 7–18. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18.
5. **Gorin, N. V.** Export prospects of fast reactors desined in Russia with closed nuclear fuel cycle facilities [Text] / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, A. V. Krivtsov, A. I. Orlov, V. V. Shidlovskiy, D. B. Matveeva // Nuclear Energy and Technology. – 2022. – Vol. 8(3). – P. 153–159. <https://doi.org/10.3897/nucet.8.80757>.

FEATURES OF FORTHCOMING EXPORT OF FAST REACTORS WITH CLOSED NUCLEAR FUEL CYCLE AS A RESPONSE TO MODERN CHALLENGES

N. V. Gorin¹, N. P. Voloshin¹, Yu. I. Churikov¹, V. P. Kuchinov², V. V. Shidlovskiy³

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

²National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

³JSC «Proryv», Moscow, Russia

The paper marks out that the Earth hydrocarbon resources are not enough for the world population to reach the developed countries' consumption level by burning oil and gas. Moreover, in several decades they will be almost exhausted and in the nearest future, nuclear power-generation technologies will inevitably be the most important. Only with these technologies, the amount of produced power will be of several orders greater and the amount of waste – less. Besides, they will facilitate solutions of the most urgent issues concerning sustainable development. Decrease in the hydrocarbon resources' share in the power balance and transfer to ecologically-friendly nuclear power generated by fast reactors with closed nuclear fuel cycle are the most efficient tools for responding to the main challenges of today (environmental pollution and global warming) [1]. It has been noted that this type of power complies with the requirements formulated by E. Fermi (1947): safety, cost effectiveness, and resolution of issues associated with waste and nonproliferation. An established opinion, that fast reactors with nuclear spent fuel technologies pose a threat to nonproliferation, has been called into question [2], and the principal proliferation barriers has been described [3]. The paper also discloses the public relations to nuclear technologies [4] and estimates the prospects of export for fast reactors taking into account their worldwide distribution [5]. It is noted that fast reactors with closed nuclear fuel cycle will become a centuries-long source of environmentally clean power for the humanity and people will have more chances to anticipate further sustainable development.

References

1. **Orlov, V. V.** Nontraditional concepts of nuclear power plants with inherent safety (new nuclear technology for the next stage of large-scale production of nuclear power) [Text] / V. V. Orlov, E. N. Avrorin, E. O. Adamov, A. P. Vasil'ev, E. P. Velikhov at al. // Atomic Energy. – 1992. – Vol. 72. – P. 287–296. <https://doi.org/10.1007/BF00760874>.
2. **Gorin, N. V.** Nuclear Non-Proliferation Security on Exportation of Fast Reactors with a Closed Fuel Cycle [Text] / N. V. Gorin, N. P. Voloshin, Y. I. Churikov, A. N. Chebeskov, V. P. Kuchinov at al. // Atomic Energy. – 2021. Vol. 130. – P. 53–56. <https://doi.org/10.1007/s10512-021-00773-0>.
3. **Gorin, N. V.** Barriers on Ways of Nuclear Distribution at Export of the Russian Fast Reactors with Closed Nuclear Fuel Cycle (on an example Brest ОД-300) [Text] / N. V. Gorin, E. V. Kuznetsov, V. P. Kuchi-

nov, A. N. Chebeskov, A. V. Moiseev et al. // Vestnik NYAC. – 2021. – No. 4(88). – P. 16–21. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-4-16-21>.

4. **Gorin, N. V.** Fostering Respectful Attitude towards Nuclear Industry [Text] / N. V. Gorin, N. L. Abramova, S. V. Nechaeva, O. S. Golovikhina // Public Administration E-journal. – 2021. – No. 87. – P. 6–24. DOI: 10.24412/2070-1381-2021-87-7-18.

5. **Gorin, N. V.** Export prospects of fast reactors desined in Russia with closed nuclear fuel cycle facilities [Text] / N. V. Gorin, V. P. Kuchinov, A. V. Krivtsov, A. I. Orlov, V. V. Shidlovskiy, D. B. Matveeva // Nuclear Energy and Technology. – 2022. – Vol. 8(3). – P. 153–159. <https://doi.org/10.3897/nucet.8.80757>.

5-7

МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОДХОДЫ К СОЗДАНИЮ МОДЕЛИ ЭНЕРГОБЛОКА АЭС С ВВЭР ДЛЯ РЕАЛИСТИЧЕСКОГО РАСЧЕТНОГО АНАЛИЗА ТЯЖЕЛЫХ АВАРИЙ И ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

К. С. Долганов

Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, Москва, Россия

Для получения реалистических и обоснованных прогнозов последствий тяжелых аварий на АЭС с реакторными установками ВВЭР требуется разработка математической модели энергоблока. Понятие математической модели энергоблока предлагается определять как формализованное представление данных о наиболее важных взаимосвязанных структурных составляющих энергоблока, возникающих в них физических процессов и явлений, описывающих эти процессы и явления моделей, в совокупности интегрированных в единое валидированное средство расчетного анализа.

С учетом многолетнего опыта разработки и применения средств численного моделирования для анализа безопасности АЭС можно выделить следующие методические составляющие создания математической модели энергоблока ВВЭР, предназначенной для расчетов тяжелых аварий:

- определение основных элементов энергоблока, моделирование которых необходимо для обоснованного прогнозирования событий и последствий тяжелых аварий;
- формирование и систематизация сценариев, приводящих к тяжелым авариям;
- выявление и ранжирование по значимости процессов и явлений, определяющих развитие и последствия тяжелых аварий;
- определение подходов к моделированию определяющих процессов и явлений с учетом современного уровня знаний;
- выбор, разработка или адаптация, валидация и аттестация интегральной программы для ЭВМ для использования в составе математической модели энергоблока;
- разработка квалифицированного набора исходных данных об энергоблоке с целью его использования в расчетных анализах тяжелых аварий при помощи интегральной программы для ЭВМ;
- учет неопределенностей знаний об определяющих процессах при использовании математической модели в расчетах тяжелых аварий.

В данной статье представлено описание каждой из перечисленных методических задач и примеры их практической реализации применительно к тяжелым авариям на АЭС с ВВЭР.

METHODICAL APPROACHES TO CREATING A MODEL OF A NUCLEAR POWER PLANT WITH VVER FOR REALISTIC NUMERICAL ANALYSIS OF SEVERE ACCIDENTS AND RADIATION SAFETY

K. S. Dolganov

Nuclear Safety Institute of the Russian academy of sciences, Moscow, Russia

To obtain the valid and realistic prediction of severe accidents consequences at NPPs with VVER reactors, development of a mathematical model for the NPP unit is required. The concept of a mathematical model for the NPP unit is proposed to be defined as a formalized representation of data on the most important interconnected structural components of a unit, the physical processes and phenomena arising in these components, the models describing these processes and the phenomena, all integrated into a single validated numerical tool.

Taking into account long experience in the development and application of numerical simulation codes for NPP safety analysis, the following methodical aspects can be distinguished for creating a mathematical model of a VVER unit for severe accident calculations:

- determination of the main elements of the NPP unit, that must be modeled in order to obtain a reasonable prediction of events and consequences of severe accidents;
- selection and systematization of scenarios leading to severe accidents;
- identification and ranking by significance of processes and phenomena that determine the development and consequences of severe accidents;
- determination of approaches to modeling the key processes and phenomena, taking into account the state-of-the art;
- selection, development or adaptation, validation and certification of the integral computer program for use as part of a mathematical model of an NPP unit;
- development of a qualified set of initial data on NPP unit for its use in the numerical analyzes of severe accidents with integrated computer program;
- account for the knowledge uncertainties on the key processes when using a mathematical model in calculations of severe accidents.

This article presents a description of each of the listed methodical issues and examples of their practical implementation in relation to severe accidents at NPPs with VVER.

5-8

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ПАРАМЕТРОВ ТВЕРДОГО СЛОЯ ИЗОТОПОВ ВОДОРОДА В КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ

Е. Ю. Зарубина, М. А. Рогожина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров, Россия

Криогенные мишени, предоставляемые в лазерный эксперимент по зажиганию, должны соответствовать высоким требованиям: шероховатость внутренней поверхности криослоя должна быть в пределах 1 мкм для всех мод [1], отклонения от однородности, сферичности, концентричности слоев должны быть менее 1–2% [2]. В данной работе приведены результаты разработки методов контроля параметров слоя 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.

Для получения твердого криогенного слоя требуемой толщины разработана программа вычисления видимой высоты мениска жидкого топлива при наполнении оболочки в процессе проведения экспериментов. Разработана программа для теневого контроля параметров твердого криослоя, в которой при известном диаметре и толщине оболочки по теневому 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 квазипараллельного пучка рентгеновского излучения 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 теневое 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.

Литературы

1. **Sangster, T. C.** Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion [Text] / T. C. Sangster, R. Betti, R. S. Craxton et al. // *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 [Text] // *Optics and laser technology*. – 2021. – Vol. 134. – P. 6.

THE CONTROL METHODS OF HYDROGEN ISOTOPES SOLID LAYER PARAMETERS IN INDIRECT-DRIVE CRYOGENIC TARGET

E. Yu. Zarubina, M. A. Rogozhina

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Scientific Research Institute of Experimental Physics”, Sarov, Russia

Cryogenic targets for the laser ignition experiment must meet high requirements: the inner surface roughness of the cryolayer must be less than 1 micron for all modes [1], deviations from uniformity, sphericity, concentricity of the layers must be less than 1–2% [2]. This paper presents the results of the control methods development of the hydrogen isotopes layer parameters in a cryogenic target. The optical shadow method is used for optically transparent shells, the phase contrast X-ray method is used for optically opaque shells.

A two-dimensional simulation of the visible radiation beam propagation through a cryogenic target by ray-tracing method is carried out, where the variable parameters are the non-concentricity and non-sphericity of the target surfaces, the divergence and inclination of the beam relative to the optical axis of observation, the image localization plane shift relative to the target equator, the observation aperture, refractive indices of layers, the rays number, etc. The modeling is necessary to study the influence of the above factors on the shadow image formation of the cryotarget and, consequently, on the cryogenic layer parameters calculation.

To obtain a solid cryogenic layer of the required thickness, the program has been developed for the calculation of the visible liquid fuel meniscus height when filling the shell during experiments. The program has been developed for shadow control of the solid cryolayer parameters where with a known diameter and thickness of the shell, the following parameters of the cryolayer are automatically calculated from the

shadow image and recorded in a file: profile, roughness, Fourier power spectrum, deviations from the concentricity and sphericity of the inner cryolayer surface, the average cryolayer thickness.

The two-dimensional simulation of the X-rays quasi-parallel beam propagation through a spherically symmetric cryogenic target is carried out, where the variable parameters are the external diameter of the target, the thickness and materials of the layers, the distance from the cryotarget to the detector. The result of the program is a simulated X-ray shadow image and the real boundaries of the cryotarget plotted on the image. Based on this theoretical model, the program for processing the X-ray image of the cryotarget with automatic calculation of the cryolayer parameters will be written.

References

1. **Sangster, T. C.** Cryogenic DT and D2 targets for inertial confinement fusion [Text] / T. C. Sangster, R. Betti, R. S. Craxton et al. // 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 [Text] // Optics and laser technology. – 2021. – Vol. 134. – P. 6.

5-9

О НЕЭМПИРИЧЕСКОЙ КЛАССИФИКАЦИИ МЕДЛЕННЫХ ПЛАМЕН В ВОДОРОДНЫХ ГАЗОВЫХ СМЕСЯХ

И. А. Кириллов

Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

Для анализа или проектирования мер пожаро- и взрывобезопасности для современных водородных технологий и инфраструктуры необходимо иметь обоснованную классификацию множественных, существенно различающихся по природе пламен. Требуемая классификация должна быть: 1) максимально полной – представлять весь спектр явлений горения в надежном и удобном для поиска и идентификации виде; 2) быть максимально подробной – содержать качественные и количественные признаки, определяющие пламя, – его структуру, поведение и соответствующие пределы. В статье описана неэмпирическая классификация медленных ламинарных пламен, свободно распространяющихся в водородно-воздушных и водородно-кислородных газовых смесях. Классификация основана на двух ключевых компонентах – 1) теоретической схеме, содержащей две «порождающие» модели для двух основных, топологически различных семейств пламен – дефлаграционных пламен и шаровых пламен, и 2) кинетико-термодинамической теории соответствующих фундаментальных концентрационных пределов. Сделан обзор опубликованных экспериментальных данных в поддержку предложенной классификации. Сформулированы требования к экспериментам (эмпирическим и/или численным), которые целесообразно провести для расширения предложенной классификации и на быстрые пламена (турбулентные и детонационные).

ON NON-EMPIRICAL CLASSIFICATION OF THE SLOW FLAMES IN HYDROGEN-CONTAINING GAS MIXTURES

I. A. Kirillov

National research centre “Kurchatov institute”, Moscow, Russia

For accurate and comprehensive analysis or design of the fire and explosion safety measures for the emerging hydrogen technologies and infrastructure, it is necessary to have a justified classification of the multiple, substantially different in nature flames. Required classification shall 1) be As Complete As Reasonably Possible – represents the entire range of the combustion phenomena in a reliable and convenient way for searching and identification, and 2) be As Detailed As Reasonably Possible – contain qualitative

and quantitative features, which define flame structure, behavior and the appropriate limits. In this paper a non-empiric classification of the slow, laminar flames, freely propagating in the hydrogen-air and hydrogen-oxygen gas mixtures, is described. Classification scheme is based on two key components – 1) theoretical framework containing two generative (breeding) models for two basic, topologically different families of flames – deflagration flames and flame balls, and 2) kinetic-thermodynamic theory of the appropriate fundamental concentration limits. Previous and recent experimental data for 2dim and 3dim flame propagation in support of this classification are reviewed. To extend the proposed classification to the fast flames (turbulent and detonative), several experiments (empirical and/or numerical) have been proposed.

5-10

АНЕЙТРОННЫЙ СИНТЕЗ ПРОТОН–БОР В ОСЦИЛЛИРУЮЩЕЙ ПЛАЗМЕ МИНИАТЮРНОГО ВАКУУМНОГО РАЗРЯДА

Ю. К. Куриленков^{1,2}, А. В. Огинов¹, С. Ю. Гуськов¹, И. С. Самойлов²

¹Физический институт им П. Н. Лебедева РАН, Москва, Россия

²Объединенный институт высоких температур РАН, Москва, Россия

Ранее, для осцилляций плазмы в наносекундном вакуумном разряде (НВР) использовалась схема инерциального электростатического удержания с обратной полярностью [1, 2]. Она включает инжекцию автоэлектронов в анодное пространство при подаче высокого напряжения и формирование очень маленького виртуального катода (ВК) с радиусом $r_{\text{ВК}} \approx 0,1$ см и связанной с ним потенциальной ямы (ПЯ) глубиной $\phi_{\text{ПЯ}} \approx 100$ кВ. Дейтроны могут осциллировать в ПЯ, и в моменты их встречных столкновений на «дне» ПЯ имеет место DD синтез, проявляющийся в пульсирующем выходе DD-нейтронов [1]. В то же время ПЯ удерживает колеблющиеся дейтроны, поскольку энергии, которую они получают в поле ВК, всегда недостаточно, чтобы покинуть потенциальную яму. По аналогии с синтезом DD, PiC моделирование в электромагнитном коде KARAT показало, что анейтронная реакция протон–бор (pB) $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow \alpha + {}^8\text{Be}^* \rightarrow 3\alpha + 8,7$ МэВ также может быть достигнута в НВР путем ускорения и удержания протонов и ионов бора полем ВК [2]. В процессе их колебаний в ПЯ, в результате встречных столкновений части протонов и ионов бора с энергиями $\sim 100\text{--}500$ кэВ с определенной вероятностью происходит pB реакция. Результаты первых демонстрационных экспериментов по синтезу pB в одном устройстве на базе НВР были представлены недавно [2]. Специфика осцилляторного удержания при синтезе pB [2] заключается в том, что периоды колебаний ионов бора и протонов различны из-за разницы в их массах и зарядах. В среднем, зарегистрированный выход α -частиц составлял около 250 α -частиц на один выстрел (≈ 1 Дж, импульс напряжения $U \approx 100$ кВ, длительность $\tau \approx 20$ нс) [2]. При улучшенной геометрии электродов мы должны получать по меньшей мере $\sim 10^3/4\pi$ α -частиц за один выстрел. PiC-моделирование процессов синтеза pB показало, что плазма в НВР, и особенно на оси разряда, находится в состоянии, близком к квазинейтральному, что существенно отличается от условий в известной схеме периодически осциллирующих плазменных сфер (ПОПС), предложенной ранее [3] для ядерного синтеза. В отличие от когерентных сжатий в оригинальной схеме ПОПС, по-видимому, мелкомасштабные колебания в НВР являются следствием резонансного нагрева ионов. Кроме того, PiC моделирование показывает, что функции распределения протонов и ионов бора по энергиям не являются максвелловскими. Таким образом, в НВР мы имеем периодический как DD, так и анейтронный синтез pB в неравновесной плазме, остающейся «незажатой» на оси разряда.

Литература

1. Kurilenkov, Yu. K. Oscillating ions under Inertial Electrostatic Confinement (IEC) based on nanosecond vacuum discharge [Text] / Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, A. V. Oginov, V. T. Karpuhin // Contrib. Plasma Phys. – 2018. – Vol. 58 – P. 952–961. DOI: 10.1002/ctpp.201700188.

2. **Kurilenkov, Yu. K.** Proton-boron fusion in a compact scheme of plasma oscillatory confinement [Text] / Yu. K. Kurilenkov, A. V. Oginov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, I. S. Samoylov // Phys. Rev. E. – 2021. – Vol. 103. – P. 043208. DOI: 10.1103/PhysRevE.103.043208.
3. **Evstatiev, E. G.** Space charge neutralization in inertial electrostatic confinement plasmas [Text] / E. G. Evstatiev, R. A. Nebel, L. Chacón, J. Park, G. Lapenta // Phys. Plasmas. – 2007. – Vol. 14. – P. 042701. DOI: 10.1063/1.2711173.

ANEUTRONIC PROTON–BORON FUSION IN OSCILLATING PLASMA OF MINIATURE VACUUM DISCHARGE

Yu. K. Kurilenkov^{1,2}, A. V. Oginov¹, S. Yu. Guskov¹, I. S. Samoylov²

¹Lebedev Physical Institute RAS, Moscow, Russia

²Joint Institute of High Temperatures RAS, Moscow, Russia

Previously, for plasma oscillations in a nanosecond vacuum discharge (NVD), an inertial electrostatic confinement scheme with reverse polarity have been used [1, 2]. It includes the injection of autoelectrons into the anode space when high voltage is applied and the formation of a very small virtual cathode (VC) with a radius $r_{VC} \approx 0.1$ cm and a potential well (PW) associated with it with a depth of $\phi_{PW} \approx 100$ kV. Deuterons can oscillate in the PW, and at the moments of their head-on collisions at the “bottom” of the PW, DD synthesis takes place, manifested in the pulsating output of DD neutrons [1]. At the same time, the PW holds the oscillating deuterons, since the energy they receive in the VC field is always insufficient to leave the potential well. By analogy with DD synthesis, the PiC modeling in the electromagnetic code KARAT showed that the proton–boron (pB) aneutronic reaction $p + 11B \rightarrow \alpha + 8Be^* \rightarrow 3\alpha + 8,7$ MeV can also be achieved in the NVD by accelerating and confining protons and boron ions by the VC field [2]. In the process of their oscillations in the NVD, as a result of head-on collisions of a part of protons and boron ions with energies of ~ 100 – 500 keV, a pB reaction occurs with a certain probability. The results of the first demonstration experiments on pB synthesis in a single NVD device were presented recently [2]. The specifics of oscillatory confinement under pB synthesis [2] is that the oscillation periods of boron ions and protons are different due to the difference in their masses and charges. On average, the registered yield of α -particles was about 250 α -particles per shot (≈ 1 J, voltage pulse $U \approx 100$ kV, duration $\tau \approx 20$ ns) [2]. With the improved geometry of the electrodes, we should get at least $\sim 10^3/4\pi$ α -particles per one shot. PiC modeling of pB synthesis processes showed that plasma in the NVD, and especially on the discharge axis, is in a state close to quasineutral one, which significantly differs from the well-known scheme of periodically oscillating plasma spheres (POPS) proposed earlier for nuclear fusion [3]. In contrast to the coherent compressions in the original POPS scheme, it seems that small-scale oscillations in the NVD are a consequence of resonant ion heating. Unlike the POPS scheme, PiC modeling also reveals that the energy distribution functions of protons and boron ions are non-Maxwellian. Thus, in NVD we have periodic both DD and aneutronic pB synthesis in a nonequilibrium plasma remaining “non-ignited” on the discharge axis.

References

1. **Kurilenkov, Yu. K.** Oscillating ions under Inertial Electrostatic Confinement (IEC) based on nanosecond vacuum discharge [Text] / Yu. K. Kurilenkov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, A. V. Oginov, V. T. Karpukhin // Contrib. Plasma Phys. – 2018. – Vol. 58 – P. 952–961. DOI: 10.1002/ctpp.201700188.
2. **Kurilenkov, Yu. K.** Proton-boron fusion in a compact scheme of plasma oscillatory confinement [Text] / Yu. K. Kurilenkov, A. V. Oginov, V. P. Tarakanov, S. Yu. Gus'kov, I. S. Samoylov // Phys. Rev. E. – 2021. – Vol. 103. – P. 043208. DOI: 10.1103/PhysRevE.103.043208.
3. **Evstatiev, E. G.** Space charge neutralization in inertial electrostatic confinement plasmas [Text] / E. G. Evstatiev, R. A. Nebel, L. Chacón, J. Park, G. Lapenta // Phys. Plasmas. – 2007. – Vol. 14. – P. 042701. DOI: 10.1063/1.2711173.

МОДЕЛИРОВАНИЕ СИСТЕМЫ ОБРАЩЕНИЯ С ОЯТ НА ПЛАТФОРМЕ АТЭК

И. Р. Макеева, Н. Д. Дырда, Д. В. Хмельницкий, Л. Р. Файрушина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Развитие ядерной энергетики (ЯЭ) в России в настоящее время ориентировано на двухкомпонентную структуру, сочетающую в себе реакторы на тепловых и быстрых нейтронах. Это подразумевает организацию замыкания ядерного топливного цикла (ЗЯТЦ) и оптимизацию обращения с радиоактивными отходами (РАО). Основными задачами развития ЯЭ является сокращение объемов отработавшего ядерного топлива (ОЯТ), находящегося на временном хранении, отказ от хранения плутония путем вовлечения его в топливный цикл, решение вопроса обращения с минорными актинидами, минимизация объемов глубинного захоронения РАО.

В настоящее время рассматривается несколько вариантов реализации ЗЯТЦ, включающие сооружение новых производств по переработке ОЯТ, а также возможность трансмутации минорных актинидов в жидкосолевых реакторах (ЖСР) или в реакторах на быстрых нейтронах (РБН). Комплекс технологий ЗЯТЦ непременно должен включать технологии иммобилизации РАО в формы, пригодные для окончательной изоляции. Объемы РАО, требующие глубинного захоронения, зависят от таких технологических параметров, как степень очистки продуктов деления (ПД) от актинидов, длительность предварительной выдержки РАО перед иммобилизацией в матрицу, способы фракционирования РАО и т. п.

С 2008 г. в РФЯЦ – ВНИИТФ на программной платформе АТЭК [1, 2] развивается семейство программных комплексов, предназначенных для решения разноуровневых и разноплановых задач, связанных с развитием технологий ядерно-энергетической отрасли на основе унифицированного подхода и с использованием единых баз данных. Это позволяет моделировать как сценарные варианты развития ЯЭ, так и характеристики технологических процессов и производств. В докладе рассматриваются основные варианты замыкания ядерного топливного цикла, оцениваются балансы делящихся материалов и минорных актинидов, объемы и радиационные характеристики образующихся РАО, потребности в производственных мощностях по переработке ОЯТ и фабрикации свежего топлива.

Литература

1. Дырда, Н. Д. Программные комплексы технико-экономического моделирования ядерно-энергетических систем: текущее состояние и перспективы развития [Текст] / Н. Д. Дырда, И. Р. Макеева и др. // Атомная энергия. – 2020. – Т. 128, № 6. – С. 344–353.
2. Макеева, И. Р. Моделирование технологических переделов ЗЯТЦ. Обзор возможностей РФЯЦ – ВНИИТФ [Текст] / И. Р. Макеева, В. А. Симоненко, В. П. Соколов // Всероссийская конференция НИЯУ МИФИ «Научная сессия НИЯУ МИФИ – 2019» по направлению «Инновационные ядерные технологии – 2019»: сборник научных трудов. – Снежинск : НИЯУ МИФИ, 2019. – С. 72–75.

SIMULATION OF THE SNF MANAGEMENT SYSTEM ON ATEC PLATFORM

I. R. Makeeva, N. D. Dyrda, D. V. Khmelnitskiy, L. R. Fayrushina

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

At present the development of nuclear power engineering (NPE) in Russian Federation is directed at two-component structure combining thermal and fast reactors. It means providing the closure of nuclear fuel

cycle (CNFC) and the optimization of radioactive waste (RAW) handling. The main tasks of NPE development are the reduction of nuclear spent fuel (NSF) volumes remaining on temporary storing, the refusal of plutonium storage by means of its implication into the fuel cycle, solving the problem of handling minor actinides, the minimization of deep RAW disposal.

Currently, several variants of CNFC realization are under consideration, which include constructing new manufactures for reprocessing NSF and also the possibility for transmutation of minor actinides in molten-salt reactors or fast reactors (FR). Complex of CNFC technologies must certainly include the technologies of immobilizing of RAW into forms suitable for final isolation. The volumes of RAW requiring deep burial depend on such technological parameters as purification rate of fission products from actinides, the duration of preliminary ageing RAW prior to immobilization into matrix, methods of RAW fractioning, etc..

Since 2008 in VNIITF the system of program codes has been being developed on the base of program platform ATEK designed for solving multifaceted and multileveled tasks connected with the development of technologies of nuclear power sector on the basis of unified approach and using uniform data base. It makes it possible to simulate both scenario variants of NPE development and characteristics of technological processes and manufactures. The report considers the main scenarios of NFC closure, assesses the balances of fissile materials and minor actinides, the volumes and radiation characteristics of generated RAW, requirements in production capacities for reprocessing SNF and fabricating fresh fuel.

References

1. **Dyrda, N. D.** The Program Complexes for Techno-economical Simulation of Nuclear Energetic Systems: Current State and Prospects of Development [Text]. / N. D. Dyrda, I. R. Makeeva et al. // Nuclear Energy. – 2020. – Vol. 128, Iss. 6. – P. 344–353.
2. **Makeeva, I. R.** Modeling Technological Stages of CNFC. Review of RFNC – VNIITF Potentialities [Text] / I. R. Makeeva, V. A. Simonenko, V. P. Sokolov // Scientific Session SRNU МЕРФИ – 2019. Sector Innovation Nuclear Technologies. – Snezhinsk : NRNU МЕРФИ, 2019. – P. 72–75.

5-12

РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КИСЛОРОДА МЕТОДОМ ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПЛАВЛЕНИЯ ВО FLiNaK

А. А. Масленникова, П. Н. Мушников, Ю. П. Зайков

Институт высокотемпературной электрохимии ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

На сегодняшний день интерес к ЖСР стремительно возрос, что связано, в первую очередь, с рядом преимуществ с точки зрения трансмутации минорных актинидов [1]. Перспективным топливным расплавом для ЖСР считается расплав FLiNaK, поскольку является стабильным в условиях функционирования реактора и обладает способностью к растворению значительных количеств фторидов делящихся материалов. Контроль кислородных примесей в расплаве FLiNaK и разработка методик их определения представляет большой интерес для выбора конструкционных материалов и их коррозионной стойкости.

В этих целях может быть использован метод восстановительного плавления, основанный на взаимодействии кислорода пробы с углеродом тигля при высоких температурах с образованием углекислого газа, который выносится потоком инертного газа-носителя на недисперсионный ИК-детектор [2]. Работы по определению кислорода в солевых системах крайне ограничены [3–5], поскольку в классическом исполнении данный метод предназначен для определения кислорода в керамике и сталях и при анализе солей возникает ряд таких проблем, как отсутствие соответствующих стандартных образцов, летучесть и гигроскопичность анализируемых солей.

Для приспособления данного метода к анализу фторидных солевых систем, а также для расширения рабочего концентрационного диапазона, в том числе и для определения низких concentra-

ций (десятков ppm), необходимо было внедрить некоторые дополнения в классическое аппаратное оформление метода. Чтобы обеспечить защиту составляющих прибора от возгонов расплавленных фторидов из реакционного тигля во время проведения анализа, в частности, предотвращение попадания фторидсодержащих соединений на оптический фильтр в окне ИК-датчика, его помутнение и потерю или ухудшение пропускающей способности излучения, а также для устранения потерь кислорода в виде CO, классическое аппаратное оформление анализатора кислорода МЕТАВАК-К было частично изменено, с учетом всех особенностей при анализе фторидных систем.

Модифицированное оборудование позволило разработать и верифицировать методику определения кислорода во фторидных расплавах FLiNaK, которая обеспечивает удовлетворительными концентрационными и метрологическими показателями, в том числе относительной точности.

Литература

1. **Пономарев, Л. И.** Быстрый жидкосольевой реактор на основе эвтектики LiF-NaF-KF как сжигатель Np, Am, Cm [Текст] / Л. И. Пономарев, М. Н. Белоногов и др. // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126, № 3. – С. 123–135.
2. **Вассерман, А. М.** Определение газов в металлах. Метод восстановительного плавления в атмосфере газа-носителя [Текст]. – М. : Наука, 1976.
3. **Shen, M.** Use of square wave voltammeter for online monitoring of O²⁻ concentration in molten fluorides at 600°C [Text] / M. Shen, H. Peng, M. Ge, Y. Zuo et al. // J. of Electroanalytical Chemistry. – 2015. – Vol. 748. – P. 34–39.
4. **Mediaas, H.** Solubility of MgO in mixed chloride–fluoride melts containing MgF₂ [Text] / H. Mediaas, J. E. Vindstad, T. Ostvold // Acta Chemica Scandinavica. – 1997. – Vol. 51. – P. 504–514.
5. **Massot, L.** On the use of electrochemical techniques to monitor free oxide content in molten fluoride media [Text] / L. Massot, L. Cassayre, P. Chamelot, P. Taxil // J. Electroanal. Chem. – 2007. – Vol. 606. – P. 17–23.

DEVELOPMENT OF THE TECHNIQUE FOR DETERMINATION OF OXYGEN CONCENTRATION IN FLiNaK BY THE METHOD OF REDUCTION MELTING

A. A. Maslenikova, P. N. Mushnikov, Yu. P. Zaikov

Institute of High Temperature Electrochemistry IHTE UB RAS, Ekaterinburg, Russia

Nowadays the interest in the molten salt reactors (MSRs) has escalated, which is, firstly, associated with a number of advantages considering the transmutation of minor actinides [1]. FLiNaK is a promising fuel melt for MSRs, due to its stability under the operating conditions and ability to dissolve sufficient number of fission materials fluorides. The control over the oxygen admixtures in the FLiNaK melt and development of techniques for their determination are important for the choice of construction materials and their corrosion stability.

The reduction melting, that is based on the interaction between oxygen of the sample and carbon of the crucible at high temperatures resulting in the formation of carbon dioxide, which is carried off by the bearing inert gas flow to the non-dispersion IR-sensor [2], may be used to measure the oxygen content in FLiNaK. There is a limited number of papers on the determination of oxygen concentration in molten salts [3–5], because initially this method was used to determine oxygen content in ceramics and steels. Such problems as absence of the corresponding standard samples, volatility and hygroscopic properties of the analyzed salts usually appear during the molten salts analysis.

To adapt this method to the analysis of fluoride salt systems, as well as to expand the working concentration range, including the determination of low concentrations (tens of ppm), it was necessary to introduce some additions to the classical instrumentation of the method. In order to protect the components of the device from sublimations of molten fluorides from the reaction crucible during the analysis, in particular, to prevent fluoride-containing compounds from getting on the optical filter in the IR sensor window, its

clouding and loss or deterioration of the radiation transmittance, as well as to eliminate oxygen losses in the form of CO, the classic instrumentation of the METAVAK-K oxygen analyzer was partially changed, taking into account all the features in the analysis of fluoride systems.

The modified equipment made it possible to develop and verify the method for determining oxygen in fluoride melts FLiNaK, which provides satisfactory concentration and metrological indicators, including relative accuracy.

References

1. **Ponomarev, L. I.** Fast molten-salt reactor based on the LiF-NaF-KF eutectic as a burner for Np, Am, Cm [Text] / L. I. Ponomarev, M. N. Belonogov et al. // *Atom.* – 2019. – Vol. 126, No. 3. – P. 123–135.
2. **Vasserman, A. M.** Determination of gases in metals. Method of reduction melting in the atmosphere of the bearing gas (Opredeleniye gazov v metallakh. Metod vosstanovitel'nogo plavleniya v atmosfere gaza-nositely) [Text]. – M.: Nauka, 1976.
3. **Shen, M.** Use of square wave voltammeter for online monitoring of O²⁻ concentration in molten fluorides at 600°C [Text] / M. Shen, H. Peng, M. Ge, Y. Zuo et al. // *J. of Electroanalytical Chemistry.* – 2015. – Vol. 748. – P. 34–39.
4. **Mediaas, H.** Solubility of MgO in mixed chloride–fluoride melts containing MgF₂ [Text] / H. Mediaas, J. E. Vindstad, T. Ostvold // *Acta Chemica Scandinavica.* – 1997. – Vol. 51. – P. 504–514.
5. **Massot, L.** On the use of electrochemical techniques to monitor free oxide content in molten fluoride media [Text] / L. Massot, L. Cassayre, P. Chamelot, P. Taxil // *J. Electroanal. Chem.* – 2007. – Vol. 606. – P. 17–23.

5-13

ОЧИСТКА РАСПЛАВА FLiNaK ОТ КИСЛОРОДСОДЕРЖАЩИХ ПРИМЕСЕЙ И ОНЛАЙН МОНИТОРИНГ ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ

П. Н. Мушников, К. Р. Каримов, К. Е. Селеверстов, А. А. Масленникова, Ю. П. Зайков

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

Присутствие кислородсодержащих примесей в топливной соли и теплоносителе ЖСР могут оказывать значительное влияние на коррозию конструкционных материалов и фазовый состав расплава, что обуславливает жесткие требования по их количественному содержанию. Определение концентрации кислородсодержащих примесей во фторидных расплавах является важной научной задачей ввиду отсутствия на настоящий момент достаточного количества достоверных экспериментальных данных и аттестованных методик.

Принцип электрохимического определения кислородсодержащих примесей и очистка расплава от них основана на возможности анодного выделения кислорода на инертном электроде [1]. Позднее была показана возможность количественного анализа содержания ионов кислорода в расплаве методом квадратноволновой вольтамперометрии [2, 3]. При этом минимальное определенное содержание кислородных примесей в расплаве FLiNaK составило 49 ppm. Целью настоящей работы было получение расплава с минимальной концентрацией кислородсодержащих примесей и их количественная оценка.

Анализ проводили методом квадратноволновой вольтамперометрии (рис 1, а), для определения количественного содержания строили градуировочную зависимость тока пика (рис 1, б), соответствующего процессу окисления кислорода, от содержания кислородных примесей, которое задавали путем введения определенных навесок оксида лития в расплав.

Таким образом был получен расплав FLiNaK с остаточным содержанием кислорода не более 3 ppm и была показана принципиальная возможность количественного анализа электрохимическим методом содержания кислородных примесей в диапазоне концентраций от единиц до 100 ppm.

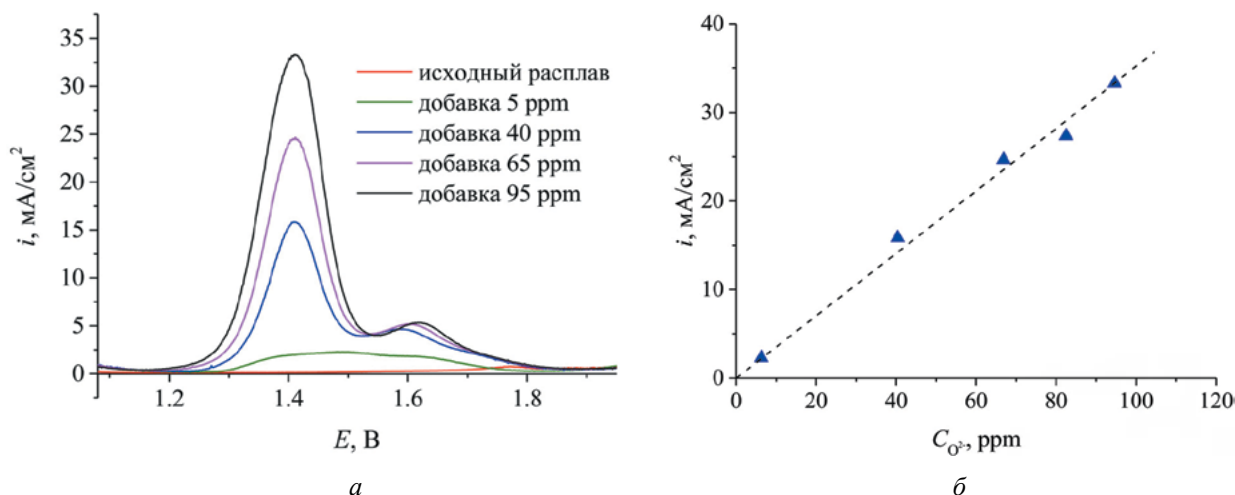


Рис. 1. Квадратноволновые вольтамперограммы расплава FLiNaK (а) и градуировочная зависимость тока пика от содержания кислородных примесей (б)

Литература

1. **Manning, D. L.** Electrochemical studies of oxide ions and related species in molten fluorides [Текст] / D. L. Manning, Mamantov G. // Journal of The Electrochemical Society. – 1977. – Т. 124, №. 4. – С. 480.
2. **Massot, L.** On the use of electrochemical techniques to monitor free oxide content in molten fluoride media [Text] / L. Massot et al. // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2007. – Т. 606, №. 1. – С. 17–23.
3. **Shen, M.** Use of square wave voltammeter for online monitoring of O^{2-} concentration in molten fluorides at 600°C [Text] / M. Shen et al. // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2015. – Т. 748. – С. 34–39.

PURIFICATION OF FLiNaK MELT FROM OXYGEN-CONTAINING IMPURITIES AND ONLINE MONITORING CONCENTRATION

P. N. Mushnikov, K. R. Karimov, K. E. Seleverstov, A. A. Maslenikova, Yu. P. Zaikov

Institute of High Temperature Electrochemistry UB RAS, Yekaterinburg, Russian Federation

The presence of oxygen-containing impurities in the fuel salt and coolant of the MSR can have a significant effect on the corrosion of structural materials and phase composition of the melt, which leads to stringent requirements for their quantitative content. Determining the concentration of oxygen-containing impurities in fluoride melts is an important scientific problem due to the lack of a sufficient amount of reliable experimental data and certified methods.

The principle of electrochemical determination of oxygen-containing impurities and purification of the melt from them is based on the possibility of anodic oxygen evolution on an inert electrode [1]. Later, the possibility of quantitative analysis of the content of oxygen ions in the melt by the method of square-wave voltammetry was shown [2, 3]. In this case, the minimum determined content of oxygen impurities in the FLiNaK melt was 49 ppm. The purpose of this work was to obtain a melt with a minimum concentration of oxygen-containing impurities and to quantify them.

Analysis was performed by square-wave voltammetry (fig. 1, a), to determine the quantitative content we built a graduation dependence of peak current (fig. 1, b), corresponding to the process of oxygen oxidation, on the content of oxygen impurities, which was set by introducing certain suspensions of lithium oxide in the melt.

Thus, the FLiNaK melt with a residual oxygen content not exceeding 3 ppm was obtained and the possibility in principle of quantitative analysis by the electrochemical method of oxygen impurities in the concentration range from units to 100 ppm was demonstrated.

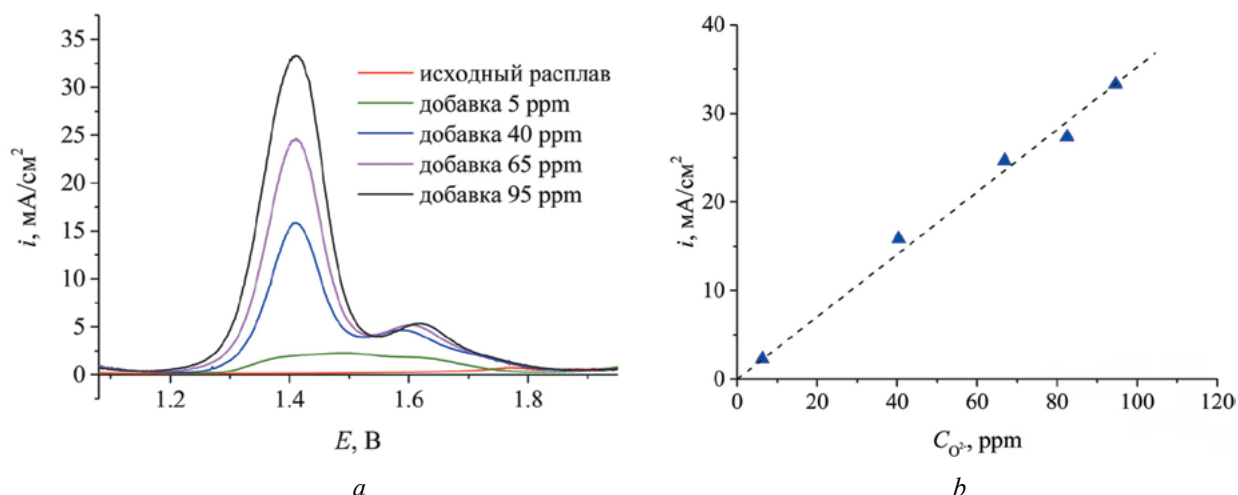


Fig. 1. Square-wave voltammetry patterns of FLiNaK melt (a) and graduation dependence of the peak current on the oxygen impurities content (b)

Reference

1. **Manning, D. L.** Electrochemical studies of oxide ions and related species in molten fluorides [Текст] / D. L. Manning, Mamantov G. // Journal of The Electrochemical Society. – 1977. – Т. 124, №. 4. – С. 480.
2. **Massot, L.** On the use of electrochemical techniques to monitor free oxide content in molten fluoride media [Text] / L. Massot et al. // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2007. – Т. 606, №. 1. – С. 17–23.
3. **Shen, M.** Use of square wave voltammeter for online monitoring of O^{2-} concentration in molten fluorides at 600°C [Text] / M. Shen et al. // Journal of Electroanalytical Chemistry. – 2015. – Т. 748. – С. 34–39.

5-14

ИЗГОТОВЛЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ СТЕКЛОГЕРМЕТИКОВ ДЛЯ СБОРКИ СТЕКОВ ТОТЭ И ТОЭ

М. В. Ерпалов^{1,2}, В. А. Никонорова^{1,2}, А. В. Кучугуров^{1,2}, С. Г. Власова², Н. Т. Шардаков²

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина», Екатеринбург, Россия

Стекла и стеклокерамика являются наиболее подходящими материалами для использования в качестве высокотемпературных стеклогерметиков при сборке стеков ТОТЭ и ТОЭ. Это обусловлено возможностью варьирования и адаптации их свойств под конкретные условия эксплуатации [1]. Наиболее важными характеристиками стекол являются линейный коэффициент термического напряжения (ТКЛР), а также температуры стеклования (T_g), размягчения (T_s) и кристаллизации (T_c).

В данной работе рассмотрено два состава стекол (табл. 1): стекло Ф-123, применяемое при сборке стеков ТОТЭ трубчатой конструкции, и стекло, разработанное компанией SOFCMAN, Китай.

Таблица 1

Химический состав стекол

Название	Химический состав, мас. %											
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SrO	BaO	MgO	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO
Ф-123	34,50	3,10	0,04	–	<0,01	10,38	16,6	33,4	<0,01	–	<0,1	2
SOFCMAN	49,56	14,11	13,66	0,81	0,21	19,13	0,31	–	1,99	0,22	–	–

В качестве исходных материалов использовались оксиды и карбонаты соответствующих катионов. Расчет шихты осуществлялся с учетом потерь массы компонентов при прокаливании. Шихту подвергали предварительному перемешиванию в шаровой мельнице с использованием изопропилового спирта. Варка стекол осуществлялась в корундовых тиглях при температуре 1400°C с выдержкой 2 часа в шахтной печи с силитовыми нагревателями. Скорость нагрева составляла 5°C/мин. Разливка стекла осуществлялась в предварительно разогретую графитовую форму.

На подготовленных образцах были определены ТКЛР на механическом dilatометре с кварцевой ячейкой, а также температуры стеклования и размягчения. Предварительно образцы подвергались отжигу для снятия напряжений. Оценка остаточных напряжений осуществлялась с помощью полярископ-поляриметра ПСК-250М. Результаты измерения относительных удлинений образцов представлены на рис. 1. Результаты расчета ТКЛР и характеристические температуры стекол представлены в табл. 2. Согласно таблице 2 стекло состава Ф-123 имеет характеристики более близкие к предъявляемым требованиям.

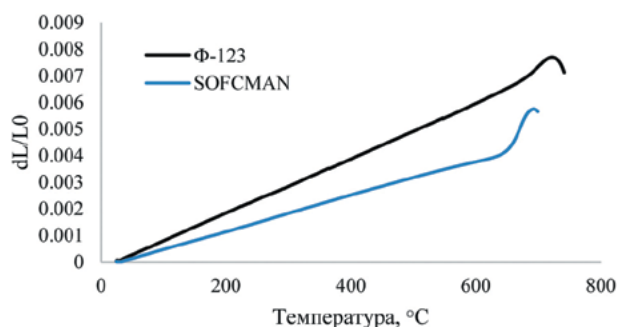


Рис. 1. Кривая изменения относительного удлинения стекол в зависимости от температуры

Таблица 2

ТКЛР и характеристические температуры стекол

Название	ТКЛР, град ⁻¹	T_g , °C	T_f , °C
Ф-123	$10 \cdot 10^{-6}$	676	722
SOFCMAN	$6,7 \cdot 10^{-6}$	653	692

Исследование влияния температуры на кристаллизационную способность стекла состава Ф-123 осуществлялось с помощью градиентной печи и дифференциальном сканирующего калориметра. Установлено, что средняя температура начала кристаллизации составляет 790°C (рис. 2).

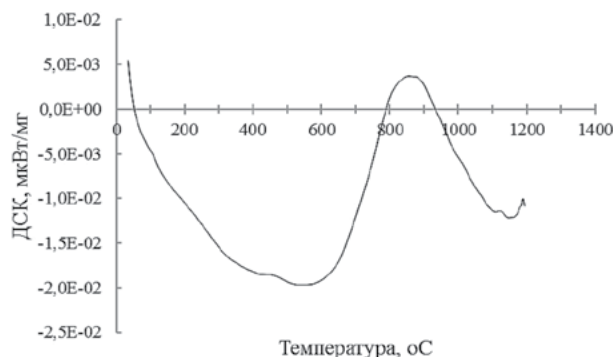


Рис. 2. Температурные эффекты стекла Ф-123

Литература

1. **Baino, F.** Ceramics, Glass and Glass-Ceramics [Text] / F. Baino, M. Tomalino, D. Tulyaganov // Springer Nature. – 2021. – P. 343.

MANUFACTURING AND RESEARCHING PROPERTIES OF GLASS SEALANTS FOR THE SOFC AND SOC STACKS ASSEMBLY

M. V. Erpalov^{1,2}, V. A. Nikonorova^{1,2}, A. V. Kuchugurov^{1,2}, S. G. Vlasova², N. T. Shardakov²

¹Institute of High Temperature Electrochemistry, Yekaterinburg, Russia

²Ural Federal University, Yekaterinburg, Russia

Glasses and glass-ceramics are the most suitable materials for use as high-temperature glass sealants in the SOFC and SOC stacks assembly due to the possibility of varying and adapting their properties to specific operating conditions [1]. The most important characteristics of glasses are the coefficient of thermal expansion (CTE), as well as the glass transition temperatures (T_g), softening (T_s) and crystallization (T_c).

This paper is focused on two compositions of glasses (tabl. 1): F-123 glass used in the assembly of SOFC stacks of tubular construction, and glass developed by SOFCMAN, China.

Table 1

Chemical composition of glasses

Title	Chemical composition, wt. %											
	SiO ₂	B ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	SrO	BaO	MgO	ZrO ₂	Fe ₂ O ₃	ZnO
F-123	34.50	3.10	0.04	–	<0.01	10.38	16.6	33.4	<0.01	–	<0.1	2
SOFCMAN	49.56	14.11	13.66	0.81	0.21	19.13	0.31	–	1.99	0.22	–	–

Oxides and carbonates of the corresponding cations were used as starting materials. The calculation of the charge was carried out accordingly the mass loss of the components during calcination. The charge was subjected to preliminary mixing in a ball mill using isopropyl alcohol. The glass was pulpifying in corundum crucibles at a temperature of 1400°C with an exposure of 2 hours in a shaft furnace with silite heaters, the heating rate was 5°C/min. The glass was poured into a preheated graphite mold.

The prepared samples were used to determine the CTE on a mechanical dilatometer with a quartz cell, as well as the glass transition and softening temperatures. Removal of the samples strains was annealed preliminarily. The residual stresses were evaluated using a polariscope-polarimeter PSK-250M. The results of measuring the relative elongations of the samples are shown in fig. 1. The calculation results of the CTE and the temperature characteristics of the glasses are presented in tabl. 2. According to tabl. 2, the glass of the composition F-123 has characteristics closer to the requirements.

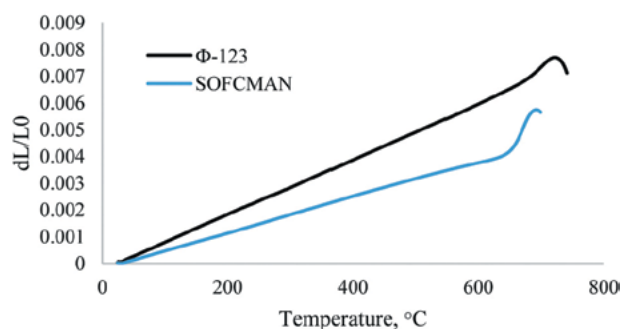


Fig. 1. The curve of change in the relative elongation of glasses depending on temperature

Table 2

CTE and characteristic glass temperatures

Title	CTE, grad ⁻¹	T_g , °C	T_s , °C
F-123	$10 \cdot 10^{-6}$	676	722
SOFCMAN	$6,7 \cdot 10^{-6}$	653	692

Analyzing the influence of temperature on the crystallization ability of glass of the composition F-123 was carried out using a gradient furnace and a differential scanning calorimeter. It is established that the average temperature of the beginning of crystallization is 790°C (fig. 2).

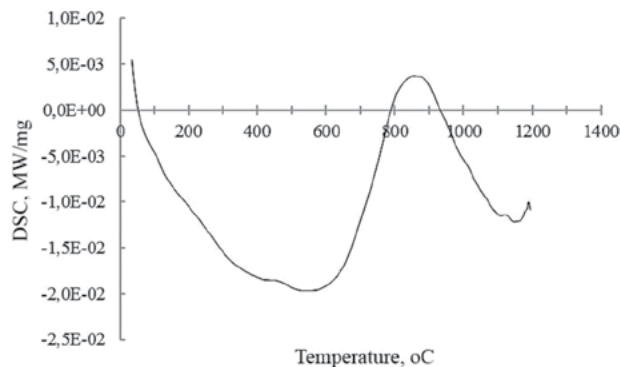


Fig. 2. Temperature effects of glass F-123

References

1. **Baino, F.** Ceramics, Glass and Glass-Ceramics [Text] / F. Baino, M. Tomalino, D. Tulyaganov // Springer Nature. – 2021. – P. 343.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ МЕТОДОВ СПЕКТРОСКОПИИ ЯМР ПРИ ИССЛЕДОВАНИИ МОНОНИТРИДА УРАНА

В. В. Оглобличев¹, Ю. В. Пискунов¹, А. М. Потапов²

¹Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

E-mail: ogloblichev@imp.uran.ru

Материалы на базе актинидов представляют особый интерес, как с практической точки зрения, так и для фундаментальной науки в связи с широким многообразием экзотических свойств и явлений, наблюдаемых в данных объектах. Построение теоретических моделей описания электронного строения таких соединений является актуальной и сложной задачей.

Успешное детектирование сигнала ядерного магнитного резонанса (ЯМР) на ядре ^{14}N в образцах мононитрида урана (UN) показало крайне высокую чувствительность метода для решения вопросов координационной химии и фазового состава [1, 2, 3]. В зависимости от состояния актинидного вещества меняются параметры ЯМР: сдвиг линии ЯМР на ядре ^{14}N (рис. 1), времена спин-спиновой и спин-решеточной релаксации. Другими словами, выяснение особенностей электронной структуры актинида позволяет диагностировать структурное состояние мононитрида урана в процессе синтеза, хранения и радиационного старения. Несомненным достоинством метода ЯМР является объемный характер данных о структурном состоянии исследуемых актинидных материалов.

Методами ЯМР на ядре ^{14}N также исследован магнитный порядок и спиновая динамика $5f$ электронов урана [1, 2, 3]. Показано, что спектры ЯМР на ядре ^{14}N в магнитоупорядоченной фазе объясняются в рамках модели антиферромагнитного упорядочения типа I, соответствующего $1k$ -структуре при наличии доменной структуры. Установлено, что в магнитном поле 92,8 кЭ наблюдается разный объем доменов, в которых магнитные моменты урана лежат вдоль и перпендикулярно направлению магнитного поля. Обнаружено, что при низких температурах скорость спин-решеточной релаксации описывается законом Корринги. Это свидетельствует о формировании ферми-жидкостного

состояния. Показано, что в парамагнитной области зависимость энергии спиновых флуктуация близка к зависимости $\Gamma(T) \propto T^{0.5}$, характерной для концентрированных систем Кондо выше температуры формирования когерентного состояния. Полученные в работе данные, крайне важны для объяснения магнитных и транспортных свойства соединений на основе f -электронных элементов.

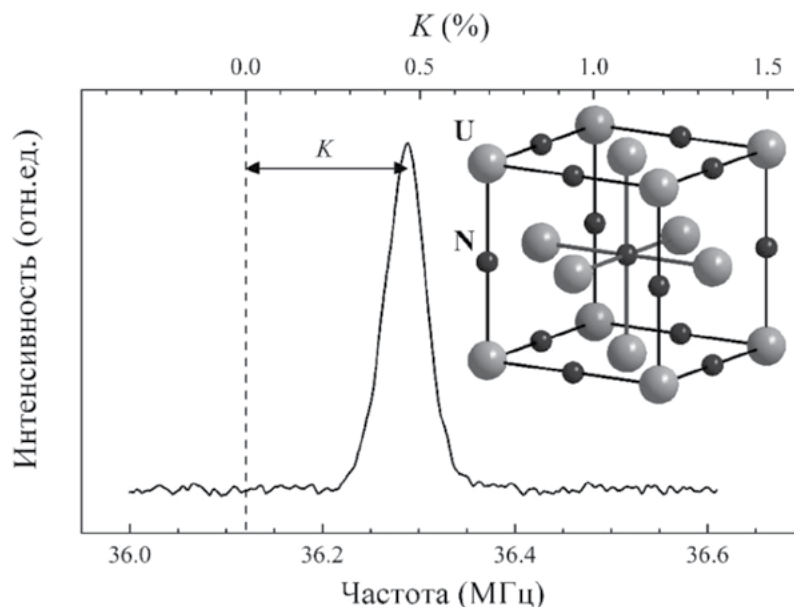


Рис. 1. Спектр ЯМР на ядре ^{14}N в UN при температуре $T = 295$ К во внешнем магнитном поле $H_0 = 117,5$ кЭ.

На вставке – кристаллическая структура мононитрида урана

Работа выполняется в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Функция», № 122021000035-6).

Литература

1. **Ogloblichev, V. V.** $5f$ -electron magnetism in single crystal UN probed by ^{14}N NMR [Text] / V. V. Ogloblichev, S. V. Verkhovskii, A. V. Mirmelstein, Y. V. Piskunov, A. Y. Germov, A. M. Potapov et al. // *Physical Review B*. – 2021. – Vol. 104. – P. 155148–155159.
2. **Ogloblichev, V. V.** Spin fluctuations of the uranium $5f$ -electrons in UN according to ^{14}N NMR data [Text] / V. V. Ogloblichev, S. V. Verkhovskii, A. M. Potapov, A. Yu. Germov, A. F. Sadykov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1389. – P. 12082–12086.
3. **Оглобличев, В. В.** Ядерный магнитный резонанс и релаксация ^{14}N в парамагнитной области мононитрида урана [Текст] / В. В. Оглобличев, А. М. Потапов, С. В. Верховский, А. В. Мирмельштейн // *Письма в ЖЭТФ*. – 2018. – Т. 108. – С. 650 – 656.

RESULTS AND PERSPECTIVES OF NMR SPECTROSCOPY METHODS IN STUDYING URANIUM MONONITRIDE

V. V. Ogloblichev¹, Y. V. Piskunov¹, A. M. Potapov²

¹M. N. Mikheev Institute of Metal Physics of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

²Institute of High-Temperature Electrochemistry of Ural Branch of Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

E-mail: ogloblichev@imp.uran.ru

Actinide-based materials are of particular interest, both from a practical point of view and for fundamental science, due to the wide variety of exotic properties and phenomena observed in these objects. The construction of theoretical models for describing the electronic structure of such compounds is an urgent and complex task.

Successful detection of the nuclear magnetic resonance (NMR) signal at the ^{14}N nucleus in uranium mononitride (UN) samples showed the extremely high sensitivity of the method for solving problems of coordination chemistry and phase composition [1, 2, 3]. Depending on the state of the actinide substance, the NMR parameters change: the shift of the NMR line at the ^{14}N nucleus, the times of spin-spin and spin-lattice relaxation (fig. 1). In other words, elucidation of the features of the electronic structure of actinide makes it possible to diagnose the structural state of uranium mononitride during synthesis, storage, and radiation aging. An undoubted advantage of the NMR method is the voluminous character of data on the structural state of the studied actinide materials.

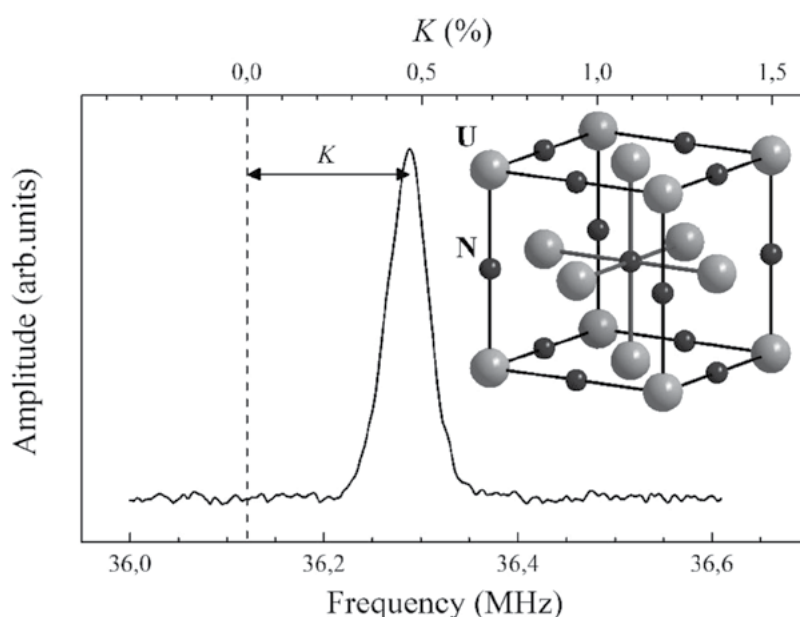


Fig. 1. NMR spectrum on the ^{14}N nucleus in UN at a temperature $T = 295$ K in an external magnetic field $H_0 = 117.5$ kOe.

Inset: crystal structure of uranium mononitride

The magnetic order and spin dynamics of the $5f$ electrons of uranium have also been studied by NMR methods on the ^{14}N nucleus [1, 2, 3]. It is shown that the NMR spectra on the ^{14}N nucleus in the magnetically ordered phase are explained in terms of the model of type I antiferromagnetic ordering corresponding to the $1k$ structure in the presence of a domain structure. It has been established that in a magnetic field of 92.8 kOe, different volumes of domains are observed, in which the magnetic moments of uranium lie along and perpendicular to the direction of the magnetic field. It is found that at low temperatures the rate of spin-lattice relaxation is described by the Korringa law. This indicates the formation of a Fermi-liquid state. It is shown that, in the paramagnetic region, the dependence of the energy of spin fluctuations is close to the dependence $\Gamma(T) \propto T^{0.5}$, which is characteristic of concentrated Kondo systems above the coherent state formation temperature. The data obtained in the work are extremely important for explaining the magnetic and transport properties of compounds based on f -electronic elements.

The research is carried out within the state assignment of Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme "Function" No. 122021000035-6).

References

1. **Ogloblichev, V. V.** *5f*-electron magnetism in single crystal UN probed by ^{14}N NMR [Text] / V. V. Ogloblichev, S. V. Verkhovskii, A. V. Mirmelstein, Y. V. Piskunov, A. Y. Germov, A. M. Potapov et al. // *Physical Review B*. – 2021. – Vol. 104. – P. 155148–155159.
2. **Ogloblichev, V. V.** Spin fluctuations of the uranium *5f*-electrons in UN according to ^{14}N NMR data [Text] / V. V. Ogloblichev, S. V. Verkhovskii, A. M. Potapov, A. Yu. Germov, A. F. Sadykov // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – Vol. 1389. – P. 12082–12086.
3. **Ogloblichev, V. V.** ^{14}N nuclear magnetic resonance and relaxation in the paramagnetic region of uranium mononitride [Text] / V. V. Ogloblichev, A. M. Potapov, S. V. Verkhovskii, A. V. Mirmelstein // *JETP Letters*. – 2018. – Vol. 108. – P. 616–622.

5-16

АНАЛИЗ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ ПРИ ГОРЕНИИ ВОДОРОДА ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КИНЕТИЧЕСКИХ СХЕМ

Е. Е. Пугасов^{1,2}, М. С. Жарылканова², Ю. М. Ковалев²

¹ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

²ФГАОУВО «Южно-Уральский государственный университет (НИУ)», Челябинск, Россия

Несмотря на то, что реакции окисления (горения) водорода имеют очень широкое применение в практических целях, что отражено в достаточно большом количестве публикаций, разработка кинетических схем горения водорода является актуальной и в настоящее время [1, 2]. С другой стороны, включение в газодинамические расчеты химической кинетики при анализе процессов перехода горения во взрыв приводит к значительному увеличению времени счета программы. Основными параметрами, характеризующими реагирующую смесь водорода с кислородом, являются адиабатический период индукции и энерговыделение, расчет которых был рассмотрен в данной работе для различных кинетических механизмов окисления водорода.

Рассмотрим адиабатический реактор – реактор, в котором отсутствует всякий тепло- и массообмен с окружающей средой, следовательно, все тепло, получаемое в ходе экзотермических реакций окисления идет на разогрев системы. В таком реакторе тепловой взрыв происходит при любых начальных условиях. Отрезок времени от начала процесса до момента резкого увеличения температуры носит название адиабатического периода индукции (задержка воспламенения). В замкнутом адиабатическом реакторе постоянного объема находится смесь газов переменного состава, участвующих в элементарных химических реакциях. В начальный момент заданы состав, температура и давление смеси. Градиенты величин отсутствуют. В работе [2] был подробно описан подход к построению системы обыкновенных дифференциальных уравнений, для определения периода индукции.

В качестве анализируемых кинетических схем воспламенения водород – кислородной смеси выбраны модели на основе 16 реакций (8 обратимых реакций, 6 компонентов) [3], а также два одностадийных механизма [4]: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$, где константы скорости:

- для одностадийной реакции 1: $k_1 = 2,14 \cdot 10^8 \exp\left(-\frac{129\,000}{RT}\right)$, $[k] = \frac{\text{м}^3}{\text{моль} \cdot \text{с}}$, $[E] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$;
- для одностадийной реакции 2: $k_2 = 2,96 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{6900}{RT}\right)$, $[k] = \frac{\text{м}^3}{\text{моль} \cdot \text{с}}$, $[E] = \frac{\text{Дж}}{\text{моль}}$.

Проведенные в работе расчеты показали, что все три механизма химического превращения в водород-кислородной смеси дают разные значения температур равновесного состояния. Одностадийные кинетические схемы дают значительно завышенные значения температур в состоянии равновесия

и при расчетах газодинамических процессов с химическими превращениями не могут быть использованы без дополнительной модификации. Применение кинетической схемы [3] требует дополнительного анализа и сравнения с более сложными кинетическими схемами.

Литература

1. **Рябинин, В. К.** Математическое моделирование адиабатического периода индукции для метан-кислородных смесей в широком диапазоне начальных давлений и температур [Текст] / В. К. Рябинин, Ю. М. Ковалев // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование. – 2013. – Т. 6, № 1. – С. 56–71.
2. **Пигасов, Е. Е.** Математическое моделирование адиабатического теплового взрыва для реакции окисления водорода [Текст] / Е. Е. Пигасов, В. К. Рябинин, Ю. М. Ковалев // Вестн. ЮУрГУ. Сер. Матем. моделирование и программирование. – 2013. – Т. 6, № 3. – С. 130–135
3. **Бабушок, В. И.** Тестовые примеры моделирования кинетики сложных реакций [Текст] / В. И. Бабушок, А. Н. Дакданча // ФГВ. – 1993. – № 4. – С. 48–80.
4. **Бабушок, В. И.** Глобальные кинетические параметры для высокотемпературных газофазных реакций [Текст] / В. И. Бабушок, А. Н. Дакданча. – Красноярск, 1990.

ANALISE OF HEAT RELEASE BY HYDROGEN COMBUSTION FOR A DIFFERENT KINETIC SCHEMAS

E. E. Pigasov^{1,2}, M. S. Zharlykhanova², Y. M. Kovalev²

¹FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

²South Ural State University (National Research University), Chelyabinsk, Russia

Although the reactions of hydrogen oxidation (combustion) have wide practical application, that is represented in a great number of papers, the development of kinetic schemas for hydrogen oxidation is relevant problem [1, 2]. On the other hand, the inclusion of chemical kinetics in gas-dynamic calculations on analyze of combustion to explosion transition process, result in significant increase of computation time. The main parameters to reacting hydrogen-oxygen mixture description is the combustion delay and the heat release, which calculations for different kinetic mechanisms is a subject of this paper.

Consider an adiabatic reactor – a reactor in which there is no heat and mass exchange with the environment, therefore all the heat, produced by exothermal reactions, expending in warming-up of a system. In that case thermal explosion take place under any initial conditions. Duration from process start time until temperature sharp increase moment is termed ignition delay. Closed adiabatic constant volume reactor contains a variable composition gas mixture, which involved in elementary chemical reactions. At the initial moment, the composition of the mixture, temperature and pressure are given. No magnitude gradients. In [2], the approach to constructing a system of ordinary differential equations was described in detail to determine the ignition delay.

Models based on 16 reactions (8 reversible reactions, 6 components) [3], as well as two single-stage mechanisms [4] were chosen as the analyzed kinetic mechanisms of ignition of a hydrogen-oxygen mixture: $2\text{H}_2 + \text{O}_2 = 2\text{H}_2\text{O}$, where reaction rate constants:

- for single-stage reaction 1: $k_1 = 2,14 \cdot 10^8 \exp\left(-\frac{129\,000}{RT}\right)$, $[k] = \frac{\text{M}^3}{\text{МОЛЬ} \cdot \text{С}}$, $[E] = \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ}}$;
- for single-stage reaction 2: $k_2 = 2,96 \cdot 10^5 \exp\left(-\frac{6900}{RT}\right)$, $[k] = \frac{\text{M}^3}{\text{МОЛЬ} \cdot \text{С}}$, $[E] = \frac{\text{Дж}}{\text{МОЛЬ}}$.

The calculations carried out in the work showed that all three mechanisms of chemical transformation in a hydrogen-oxygen mixture give different values of the temperatures of the equilibrium state. Single-stage kinetic schemes give significantly overestimated temperatures in the equilibrium state and cannot be used in calculations of gas-dynamic processes with chemical transformations without additional modification.

Application of the kinetic scheme [3] requires additional analysis and comparison with more complex kinetic schemes.

References

1. **Ryabinin, V. K.** Mathematical modeling of adiabatic induction period for methane-oxygen mixtures in wide range of initial pressure and temperature values [Text] / V. K. Ryabinin, Y. M. Kovalev // Bulletin of SUSU. Series Math. Modelling and programing. – 2013. – Vol. 6, No. 1. – P. 56–71.
2. **Pigasov, E. E.** Mathematical modeling of adiabatic induction period for hydrogen oxidation reaction [Text] / E. E. Pigasov, V. K. Ryabinin, Y. M. Kovalev // Bulletin of SUSU. Series Math. Modelling and programing. – 2013. – Vol. 6, No. 3. – P. 130–135
3. **Babushok, V. I.** Test examples of complex reaction kinetics modeling [Text] / V. I. Babushok, A. N. Dakdancha // Combustion and Flame. – 1993. – No. 4. – P. 48–80.
4. **Babushok, V. I.** Global kinetics parameters of high-temperature gas-phase reactions [Text] / V. I. Babushok, A. N. Dakdancha. – Khrasnoyarsk, 1990.

5-17

ЭВОЛЮЦИЯ ДИСЛОКАЦИОННОЙ СТРУКТУРЫ В СТАЛЯХ ПОД ОБЛУЧЕНИЕМ

П. А. Покаташкин

ФГУП «Всероссийский научно-исследовательский институт автоматики им. Н. Л. Духова», Москва,
Россия

Понимание изменения свойств конструкционных материалов под облучением – один из ключевых факторов, необходимых для безопасной работы реакторов. Несмотря на активное развитие методов *in situ* микроскопии, экспериментальными методами все еще не представляется возможным корректно оценивать концентрации очень маленьких дислокационных петель (<1 нм), которые вносят существенный вклад в баланс потоков точечных дефектов, а также влияют на упрочнение.

В рамках данной работы, методом кластерной динамики (МКД) исследуется эволюция дислокационной структуры (дислокационная сетка и дислокационные петли) в сталях под облучением. В основе модели МКД лежит идея описывать микроструктуру материала в рамках сплошной среды с разнообразными скоплениями (кластерами) междоузлий через использование дискретной функции распределения по размеру (числу точечных дефектов). Эволюция данного распределения изучается путем решения уравнений химической кинетики в гомогенной среде.

Следует отметить, что в классических постановках МКД не учитываются экспериментально наблюдаемые процессы взаимодействия элементов дислокационной структуры: а именно коалесценция дислокационных петель и «поглощение» дислокационных петель дислокационной сеткой. В рамках развития метода, реализована модель учета данных процессов. Таким образом, получается корректно отслеживать эволюцию дислокационной структуры, с учетом метода изначальной обработки материала.

STEELS UNDER IRRADIATION: EVOLUTION OF THE DISLOCATION STRUCTURE

P. A. Pokatashkin

Dukhov Research Institute of Automatics, Moscow, Russia

Understanding the evolution of properties in structural materials under irradiation is one of the key factors required for the reactors safety operation. Despite the active implementation of *in situ* microscopy

techniques, it is still not possible to correctly estimate the concentration of small (<1 nm) dislocation loops. Those loops contribute significantly for the balance of point defect fluxes, and they also affect material hardening.

In this work the evolution of the dislocation structure (dislocation network and dislocation loops) in irradiated steels is studied by means of cluster dynamics (CD) methods. The CD model is based on the idea of describing the material's microstructure as a continuous medium with various clusters of self interstitial atoms through the use of a discrete size distribution function (the number of point defects in a cluster). The evolution of this distribution is studied by solving the equations of chemical kinetics in a homogeneous medium.

It should be noted that the classical cluster dynamics models do not take into account interaction between elements of the dislocation structure. It should be noted that coalescence of dislocation loops and "absorption" of dislocation loops by the dislocation network are actively observed during experiments. We present further development of the CD method – a model for accounting the above-discussed processes. Thus, it becomes possible to correctly evaluate the evolution of the dislocation structure, taking into account the method of initial processing of the material.

5-18

ОТГОНКА ЭЛЕКТРОЛИТА НА ОСНОВЕ LiCl–KCl ПРИ ПОНИЖЕННОМ ДАВЛЕНИИ

А. Б. Салюлев¹, А. М. Потанов^{1,2}, В. Ю. Шишкин¹, Ю. П. Зайков¹

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

В настоящее время в нескольких странах разрабатывают различные варианты пирохимических (с использованием расплавленных солей) технологий, которые бы обеспечивали эффективную утилизацию отработавшего ядерного топлива и снижение объемов радиоактивных отходов. В таких технологиях одной из неизбежных операций является отгонка электролита из различных осадков, поскольку отмывка водой не может быть использована.

Целью настоящей работы является изучение состава жидкой и паровой фаз при отгонке расплавленных солей сложного состава.

В данном сообщении приведены результаты изучения отгонки солей из расплавленных смесей $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт}} - \text{SrCl}_2 - \text{BaCl}_2 - \text{NdCl}_3$.

Давления насыщенных паров над расплавами перечисленных индивидуальных хлоридов существенно различаются (рис. 1). Однако взаимодействие (комплексообразование) различных хлоридов в многокомпонентных расплавленных смесях и в парах над ними могут существенно изменить соотношения летучестей. Мы провели экспериментальное изучение селективности отгонки различных компонентов и кинетики их испарения. Основным электролитом была эвтектика LiCl–KCl, содержащая 1–2 мол. % хлоридов имитаторов некоторых продуктов деления – щелочноземельных и редкоземельных металлов. Отгонку выполняли при остаточном давлении ~ 1 Па и температурах 753–1033°C.

Установлено, что:

- отгонка солей при непрерывной откачке паров протекает с многократно большей скоростью, чем при испарении в вакуумированных запаянных сосудах;
- возгоны солей, по сравнению с расплавом, первоначально несколько обогащаются по LiCl и, соответственно, немного обедняются по KCl;
- содержание хлоридов щелочно- и редкоземельных элементов, а также трихлорида неодима в парах (возгонах) на 2–4 порядка ниже их содержания в расплаве;
- при переходе от испарения в закрытых сосудах к отгонке при непрерывно работающем насосе разделение (соотношение концентраций пар / конечный расплав) для хлоридов щелочных металлов

изменяется несущественно, в то время как для редкоземельных оно возрастает приблизительно на порядок, а для хлоридов щелочноземельных металлов – примерно на 2 порядка.

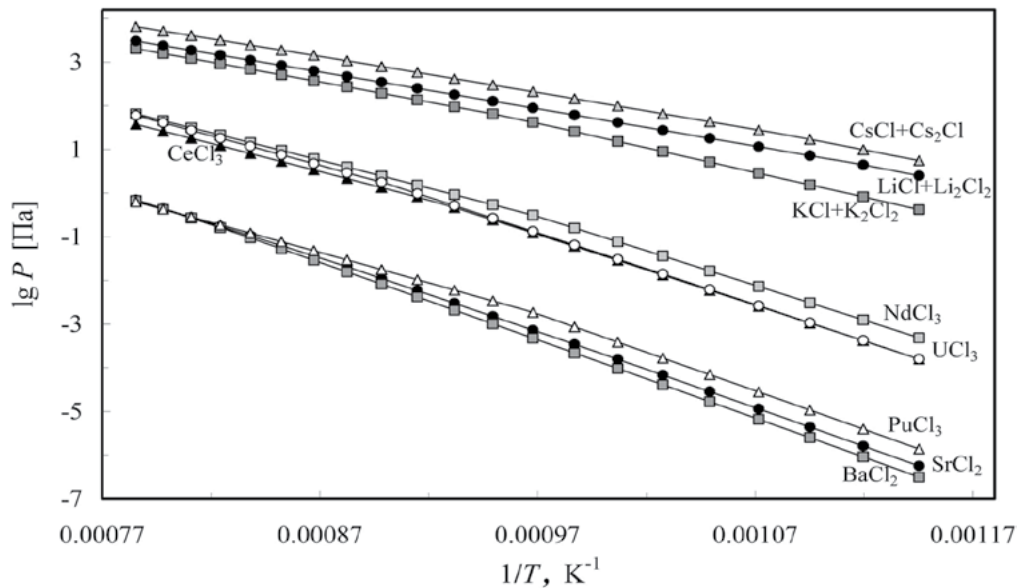


Рис. 1. Давление насыщенных паров над расплавами чистых солей в интервале 600–1000°C

Полученные данные обсуждены. Сделаны выводы о степени отгонки, селективности испарения компонентов расплавленных смесей и относительной летучести различных хлоридов. Найденные зависимости могут оказаться полезными для разработки пирохимических схем переработки ОЯТ.

DISTILLATION OF THE LiCl–KCl BASED ELECTROLYTE AT REDUCED PRESSURES

A. M. Potapov^{1,2}, A. B. Salyulev¹, V. Yu. Shishkin¹, Yu. P. Zaikov¹

¹Institute of High-Temperature Electrochemistry UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

Currently, several countries are developing various options for pyrochemical (using molten salts) technologies that would ensure efficient disposal of spent nuclear fuel and reduce the volume of radioactive wastes. In such technologies, distillation of the electrolyte from various precipitates is one of the inevitable operations, since water rinsing cannot be used.

The purpose of this work is to study the composition of the liquid and vapor phases during the distillation of molten salts of complex composition.

This report presents the results of studying the distillation of salts from $(\text{LiCl–KCl})_{\text{eut}} - \text{SrCl}_2 - \text{BaCl}_2 - \text{NdCl}_3$ molten mixtures.

Saturated vapor pressures over the melts of the listed individual chlorides differ significantly (fig. 1). However, the interaction (complex formation) between various chlorides in multicomponent molten mixtures and in vapors above them can significantly change the volatility ratios.

We performed an experimental study of the selectivity of the distillation of various components and kinetics of their evaporation. The LiCl–KCl eutectic containing 1–2 mol. % of chloride imitators of some fission products (alkaline earth and rare earth metals) served as a main electrolyte. The distillation was carried out at a residual pressure of ~1 Pa and temperatures of 753–1033°C.

It is found that:

- the distillation of salts during continuous vapor pumping out proceeds at a much higher rate than during evaporation in vacuum-evacuated sealed vessels;

- salts sublimates, in comparison with the melt, are initially somewhat enriched in LiCl and, accordingly, are slightly depleted in KCl;
- concentrations of alkali and rare earth elements chlorides, as well as neodymium trichloride in vapors (sublimes) are 2–4 orders of magnitude lower than their content in the melt;
- during the transition from evaporation to distillation in the sealed vessels at a continuous pump operation, the separation (concentration ratio “vapor / final melt”) of alkali metal chlorides does not change significantly, while the concentration ratio “vapor / final melt” of rare earth chlorides increases by about an order of magnitude, and that of alkaline earth metal chlorides increases by about 2 orders of magnitude.

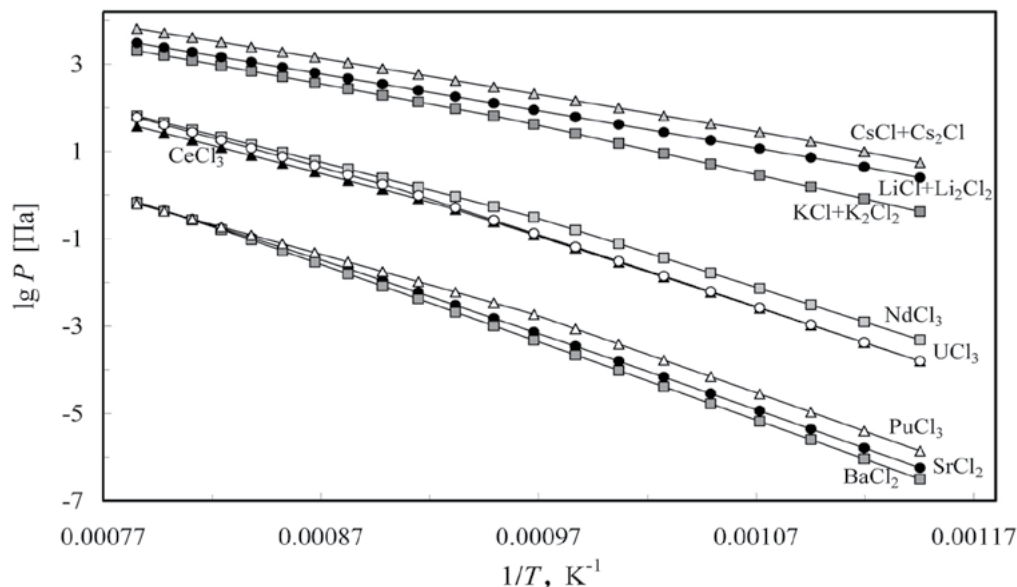


Fig. 1. Saturated vapor pressure over the melts of pure salts in the range of 600–1000°C

The obtained data are discussed. Conclusions on the degree of distillation, the selectivity of evaporation of the components of molten mixtures and the relative volatility of various chlorides are drawn. The obtained dependences may be useful for the development of pyrochemical schemes for SNF reprocessing.

ОЦЕНКА ЭЛЕКТРОПРОВОДНОСТИ МНОГОКОМПОНЕНТНЫХ РАСПЛАВОВ, СОДЕРЖАЩИХ ХЛОРИДЫ ОДНО-, ДВУХ- И ТРЕХВАЛЕНТНЫХ МЕТАЛЛОВ

А. М. Потанов^{1,2}, А. Б. Салюлев¹

¹Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, Екатеринбург, Россия

²Уральский государственный горный университет, Екатеринбург, Россия

При растворении отработавшего ядерного топлива (ОЯТ) в расплавленной эвтектике LiCl–KCl при пирохимической переработке нитридного ОЯТ образуются сложные многокомпонентные расплавы. Для отделения и разделения продуктов деления предполагается использовать электрохимические методы. Поэтому важно знать электропроводность таких расплавов. Однако получить экспериментальные данные для всевозможных многокомпонентных смесей – практически нереальная задача. Поэтому необходимо разрабатывать способы надежной оценки электропроводности исходя из относительно ограниченного количества экспериментальных данных.

Целью работы является разработка способа оценки электропроводности сложных расплавленных смесей и создание базы данных по электропроводности расплавов, содержащих компоненты ОЯТ.

Нами измерена электропроводность большого числа квазибинарных расплавленных смесей $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{MCl}$, $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{MCl}_2$, $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{MCl}_3$, где М – одно-, двух- и трехвалентные элементы, входящие в состав нитридного ОЯТ (Cs, Sr, Cd, Ce, Nd, U) [1, 2], а также многих квазитройных и квазичетверных расплавленных солевых смесей (в рамках данной работы эвтектика LiCl-KCl рассматривается, как один компонент).

Электропроводность расплавленных смесей – резко неаддитивное свойство. Ее отклонения от аддитивной суммы электропроводностей отдельных компонентов может достигать десятки процентов.

Мы предлагаем оценивать электропроводность многокомпонентных смесей, как аддитивную сумму электропроводностей бинарных смесей. Нами показано, что в этом случае электропроводность расплавленных тройных и четверных смесей отличается от экспериментально найденных ее значений не более, чем на 2%, то есть на уровне экспериментальной погрешности, поскольку отклонения от аддитивности уже как бы учтены в бинарных смесях. Другими словами, мы приближаем многокомпонентную расплавленную смесь к идеальной, изменив выбор подсистем (компонентов смеси). На рис. 1 сопоставлены непосредственно измеренная электропроводность четырехкомпонентной смеси и она же, рассчитанная из электропроводности бинарных смесей. Максимальная разница $\delta = 0,08\text{--}1\%$.

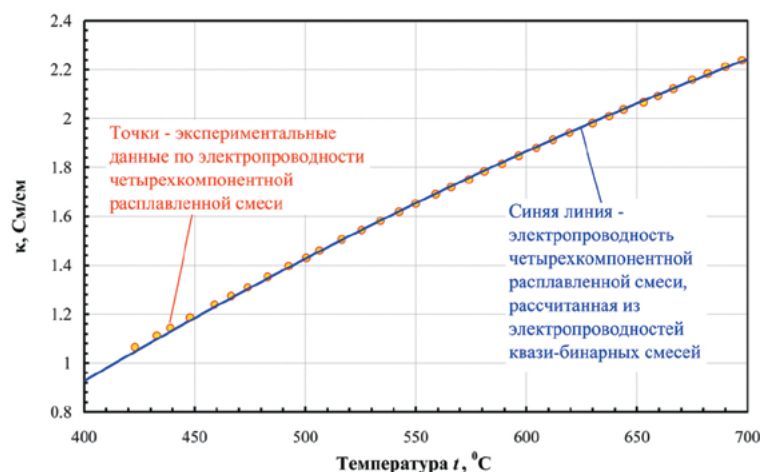


Рис. 1. Удельная электропроводность (κ) четырехкомпонентной расплавленной $(\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} + 2,5 \text{ мол.}\% \text{ CsCl} + 2,5 \text{ мол.}\% \text{ NdCl}_3 + 5,0 \text{ мол.}\% \text{ UCl}_3$ системы.

Синяя линия – электропроводность системы: $0,108 \cdot (\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} + 0,25 \cdot ((\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} + 10 \text{ мол.}\% \text{ CsCl} + 10 \text{ мол.}\% \text{ NdCl}_3) + 0,642 \cdot ((\text{LiCl-KCl})_{\text{эвт.}} + 7,79 \text{ мол.}\% \text{ UCl}_3)$.

Литература

1. **Salyulev, A.** The electrical conductivity of model melts based on LiCl-KCl , used for the processing of spent nuclear fuel [Text] / A. Salyulev, A. Potapov, V. Khokhlov, V. Shishkin // *Electrochim. Acta* – 2017. – Vol. 257. – P. 510–515.
2. **Salyulev, A. B.** Electrical conductivity of $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{SrCl}_2$ molten mixtures [Text] / A. B. Salyulev and A. M. Potapov // *J. Chem. Eng. Data.* – 2021. – Vol. 66, No. 12. – P. 4563–4571.

EVALUATION OF THE ELECTRICAL CONDUCTIVITY OF MULTICOMPONENT MELTS CONTAINING CHLORIDES OF ONE-, TWO- AND TRIVALENT METALS

A. M. Potapov^{1,2}, A. B. Salyulev¹

¹Institute of High-Temperature Electrochemistry UB RAS, Ekaterinburg, Russia

²Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

When spent nuclear fuel (SNF) is dissolved in the molten LiCl–KCl eutectic during pyrochemical processing of nitride SNF, complex multicomponent melts are formed. Electrochemical methods are supposed to be used to split and separate fission products. Therefore, it is important to know the electrical conductivity of such melts. However, obtaining experimental data for various multicomponent mixtures is practically insurmountable challenge. Therefore, it is necessary to develop methods for a reliable estimation of electrical conductivity that are based on a relatively limited amount of experimental data.

The aim of the work is to develop a method to assess the electrical conductivity of complex molten mixtures and to create a database on the electrical conductivity of melts containing SNF components.

We have measured the electrical conductivity of a large number of quasi-binary molten mixtures $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{MCl}$, $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{MCl}_2$, $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} - \text{MCl}_3$, where M denotes mono-, di- and trivalent elements being a part of the nitride SNF (Cs, Sr, Cd, Ce, Nd, U) [1, 2], as well as many quasi-ternary and quasi-quaternary molten salt mixtures (within the framework of this work, the LiCl–KCl eutectic is considered as one component).

The electrical conductivity of molten mixtures is a highly non-additive property. Its deviations from the additive sum of electrical conductivities of individual components can reach tens of per-cent.

We propose to evaluate the electrical conductivity of multicomponent mixtures as an additive sum of the electrical conductivities of binary mixtures. We have shown that in this case, the electrical conductivities of molten ternary and quaternary mixtures differ from the experimentally found values by no more than 2%, that is, within the experimental error, since deviations from additivity have been already taken into account in binary mixtures analysis. In other words, we bring the multicomponent molten mixture closer to the ideal one by variation of the subsystems (components of the mixture). Fig. 1 compares the experimentally measured electrical conductivity of a four-component mixture and that calculated using the electrical conductivity of binary mixtures. Maximum difference $\delta = 0.08\text{--}1\%$.

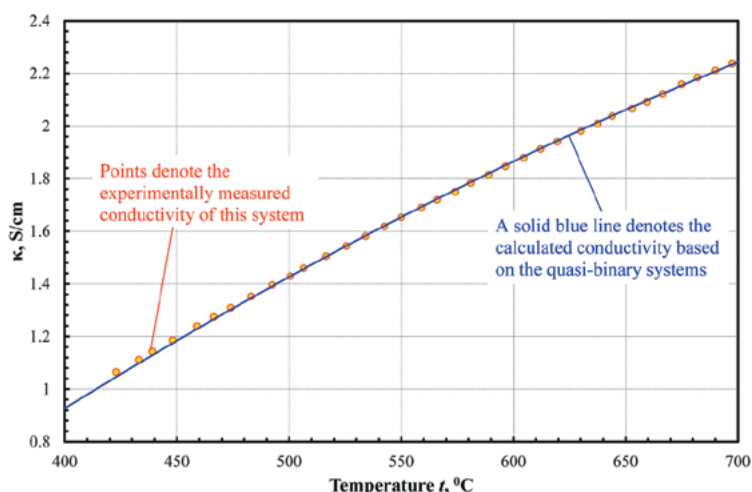


Fig. 1. Specific electrical conductivity (κ) of the four-component molten $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} + 2.5 \text{ mol.}\% \text{ CsCl} + 2.5 \text{ mol.}\% \text{ NdCl}_3 + 5.0 \text{ mol.}\% \text{ UCl}_3$ system.

The blue line is the electrical conductivity of the $0.108 (\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} + 0.25 \cdot ((\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} + 10 \text{ mol.}\% \text{ CsCl} + 10 \text{ mol.}\% \text{ NdCl}_3) + 0.642 \cdot ((\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}} + 7.79 \text{ mol.}\% \text{ UCl}_3)$ system

References

1. **Salyulev, A.** The electrical conductivity of model melts based on LiCl–KCl, used for the processing of spent nuclear fuel [Text] / A. Salyulev, A. Potapov, V. Khokhlov, V. Shishkin // *Electrochim. Acta* – 2017. – Vol. 257. – P. 510–515.
2. **Salyulev, A. B.** Electrical conductivity of $(\text{LiCl-KCl})_{\text{eut.}}$ – SrCl_2 molten mixtures [Text] / A. B. Salyulev and A. M. Potapov // *J. Chem. Eng. Data.* – 2021. – Vol. 66, No. 12. – P. 4563–4571.

5-20

ТЕХНОЛОГИЯ СОЗДАНИЯ КРИОГЕННОЙ МИШЕНИ НЕПРЯМОГО ОБЛУЧЕНИЯ ДЛЯ ЛАЗЕРНОГО ТЕРМОЯДЕРНОГО СИНТЕЗА

М. А. Рогожина, Е. Ю. Зарубина

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ экспериментальной физики», Саров, Россия

Проведение экспериментов в области лазерного термоядерного синтеза предполагает использование криогенной мишени непрямого облучения. Такая мишень представляет собой полую сферическую оболочку с замороженным на ее внутренней поверхности гладким и однородным по толщине слоем твердого водородного топлива. Оболочка в свою очередь помещена в центр бокса-конвертора, который обеспечивает равномерное тепловое окружение оболочки на этапе формирования криослоя и конвертацию лазерного излучения в рентгеновское излучение на этапе проведения экспериментов по зажиганию. Диагностика криослоя и заведение лазерного излучения выполняется через отверстия в боксе-конверторе, которые герметично закрыты пленками. К конструкции этих мишеней предъявляются высокие требования к геометрии и размеру элементов, точности их изготовления и сборки, герметичности, качеству криогенного слоя и др. Эти требования направлены на снижение энергетических потерь для достижения максимальной температуры и плотности топлива в точке зажигания.

Создание криогенной мишени непрямого облучения – многоуровневая задача, заключающаяся несколько этапов:

- разработка концепции криомишени;
- разработка и производство составных элементов криомишени, их аттестация;
- прецизионная сборка криомишени (расположение элементов с микронной точностью относительно друг друга) и ее аттестация;
- создание криослоя требуемого качества;
- аттестация криослоя;
- постановка криомишени на эксперимент по зажиганию без потери качества слоя.

Данные подзадачи решаются параллельно друг другу и, по мере получения каких-либо значимых результатов в одной из них, могут оказывать влияние и вносить корректировки в методы решения и реализацию остальных.

Создание криогенного слоя изотопов водорода внутри оболочки с отклонением от сферичности и концентричности не более 1% [1] – одна из главных задач при создании криогенной мишени для лазерного термоядерного синтеза. Для симметризации слоя используется метод радиальных температурных градиентов. В зависимости от вида топлива, используемого в мишени, реализуется метод выравнивания слоя: ИК-выравнивание при работе с нерадиоактивными изотопами водорода (D_2 , H_2 , HD) [2] или бета-выравнивание для слоя с DT -смесью [3]. Реализация метода предполагает выдерживание оболочки с водородным топливом в изотермических условиях при температуре ниже температуры замерзания топлива. В этом случае из-за большего выделения тепла в объеме толстой области DT -слоя ее поверхность будет более нагрета, чем поверхность тонкой области. Вещество слоя будет

испаряться с более нагретой области, и конденсироваться в менее нагретой области на поверхности слоя. Процесс выравнивания толщины имеет экспоненциальный характер, поскольку по мере выравнивания слоя градиент температуры на его поверхности снижается. Криогенный слой в конечном положении примет вид однородного по толщине сферического слоя, замороженного на внутреннюю поверхность сферической оболочки.

Эксперименты по формированию криогенного слоя проводились в специальном боксе с размещенной внутри сферической полости бокса оболочкой и возможностью заведения ИК-излучения. В результате реализации метода радиальных температурных градиентов для нерадиоактивных изотопов водорода были получены слои дейтерия, удовлетворяющие требованиям разнотолщинности слоя.

Литература

1. **Tianliang Yan.** Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement [Text] // Optics and Laser Technology. – 2021. – Vol. 134. – P. 6.
2. **Bittner, D. N.** Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation [Text] / D. N. Bittner, G. W. Collins, E. Monsler, S. Letts // Fusion Technology. – 1999. – Vol. 35 – P. 244.
3. **Martin, A. J.,** Simms R. J., Jacobs R. B. // Vac. Sci. Technol. – 1988. – A6 – P.1885.

PROCESS OF CREATING A CRYOGENIC TARGET OF INDIRECT DRIVE FOR LASER THERMONUCLEAR FUSION

M. A. Rogozhina, E. Yu. Zarubina

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – All-Russian Research Institute of Experimental Physics”, Sarov,
Russia

Conducting experiments in the field of laser thermonuclear fusion involves the use of a cryogenic target of indirect irradiation. Such a target is a hollow spherical shell with a smooth and homogeneous layer of solid hydrogen fuel frozen on its inner surface. The shell, in turn, is placed in the center of the converter box, which provides a uniform thermal environment of the shell at the stage of cryogenic layer formation and conversion of laser radiation into X-ray radiation at the stage of ignition experiments. Diagnostics of the cryogenic layer and the establishment of laser radiation is carried out through holes in the converter box, which are hermetically sealed with films. The design of these targets is subject to high requirements for the geometry and size of the elements, the accuracy of their manufacture and assembly, tightness, the quality of the cryogenic layer, etc. These requirements are aimed at reducing energy losses to achieve maximum fuel temperature and density at the ignition point.

The creation of a cryogenic target of indirect drive is a multi-level task that includes several stages:

- development of the cryogenic target concept;
- development and production of cryogenic target components, their certification;
- precision assembly of a cryogenic target (arrangement of elements with micron precision relative to each other) and its certification;
- creation of a cryogenic layer of the required quality;
- certification of the cryogenic layer;
- setting up a cryogenic target for an ignition experiment without loss of layer quality.

These subtasks are solved in parallel with each other and, as any significant results are obtained in one of them, they can influence and make adjustments to the methods of solving and implementing the rest.

The creation of a cryogenic layer of hydrogen isotopes inside the shell with a deviation from sphericity and concentricity of no more than 1% [1, 2] is one of the main tasks in creating a cryogenic target for laser thermonuclear fusion. The method of radial temperature gradients is used to symmetrize the layer. Depending on the type of fuel used in the target, a layer alignment method is implemented: IR alignment when working with non-radioactive hydrogen isotopes (D2, H2, HD) [3] or beta alignment for a layer with a DT mixture. The implementation of the method involves maintaining the shell with hydrogen fuel in isothermal conditions at a temperature below the freezing point of the fuel. In this case, due to the greater heat release

in the volume of the thick region of the DT layer, its surface will be more heated than the surface of the thin region. The substance of the layer will evaporate from a more heated area, and condense in a less heated area on the surface of the layer. The process of thickness leveling is exponential, because as the layer is leveled, the temperature gradient on its surface decreases. The cryogenic layer in the final position will take the form of a spherical layer homogeneous in thickness, frozen on the inner surface of the spherical shell.

Experiments for the formation of a cryogenic layer were carried out in a special box with a shell placed inside the spherical cavity of the box and the possibility of introducing IR radiation [4]. As a result of the implementation of the radial temperature gradients method for non-radioactive hydrogen isotopes, deuterium layers were obtained that meet the requirements of the layer thickness.

References

1. **Tianliang Yan.** Compact, snapshot and triple-wavelength system for ICF target ice-layer refractive index and thickness measurement [Text] // Optics and Laser Technology. – 2021. – Vol. 134. – P. 6.
2. **Bittner, D. N.** Forming uniform HD layers in shells using infrared radiation [Text] / D. N. Bittner, G. W. Collins, E. Monsler, S. Letts // Fusion Technology. – 1999. – Vol. 35 – P. 244.
3. **Martin, A. J.,** Simms R. J., Jacobs R. B. // Vac. Sci. Technol. – 1988. – A6 – P.1885.

5-21

РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПИРАМИДАЛЬНЫХ ОБЪЕКТОВ В СРЕДЕ COMSOL MULTIPHYSICS

В. В. Савельев, В. А. Сапунов, А. В. Сергеев

ФГАО АУ ВО Уральский федеральный университет
имени первого Президента России Б. Н. Ельцина, Екатеринбург, Россия

E-mail: savelev.vv@urfu.ru

В настоящее время перспективным направлением магнитометрии является применение беспилотных носителей, что формулирует особые требования к подготовке полетных заданий учитывающих форму и свойства объектов. Особый интерес имеют захоронения в виде курганов или пирамид. Исследование свойств таких мегалитических объектов может быть сопряжено с трудностями, поскольку такие объекты часто являются историческими памятниками культуры, и проведение экспериментов на них требует тщательной подготовки. Этапом такой подготовки является подготовка максимального количества априорной информации об объекте, которую можно получить, из уже проведенных работ других коллективов, а также проведя математическое моделирование. Авторами работы [1] было проведено моделирование воздействия радиоволн на Великую пирамиду, получено распределение электромагнитных полей внутри. В данной же работе, результатами вычислений должно стать распределение магнитного поля вне тела пирамиды. Эти области доступны для непосредственной магнитной съемки, в частности – аэромагнитной. Соответственно, повысотные магнитные карты – имитация магнитной съемки, проводимой скалярным магнитометром. Пример таких магнитных карт приведен на рис. 1. В качестве прототипа модели была выбрана Великая пирамида Гизы. Магнитные свойства материала пирамиды [2], взяты для случая известняковой породы. Параметры внешнего магнитного поля в точке расположения пирамиды выбраны в соответствии с моделью IGRF-13 [3].

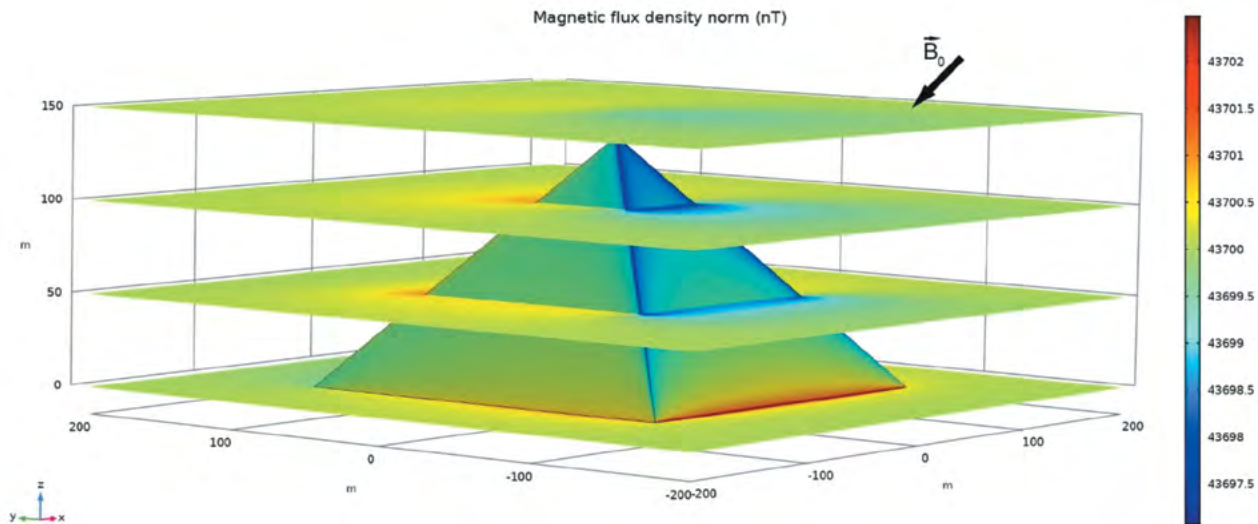


Рис. 1. Магнитное поле пирамиды, в геомагнитном поле (ось y совпадает с севером, угол наклонения внешнего поля B_0 – $44,5^\circ$; модуль геомагнитного поля $43\,700$ нТл)

Результаты проведенных расчетов позволяют оценить величину магнитных аномалий, возникающих около пирамиды, а также ложатся в основу методики магнитной съемки. Полученные магнитные карты однородной пирамиды, выделили направления движения, вдоль которых аномалии от объектов (пустот, гранитных арок), заключенных внутри, дают наибольшую амплитуду.

Литература

1. **Balezin, M.**, Baryshnikova K. V., Kapitanova P. and Evlyukhin A. B. // Journal of Applied Physics. – 2018. – Vol. 124. – P. 034903.
2. **Khmelevskoy, V. K.** and Kostitsyn V. I. // Fundamentals of geophysical methods. – 2010. – Vol. 111.
3. International Geomagnetic Reference Field (Electronic resource, URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IGRA/vmod/igrf.html>, accessed 21.12.2019).

CALCULATION OF THE PYRAMIDAL OBJECTS MAGNETIC FIELD IN COMSOL MULTIPHYSICS

V. V. Saveliev, V. A. Sapunov, A. V. Sergeev

Ural Federal University named after the First President of Russia B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia

E-mail: savelev.vv@urfu.ru

Currently, a promising area of magnetometry is the use of UAV (unmanned aerial vehicle) this formulates special requirements for the flight mission's preparation taking into account the shape and properties of objects. Burials in the form of barrows or pyramids are of particular interest. The study of the properties of such megalithic objects can be fraught with difficulties, since such objects are often historical cultural monuments, and conducting experiments on them requires careful preparation. The stage of such preparation is the collection of the maximum amount of a priori information about the object that can be obtained from the work already carried out by other teams, as well as by performing mathematical modeling. The authors [1] simulated the effect of radio waves on the Great Pyramid, obtained the distribution of electromagnetic fields inside. In this work, the results of calculations should be the distribution of the magnetic field outside the body of the pyramid. These areas are available for direct magnetic survey, in particular - aeromagnetic. Accordingly, height-varied magnetic maps are an imitation of a magnetic survey carried out by a scalar magnetometer. An example of such magnetic maps is shown in fig. 1. The Great Pyramid of Giza was chosen as the prototype for the model. The magnetic properties of the pyramid material [2] are taken for the case of

limestone rock. The parameters of the external magnetic field at the point where the pyramid is located are selected in accordance with the IGRF-13 model [3].

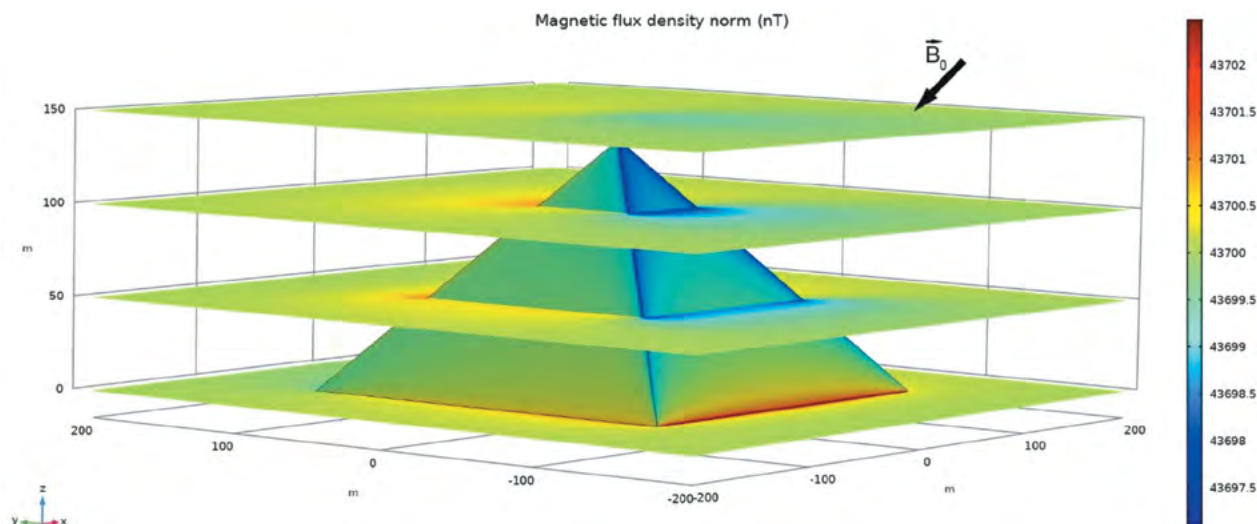


Fig. 1. The pyramid magnetic field in the geomagnetic field (the y-axis coincides with the north direction, the inclination angle of the external field B_0 – $44,5^\circ$; geomagnetic field module 43 700 nT)

The results of the calculations made it possible to estimate the magnitude of the magnetic anomalies that occur near the pyramid, and also form the basis of the magnetic survey technique. The obtained magnetic maps of a homogeneous pyramid indicated the directions of movement along which anomalies from objects (voids, granite arches), enclosed inside, give the greatest amplitude.

References

1. **Balezin, M.**, Baryshnikova K. V., Kapitanova P. and Evlyukhin A. B. // Journal of Applied Physics. – 2018. – Vol. 124. – P. 034903.
2. **Khmelevskoy, V. K.** and Kostitsyn V. I. // Fundamentals of geophysical methods. – 2010. – Vol. 111.
3. International Geomagnetic Reference Field (Electronic resource, URL: <https://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>, accessed 21.12.2019).

ВОДОРОД – ЕГО ЗНАЧЕНИЕ И СВЯЗАННЫЕ С НИМ ОПАСНОСТИ НА ПУТИ РАЗВИТИЯ НАШЕЙ ЦИВИЛИЗАЦИИ В ПРОШЛОМ, НАСТОЯЩЕМ И БУДУЩЕМ

В. А. Симоненко

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Водород имеет особое значение и занимает системообразующее место в формировании и эволюции Вселенной, галактик, звездных систем и даже малых космических объектов. Протон, который является самым легким нуклидом – ядром самого легкого химического элемента, начал образовываться на раннем этапе эволюции Вселенной, открыв тем самым эволюцию догалактического нуклеосинтеза. Параллельно с ним с некоторым отставанием, обусловленным большим (на $\sim 0,14\%$) значением массы, стали образовываться нейтроны. На следующем этапе догалактической эволюции Вселенной это привело к протеканию нуклеосинтеза по протон-протонному циклу. По оценкам доля водорода во

Вселенной составляет 88,6% (11,3% приходится на гелий и 0,1% приходится на все остальные элементы). По современным оценкам возраст Вселенной составляет 13,77 млрд лет. Создаются мощные инструменты для исследований глубин Вселенной, расширяются астрофизические модели для интерпретации наблюдаемых данных. В частности, наблюдаются крупномасштабные водород содержащие облака, структурные образования на уровне скоплений галактик, метagalactic. Маяками во Вселенной служат квазары, которые весьма детально наблюдают в радиодиапазоне. Наблюдаются мощные космологические гамма-всплески большой мощности, которые связывают со сверхмощными взрывами сверхновых в далеких галактиках. Перечисленные события и явления прямо или косвенно связаны с водородом, в них много еще не ясного, о них мы много говорить не будем.

Обратимся к нашему ближайшему окружению – к Солнцу и к сформированной им планетной системе. Солнце является звездой третьего поколения, относится к желтым карликам, эффективная температура поверхности 5780°K излучает белый свет, состав которого наиболее эффективен для поддержания жизни на Земле. Солнце на 73% состоит из водорода, 25% гелия и ~2% остальные элементы (последовательно по массовому составу – кислород, углерод, неон, азот...). Почти вся энергия (99%) выделяется, как и в эпоху нуклеосинтеза в догалактической Вселенной, по протон-протонному циклу, остальная – по CNO циклу. Светимость Солнца составляет $3,827 \cdot 10^{26}$ Вт. Солнечная система движется вокруг центра галактики Млечный путь по ящичковой орбите с периодом 225–250 млн лет, отстоящей от центра галактики примерно на 260 000 световых лет. В целом это способствует осуществлению благоприятного режима для жизни на Земле.

Земля, как и другие планеты, стала формироваться в протосолнечной туманности около 4,54 млрд лет назад из планетезималей параллельно с образованием Солнца. В истории формирования Земли случилось несколько благоприятных, в том числе и маловероятных событий. Первое состоит в благоприятном положении в планетной системе по потоку энергии будущего светила. Второе заключается в удачном положении в протопланетном облаке по составу первичных веществ тугоплавких пород и металлов. Третий заключается в наличие весьма строгого «покровителя» на оптимальном удалении – Юпитера. Он собрал на себя из окружения избыточные газы, не позволяя по соседству с собою со стороны Солнце образоваться большой планете, создав на месте орбиты Фаэтона пояс астероидов. А один из значительно проэволюционированных объектов, астрономы называют его Теей, с уже образованным металлическим центральным ядром был «вытолкнут» им внутрь Солнечной системе фактически обреченным в жертву для Земли, чем она и воспользовалась. Вследствие такого удара у Земли существенно увеличилось металлическое ядро, откололась значительная часть земной коры – слоя более легких пород всплывших при переплавке. Оставшаяся рана – фактически образовала ложе будущего океана. Из них на орбите образовался спутник – Луна. Кроме того, при образовании планет гигантов с помощью Юпитера многие кометы, содержащие конденсированную воду, были направлены внутрь системы и попали в объятья Земли, создавая первичную атмосферу и наполняя океан. Все это и создало на Земле условия, благоприятные для возникновения жизни около 3,5 млрд лет назад.

Отвлечемся от увлекательных экскурсов в истории Вселенной, галактик, Солнечной системы. Не менее увлекательны истории формирования науки, приведшие к превращению алхимии в химию, к открытию водорода и его многочисленных применений, к превращению «физики» Аристотеля в могучее направление семейства физических наук. Важнейшим результатом такого развития явилось создание и расширяющееся развитие технологий, которые в свою очередь облегчают развитие научных исследований не только прикладных, но и фундаментальных. Уже Парацельс (1493–1541) впервые получил и описал горючий газ (впоследствии водород), погружая железные опилки в серную кислоту в XVI веке. А в 1671 году Роберт Бойль (1627–1691) подробно описал реакцию между железными опилками и разбавленными кислотами, при которой выделяется такой же газ, как у Парацельса. Гей-Люссак впервые количественно описал реакцию окисления водорода, положив начало количественным исследованиям в химии, в дальнейшем теоретически обобщенным в работах Авагадро. Исследования, начатые при изучении спектра излучения Солнца, указывали на сложную структуру даже атома водорода. После открытий Беккереля, Планка, Эйнштейна, Резерфорда, Н. Бора и др. они привели к необходимости создания квантовой механики. Этому служили также работы Де Бройля, Гейзенберга, Шредингера, П. Дирака.

Уникальные свойства водорода, несмотря на связанные с ними опасности, стали настойчиво прокладывать пути применений в технологиях. Первоначально в воздухоплавании, начиная с Гей-Люссака и А. Гумбольта. Они же впервые определили нижний концентрационный предел горения водорода в атмосфере. Водород стали широко применять в 19 веке в светильных газах. Затем в химической и фармацевтической промышленности. В настоящее время – в нефтехимии при создании высококачественных топлив для транспорта. Производство водорода в мире к 2020 году достигло 90 млн т. в год

Во второй половине 20-го века были успешно продолжены фундаментальные исследования свойств материи – протона, нейтрона, элементарных частиц (лептонов, адронов). Созданы квантовая электродинамика, теория электрослабого взаимодействия, квантовая хромодинамика. И все же даже на уровне этих успешно применяемых теорий, начиная с квантовой механики, видны дефекты, на которые следует обратить внимание исследователей. Я надеюсь, путь к устранению таких недостатков не за горами.

Другое направление, на котором хочется остановиться, относится к области прикладных исследований. В настоящее время приходится иметь дело с большими количествами водорода, получаемого при производстве, либо в ходе крупномасштабных (тяжелых) аварий, как на АЭС с PWR, BWR или ВВЭР. Поэтому актуальными становятся вопросы предотвращения таких аварий, ослабления их и/или нейтрализации их последствий. Обсуждаются вопросы совместного экспериментального и расчетно-теоретического решения таких задач.

HYDROGEN WITH ITS MISSION AND POTENTIAL HAZARDS FOR THE WORLD IN THE PAST, PRESENT AND FUTURE

V. A. Simonenko

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”,
Snezhinsk, Russia

Hydrogen, given its particular importance, is the main backbone that underlies the formation and evolution of the Universe, galaxies, star systems, and even small space objects. Proton, the lightest nuclide (nucleus of the lightest element), started to form early in the evolution of the Universe and promoted pre-galactic nucleosynthesis evolution. Formation of neutrons began almost simultaneously, though slightly delayed due to a larger (about ~0.14%) mass. The next stage of the pre-galactic evolution of the Universe led to nucleosynthesis in the proton-proton cycle reactions. The fraction of hydrogen in the Universe is estimated to be 88.6% (11.3% accounts for helium and 0.1% – for all the remaining elements). The age of the Universe is estimated to be 13.77 billion of years. Powerful tools for investigation into the depths of the Universe have been developed, astrophysical models for interpreting the observed data have also been extended. Specifically, large-scale hydrogen clouds, structural formations rising to the level of the galaxy/metagalaxy clusters can be observed. Quasars, which can be observed in details in the radiofrequency region, are sort of beacons in the Universe. Powerful cosmological gamma-ray bursts induced by superpower explosions of supernovae in the far away galaxies are observed. Directly or indirectly, the above mentioned phenomena are associated with hydrogen. In this work, we will not dwell upon them as they are still rather unclear.

Let us consider our immediate surrounding of the Solar system with the planets formed in it. The Sun is the 3^d generation star that belongs to yellow dwarfs. Its effective surface temperature of 5780°K results in white light emission. The Sun composition is the best for sustainment of life on the Earth. It consists of hydrogen (73%), helium makes 25%, and the rest of the elements make ~2% (the elements are listed in order according to their weight composition: oxygen, carbon, neon, nitrogen...). Almost all energy (99%) releases in the proton-proton cycle reactions, the way it had occurred in the times of nucleosynthesis in the pre-galactic Universe. The remaining part of the energy releases in the CNO cycle. The Solar luminosity is $3.827 \cdot 10^{26}$ Wt. The Solar system orbits around the center of the Milky Way galaxy in the box-type orbit with the period of 225–250 million of years, being far from the galaxy center for about 260 000 light years. On the whole, these conditions are favorable for the emergence of life on the Earth.

The Earth like other planets originated from the planetesimal in the protosolar nebula about 4.54 billion years ago. Its formation process advanced simultaneously with the formation of the Sun. Some favorable

events including improbable ones occurred during this process. The first event is associated with favorable position in the planetary system as far as the energy flow of the future star is concerned. The second one provides a good scenario for the protoplanetary cloud in terms of primary substance compositions for hard-melting rock and metals. The third one relates to the presence of Jupiter, quite a powerful supervisor, positioned at an optimum distance from the Earth. Jupiter collected surplus gas from the surroundings. It promoted formation of an asteroid belt in place of the possible Phaeton's orbit and thus prevented from the formation of a big planet in its vicinity on the Sun side. Jupiter had pushed one of the evolved objects (called by astronomers Thea) with the already formed central metallic core out into the Solar system. Actually, it was doomed to be sacrificed by the Earth and the Earth took the benefit of this process. The Earth's metallic core, the major part of its crust, increased upon this impact, the lighter rock layer that had emerged after remelting split away. Then this damage was transformed into the ocean bed. The Moon (the Earth's satellite) was formed from these rocks on the orbit. However, during the formation of giant planets (facilitated by Jupiter) a lot of comets containing condensed water moved into internal regions of the Solar system and found themselves in the arms of the Earth, thus creating primitive atmosphere and filling the ocean. All these events helped in providing favorable conditions for the emergence of life about 3.5 billion of years.

Let us distract from this fascinating insight into the history of the Universe, galaxies, and the Solar system. The history of science formation is no less remarkable because it involved some major transformations and discoveries: alchemy into chemistry, Aristotelian physics into mighty family of physical sciences, discovery of hydrogen and its numerous applications. The main result of this evolution is associated with the advent and further development of technologies that promoted development of scientific research (applied and fundamental). Paracelsus (1493–1541) was the first to produce and describe combustible gas (afterwards named hydrogen) when he put iron chips into sulfuric acid in the 16th century. In 1671, Robert Boyle (1627–1691) described in details the reaction between iron chips and dilute acids when the product gas was similar to the one obtained by Paracelsus. Gay-Lussac was the first to provide a quantitative description of hydrogen oxidation reaction and to initiate the use of quantitative analysis in chemistry. Avogadro provided a theoretical summary for these studies. Studies that were initiated in the course of investigation into the spectral lines of the Solar radiation demonstrated a complicated structure even in atoms of hydrogen. After Becquerel, Planck, Einstein, Rutherford, Bohr et al. had made their discoveries this research necessitated the development of quantum mechanics. The works by L. De Broglie, Heisenberg, Schrödinger, P. Dirac were very valuable for this purpose.

Hydrogen, due to its unique properties and despite of its hazards, confidently navigated the way towards technology applications. The first field of application was aeronautics headed by Gay-Lusac and A. Gumbolt. These scientists determined the lower flammability limit of hydrogen in air. Hydrogen was widely used in illumination gases in the 19th century and subsequently in chemicals and pharmaceuticals. Hydrogen has been currently used in petrochemicals to produce high-quality vehicle fuels. By the year of 2020, hydrogen production volume reached 90 million tons per year.

Fundamental research of the properties of matter (proton, neutron, elementary particles (leptons, hadrons)) continued in the second half of the 20th century. Quantum electrodynamics, electroweak interaction theory, quantum chromodynamics have been developed. Even these successfully applied theories starting with quantum mechanics have gaps and scientists should pay more attention to them. Hopefully, they will be filled in the nearest future.

One more field in the applied research merits attention. Nowadays people have to handle big amounts of hydrogen produced or released in severe accidents at power plants with PWR, BWR, and VVER type reactors in operation. That is why prevention of accidents and mitigation of their consequences is becoming urgent. We discuss the ways to jointly solve these problems using both experimental and theoretical and computational tools.

ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АВАРИЙНОГО ИСТЕЧЕНИЯ ВОДОРОДА ИЗ СОСУДА ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ В ОТКРЫТОЕ ПРОСТРАНСТВО

Ю. А. Томилов, Е. М. Щенникова

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

ФГАОУ «Снежинский физико-технический институт Национального исследовательского ядерного университета МИФИ», Снежинск, Россия

Исследование проблемы обеспечения безопасности при производстве, хранении и транспортировке водорода является актуальной задачей для развивающейся водородной энергетики. Для хранения и транспортирования водорода, как правило, применяются баллоны высокого давления. Разгерметизация таких баллонов может создать аварийную ситуацию на промышленном объекте, сопровождающуюся взрывом и пожаром.

Нарушение целостности баллона может привести как к формированию взрывоопасного облака, так и к самовоспламенению высокоскоростной струи истекающего топлива. Это будет определять потенциальные зоны поражения, а также барические и термические нагрузки на близлежащие объекты инфраструктуры водородной энергетики. В целях определения динамики процесса аварийного истечения, реализующихся при этом условий среды и возможности самовоспламенения струи водорода было проведено численное моделирование данного процесса. Задача решалась для двух случаев: аварийного истечения из баллона высокого давления (40 МПа) через верхний и через нижний входы коллектора. Моделирование газодинамических процессов производилось путем решения полной системы уравнений механики сплошной среды с использованием метода конечных объемов в осесимметричной постановке. При этом химические реакции горения водорода учитывались с помощью детального кинетического механизма. Система уравнений механики сплошной среды замыкается уравнением состояния реального газа.

Расчеты показали возможность самовоспламенения струи водорода при истечении из баллона через верхний вход коллектора и отсутствие самовоспламенения струи при истечении через нижний. Размеры пожар-струи, возникающей при воспламенении, достигают нескольких десятков метров (~60 м). Истечение водорода к грунту не вызывает воспламенения вследствие вытеснения окислителя из-под баллона. При этом струйный поток, ударяясь о грунт, распространяется вдоль него на 40 м в радиусе от оси баллона, высота потока невелика (5 м). Также определялись поля скорости, давления, плотности и температуры, а также зависимости этих величин от времени в различных точках пространства, проводился их анализ.

Проведенное исследование позволило провести оценку аварийных процессов с истечением из баллонов высокого давления, возникновение которых возможно на примышлен площадках и в инфраструктуре водородной энергетики.

NUMERICAL SIMULATION OF ACCIDENT HYDROGEN RELEASE FROM A HIGH-PRESSURE VESSEL INTO OPEN SPACE

Yu. A. Tomilov, E. M. Shchennikova

FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

Snezhinsk physicotekhnical institute of National research nuclear university MEPhI, Snezhinsk, Russia

The study of the ensuring safety problem in the production, storage and transportation of hydrogen is an actual task for the evolving hydrogen energy. As a rule, high-pressure cylinders are used to store and

transport hydrogen. Depressurization of such cylinders can create an accident at an industrial facility, accompanied by an explosion and fire.

Integrity violation of the cylinder can lead to both the formation of an explosive cloud and self-ignition of a high-velocity jet of releasing fuel. This will determine potential impact zones, as well as pressure and thermal loads on nearby hydrogen energy infrastructure facilities. In order to determine the dynamics of the accident release process, the environmental conditions that are realized in this case, and the possibility of self-ignition of a hydrogen jet, a numerical simulation of this process was carried out. The problem was solved for two cases: an accident outflow from a high-pressure cylinder (40 MPa) through the upper and lower collector inlets. Modeling of fluid dynamic processes was carried out by solving the complete system of continuum mechanics equations using the finite volume method in an axisymmetric statement. In this case, the chemical reactions of hydrogen combustion were taken into account using a detailed kinetic mechanism. System of continuum mechanics equations is closed by the equation of a real gas state.

The calculations showed the possibility of self-ignition of the hydrogen jet when releasing from the cylinder through the upper collector inlet and the absence of self-ignition of the jet when releasing through the lower one. The size of the fire-jet that occurs during the ignition reaches several tens of meters (~60 m). The hydrogen release to the ground does not cause ignition due to the displacement of the oxidizer from under the cylinder. In this case, the jet stream, hitting the ground, move along it for 40 m in a radius from the cylinder axis, the flow height is small (5 m). The fields of velocity, pressure, density and temperature were also determined, as well as the time dependences of these quantities at various points in space, and their analysis was carried out.

The study made it possible to make an assessment of emergency processes with the release from high-pressure cylinders, the occurrence of which is possible at industrial sites and in the infrastructure of hydrogen energy.

АНАЛИЗ ТРЕБОВАНИЙ РОССИЙСКИХ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ ДЛЯ РЕГУЛИРОВАНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ НА АЭС ПРИ ПРОМЫШЛЕННОМ ПРОИЗВОДСТВЕ ВОДОРОДА ИЗ ВОДЫ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКИМ МЕТОДОМ

Н. Л. Харитонов¹, И. А. Кириллов¹, В. А. Симоненко², В. М. Крюков²

¹Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт», Москва, Россия

²ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

Целью работы является оценка возможности применения требований действующих нормативных правовых документов к регулированию водородной взрывоопасности на АЭС при получении водорода методом электролиза воды с использованием электроэнергии атомной электростанции. В докладе представлены результаты анализа отечественных нормативных документов в области безопасности водородных технологий, выполненного на примере стендового испытательного комплекса (СИК), сооружаемого на Кольской АЭС.

В докладе показано, что в настоящее время в Российской Федерации нормативные правовые акты, регламентирующие водородную взрывобезопасность при получении водорода методом электролиза воды в промышленных объемах на площадке АЭС и с использованием электроэнергии АЭС, представлены не в полном объеме. Отмечено, что недостаток специальных стандартов и норм, регламентирующих обращение с водородом как с энергоносителем, является одним из препятствий на пути развития атомно-водородной энергетики.

Отмечено, в частности, что в действующих нормативных правовых документах не конкретизированы требования к обеспечению безопасности в части барического, токсического, термического воздействия на безопасность отдельных энергоблоков и АЭС в целом облаков, проливов и утечек газообразного и жидкого водорода и/или водородосодержащих смесей, необходимые для оценки условий и возможностей возникновения взрыва при утечке водородосодержащих газовых смесей из СИК на площадке АЭС. Не установлены однозначно требования к выполнению оценки эффективности и пределов безопасной эксплуатации для технических систем водородной пожаро- и взрывозащиты, таких как системы мониторинга взрывоопасных смесей, беспламенного удаления водорода (пассивные каталитические рекомбинаторы водорода), инертизации объектов и устройств инертными газами, химическими флегматизаторами, водяным паром.

Сделан вывод о том, что для уточнения действующих и разработки новых отечественных норм обеспечения безопасности при промышленном получении водорода методом электролиза воды с использованием электроэнергии АЭС, необходимо обеспечить экспериментальные данные для однозначной оценки опасных факторов горения и взрыва водорода в аварийных условиях, а также инструменты для анализа рисков и стойкости.

Показана необходимость разработки методик расчета безопасных расстояний, как при сооружении стендовых испытательных комплексов, так и при сооружении хранилищ жидкого водорода. Отмечено, что для учета особенностей оценки взрыво- и пожаробезопасности инфраструктуры обращения с жидким водородом на АЭС необходима актуализация требований к конструкционным материалам, используемым в системах и элементах с жидким водородом, а также требований к газгольдерам низкого давления и переменного объема.

Проведенный анализ позволит конкретизировать нормативные требования к оценке условий возникновения внешнего взрыва при утечке газовых смесей из СИК для обоснования безопасности АЭС, уточнения характеристик площадки и проработки размещения, важных для безопасности элементов АЭС.

ANALYSIS OF RUSSIAN REGULATORY REQUIREMENTS FOR SAFETY AT NPPs TO INDUSTRIAL PRODUCTION OF HYDROGEN FROM WATER BY ELECTROCHEMICAL METHOD

N. L. Kharitonova¹, I. A. Kirillov¹, V. F. Simonenko², V. M. Kruglov²

¹National Research Center “Kurchatov Institute”, Moscow, Russia

²FSUE “Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics”, Snezhinsk, Russia

The purpose of this work is to assess the possibility of applying the requirements of the Russian regulatory legal documents to the regulation of hydrogen explosion hazard at the industrial production of hydrogen by the method of water electrolysis using the nuclear power plant (NPP) electricity. The report presents the results of the analysis of Russian regulatory documents in the field of safety of hydrogen technologies, performed on the example of a Bench Test Complex (BTC) being built at the Kola NPP.

The report shows that currently in the Russian Federation normative acts regulating hydrogen explosion safety at the production of hydrogen by the method of water electrolysis in industrial volumes at the NPP site and using NPP electricity are not presented in full. The lack of special standards and norms regulating the handling of hydrogen as an energy carrier is one of the obstacles to the development of nuclear-hydrogen energy.

It is noted that, the current regulatory legal documents do not specify the requirements for safety providing in terms of pressure, toxic, thermal effects on the safety of individual power units and NPPs as a whole of clouds, spills and leaks of gaseous and liquid hydrogen and / or hydrogen-containing mixtures necessary to assess the conditions and the possibility of an explosion in case of leakage of hydrogen-containing gas mixtures from the BTC at the NPP site. The current regulatory documents do not specify unambiguous safety requirements in terms of baric, toxic, thermal effects on the safety of individual power units and NPPs as a

whole of clouds, spills and leaks of gaseous and liquid hydrogen and / or hydrogen-containing mixtures necessary to assess the conditions and possibilities of an explosion during leakage of hydrogen-containing gas mixtures from the BTC at the NPP. There are no unambiguous requirements for assessing the effectiveness and limits of safe operation for technical systems of hydrogen fire and explosion protection, such as systems for monitoring explosive mixtures, flameless removal of hydrogen (passive catalytic hydrogen recombiners), inertization of objects and devices with inert gases, chemical phlegmatizers, and steam.

It is noted that in order to develop and refine domestic safety standards for the industrial production of hydrogen by the method of water electrolysis using nuclear power, it is necessary to provide experimental data for an unambiguous assessment of the hazardous factors of combustion and explosion of hydrogen in accident conditions, as well as tools for risk analysis and stability.

The necessity of developing methods for calculating safe distances, both in the construction of bench test complexes, and in the construction of liquid hydrogen storage facilities, is shown. It is noted that in order to take into account the features of assessing the explosion and fire safety of the infrastructure for handling liquid hydrogen at nuclear power plants, it is necessary to update the requirements for structural materials used in systems and elements with liquid hydrogen, as well as the requirements for low-pressure and variable volume gas holders.

The analysis carried out will make it possible to concretize the regulatory requirements for assessing the conditions for the occurrence of an external explosion in the event of a gas mixture leakage from the SIC to justify the safety of the NPP, clarify the characteristics of the site and study the location of the elements of the NPP that are important for the safety.

5-25

ИЗГОТОВЛЕНИЕ НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ ФЕРРИТНОГО КЛАССА ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА СТЭЖОВ ТОТЭ И ТОЭ

П. А. Чугунов, М. В. Ерпалов, В. А. Никонорова, Г. Н. Старостин

Институт высокотемпературной электрохимии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

В последние годы большое внимание уделяется разработке суперсталей с повышенным содержанием Cr (22–28%), Ni(24–28%), Mo(4–8%) и др. В особую группу следует выделить коррозионно-стойкие стали, в состав которых обязательно входит хром в количестве 12 и более (до 30) масс. %. Стали указанной группы разработаны специально для эксплуатации в особо агрессивных условиях, что характерно для электрохимических устройств, в частности твердооксидных топливных элементов (ТОТЭ) и электролизеров (ТОЭ). В основном, для производства интерконнекторов для ТОТЭ и ТОЭ используются стали марок Crofer 22 APU и Crofer H, содержат 22–24% хрома и очищены от большинства нежелательных примесей ($C < 0,03\%$). В качестве активных добавок содержат титан, марганец и лантан. В стали Crofer H для улучшения свойств добавлены ниобий и вольфрам. Наличие титана в составе Crofer 22 APU (H) приводит к связыванию остаточного углерода с образованием TiC, который снижает склонность к росту зерен. Марганец в составе приводит к образованию на поверхности стали шпинели $MnCr_2O_4$ которая представляет собой дополнительный барьерный слой, препятствующий диффузии хрома к поверхности.

Целью представленной работы является разработка технологии получения нержавеющей стали аналога Crofer 22 APU. Задачами в ходе работы являются: определение опытным путем угара легирующих компонентов в процессе нагрева и охлаждения сплава, температурного режима нагрева–охлаждения сплава, оптимального давления инертной среды, а также последовательности добавления материалов в расплав.

Работа ведется на установке индукционно-вакуумного переплава ЭлтерМ-С, исследования образцов на микроструктуру проводятся на сканирующем электронном микроскопе TESCAN MIRA III,

TESCAN. Химический состав определяется на эмиссионном спектрометре iCAP 6300 Duo с использованием индуктивно-связанной плазмы.

По результатам работы установлено: скорость нагрева не влияет на получаемый сплав, скорость охлаждения влияет на размер зерен в полученной стали. Определены последовательности добавления элементов в расплав для получения необходимого состава, а также необходимое давление инертной среды. Так же было установлено влияние перемешивания на расходимость элементов по расплаву и на итоговый состав.

Литература

1. **Subhash, C. S.** High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications [Text] / C. S. Sunhash, K. Kendall. – New York : Elsevier Inc., 2003 – 430 p.
2. VDM Crofer 22 APU Material Data Sheet No. 4046 May 2010 – Publisher: VDM Metals GmbH, Plettenberger Straße 2 58791 Werdohl Germany.
3. **Yavoysky, V. I.** Theory of steel production processes, 2nd ed. Steelmaking [Text] / edited by A. M. Samarina. – Moscow, 2008.

CREATION THE FERRITIC GRADE STAINLESS STEEL FOR THE PRODUCTION OF SOFC AND SOE SELL

P. A. Chugunov, M. V. Erpalov, V. A. Nikonorova, G. N. Starostin

Institute of High-Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Yekaterinburg, Russia

In recent years, much attention has been paid to the development of super steels with a high content of Cr (22–28%), Ni (24–28%), Mo (4–8%), etc. A special group should include corrosion-resistant steels, which necessarily include chromium in the amount of 12 or more (up to 30) wt.%. The steels of this group are designed specifically for use in particularly aggressive environments, which is typical for electrochemical devices, in particular solid oxide fuel cells (SOFC) and electrolyzers (SOE). Basically, the steel grades Crofer 22 APU and Crofer H are used for the production of interconnectors for SOFC and SOE, this contain 22–24% chromium and are purified from most undesirable impurities ($C < 0.03\%$). This contain titanium, manganese and lanthanum as active additives. Niobium and tungsten have been added to Crofer H steel to improve properties. The presence of titanium in the composition of Crofer 22 APU (H) leads to the binding of residual carbon to form TiC, which reduces the tendency to grain growth. Manganese in the steel leads to the formation of $MnCo_2O_4$ spinel on the surface of the steel, which is an additional barrier layer that prevents the diffusion of chromium to the surface.

The purpose of the presented work is to develop a technology for producing stainless steel, which is an analogue of Crofer 22 APU steel. The tasks in the course of the work are: to determine experimentally the evaporation of alloying components during the heating and cooling of the alloy, the temperature regime of heating and cooling of the alloy, the optimal pressure of the inert atmosphere, as well as the sequence of adding materials to the melt.

The work is carried out on the ElterM-C induction vacuum remelting unit, microstructure studies of samples are carried out on a scanning electron microscope TESCAN MIRA III, TESCAN. The chemical composition is determined on the iCAP 6300 Duo emission spectrometer using inductively coupled plasma.

The results of the work are: determination of the dependence of the heating and cooling rate on the final result. Determination of the sequence of adding elements to the melt to obtain the required composition, as well as the required pressure of the inert atmosphere. The effect of mixing on the divergence of elements in the melt and on the final composition was also established.

References

1. **Subhash, C. S.** High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications [Text] / C. S. Sunhash, K. Kendall. – New York : Elsevier Inc., 2003 – 430 p.

2. VDM Crofer 22 APU Material Data Sheet No. 4046 May 2010 – Publisher: VDM Metals GmbH, Plettenberger Straße 2 58791 Werdohl Germany.
3. **Yavoysky, V. I.** Theory of steel production processes, 2nd ed. Steelmaking [Text] / edited by A. M. Samarina. – Moscow, 2008.

5-26

ОСОБЕННОСТИ ДИНАМИКИ ПУЛЬСИРУЮЩЕГО РЕАКТОРА НЕПТУН

Е. П. Шабалин

Объединенный Институт Ядерных Исследований, Дубна, Россия

E-mail: shab36@nf.jinr.ru

Периодический характер энерговыделения в пульсирующем реакторе существенно изменяет связь (как прямую, так и обратную) между реактивностью и мощностью в сравнении с реакторами непрерывного действия. В представленном докладе обсуждаются три специфических динамических свойства пульсирующих реакторов, которые в совокупности определяют сложный характер быстрых динамических процессов. В частности, это пакетный режим колебаний энергии импульсов мощности и наличие в спектре частот колебаний частоты, в два раза меньшей частоты модуляции реактивности. Одна из особенностей – неизбежность появления положительной реактивности при возникновении периодических колебаний реактивности – проявляется также в реакторах непрерывного действия, но в значительно более слабой мере, чем в пульсирующих реакторах. Однако эти особенности не свидетельствуют о неизбежности нестабильной работы пульсирующего реактора. Его устойчивость зависит от соотношения положительной и отрицательной составляющих эффекта обратной связи «мощность-реактивность», которые монотонно изменяются с его мощностью.

FEATURES OF THE DYNAMICS OF THE PULSATING NEPTUNE REACTOR

E. P. Shabalin

Joint Institute for Nuclear Research, Dubna, Russia

E-mail: shab36@nf.jinr.ru

The periodic nature of energy release in a pulsating reactor significantly changes the relationship (both direct and inverse) between reactivity and power in comparison with continuous reactors. The presented report discusses three specific dynamic properties of pulsating reactors, which together determine the complex nature of fast dynamic processes. In particular, this is a batch mode of energy fluctuations of power pulses and the presence in the frequency spectrum of frequency fluctuations, two times less than the frequency of reactivity modulation. One of the features – the inevitability of the appearance of positive reactivity in the event of periodic fluctuations in reactivity – is also manifested in continuous reactors, but to a much weaker extent than in pulsating reactors. However, these features do not indicate the inevitability of unstable operation of the pulsating reactor. Its stability depends on the ratio of the positive and negative components of the feedback effect “power-reactivity”, which monotonically change with its power.

ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЕ ВОССТАНОВЛЕНИЕ ТАБЛЕТИРОВАННОЙ СМЕСИ ПОРОШКОВ UO_2 – Pd В РАСПЛАВЕ $LiCl$ – Li_2O ПРИ $650^\circ C$

А. В. Шишкин, В. Ю. Шишкин, А. А. Масленникова, Ю. П. Зайков

Институт высокотемпературной электрохимии ИВТЭ УрО РАН, Екатеринбург, Россия

В рамках национального проекта «Прорыв» реализуемого госкорпорацией «Росатом» [1] одной из основных технологических операций переработки отработавшего МОКС оксидного ядерного топлива (ОЯТ) быстрых реакторов с малым временем выдержки является электрохимическое восстановление на катоде оксидного образца литием, в процессе электролиза расплавленной солевой смеси $LiCl$ – Li_2O (~1,5 мас.%). Уран плутониевое ОЯТ содержит продукты деления, которые необходимо удалить, а целевые компоненты: уран и особенно плутоний, вернуть обратно в топливный цикл. Можно выделить несколько групп продуктов деления с элементами схожими по своим химическим или физическим свойствам, например такие как оксиды редкоземельных металлов (РЗМ) и благородные металлы (БМ). В ранее опубликованных наших исследованиях по металлизации таблетированной двуокиси урана, а также модельного топлива состоящего из оксидов урана и РЗМ уже было показано, что двуокись урана прекрасно восстанавливается литием до металла, как в чистом виде, так и с содержанием небольшого количества оксидов церия, лантана, неодима, которые не металлизуются [2, 3]. Очень важно выяснить влияние благородных металлов на параметры процесса восстановления в отношении как оксидов урана и плутония, так и РЗМ, прежде всего это связано, с возможностью образования сплавов восстановленных продуктов (металлов) с БМ в условиях проведения операции электролитического восстановления.

Были изучены условия образования сплавов урана и палладия при восстановлении таблетированной смеси порошка металлического диоксида урана и палладия (54 мас.%) при температуре $650^\circ C$ в солевом расплаве $LiCl$ – Li_2O (~1,5 мас.%) в процессе проведения электролиза с выделением щелочного металла на катоде и газообразного кислорода на индифферентном керамическом аноде (NiO – Li_2O). После проведения процесса восстановления, таблетки оставались компактными, практически не меняли своей формы и размеров, были пропитаны соевым электролитом, который удаляли вакууммированием при нагревании [4]. Полученные восстановленные образцы до и после отгонки электролита исследовали на автоматическом рентгеновском дифрактометре Rigaku D/Max-220VL/PC (Rigaku, Япония). Степень восстановления диоксида урана до металла определяли по остаточной концентрации кислорода в продукте, которую определяли методом восстановительной плавки металлов и оксидов в графитовом тигле с использованием расплавленной металлической ванны при высокой температуре на приборе Метавак-АК (ООО НПО Эксан, Россия) [5, 6].

Было установлено, что помещенные на катод таблетированные спеченные образцы смесей порошков диоксида урана и металлического палладия, восстанавливаются растворами лития в солевом электролите в процессе проведения электролиза. В качестве продуктов восстановления были определены интерметаллиды UPd_3 , UPd_4 , $U_{0,2}Pd_{0,8}$. Было сделано предположение, что в зависимости от величины потенциала катода в процессе проведения восстановления, образование обнаруженных сплавов происходит по разным механизмам. При положительных потенциалах относительно Li^+/Li^0 (~ +0,5 В) формируется интерметаллид состава $U_{0,2}Pd_{0,8}$ (основная фаза) и незначительное количество UPd_4 , а при потенциалах близких к образованию жидкой фазы на основе лития формируется интерметаллид UPd_3 .

Литература

1. **Адамов, Е. О.** Концептуальные положения стратегии развития ядерной энергетики России в перспективе до 2100 г. [Текст] / Е. О. Адамов, А. В. Джалавян, А. В. Лопаткин и др. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112, вып. 6. – С. 319–330.

2. **Shishkin, A. V.** Electrochemical reduction of uranium dioxide in LiCl–Li₂O melt [Text] / A. V. Shishkin, V. Yu. Shishkin, A. B. Salyulev, V. A. Kesikopulos, A. S. Kholkina, and Yu. P. Zaikov // Atomic Energy. – 2021. – Vol. 131, No. 2.
3. **Shishkin, A. V.** Electrochemical Reduction of La₂O₃, Nd₂O₃, and CeO₂ in LiCl–Li₂O Melt [Text] / A. V. Shishkin, V. Y. Shishkin, A. A. Pankratov, A. A. Burdina, Y. P. Zaikov // Materials. – 2022. – Vol. 15, No. 11. – С. 3963.
4. **Салюлев, А. Б.** Отгонка хлорида лития из продуктов металлизации диоксида урана [Текст] / А. Б. Салюлев, А. В. Шишкин, В. Ю. Шишкин, Ю. П. Зайков // Атомная энергия. – 2019. – Т. 126, № 4. – С. 199–203.
5. **Burdina, A. A.** Reduction of rare earth metals' oxides in pyrometallurgical reprocessing of spent nuclear fuel [Text] / A. A. Burdina, D. A. Danilov, V. Y. Shishkin // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2020. – Vol. 2313, No. 1. – С. 050007.
6. **Burdina, A. A.** Fractional gas analysis in the determination of oxygen in the products of pyrochemical reprocessing of spent nuclear fuels [Text] / A. A. Burdina, D. A. Danilov, A. V. Shishkin // AIP Conference Proceedings. – AIP Publishing LLC, 2022. – Vol. 2466, No. 1. – С. 050008.

ELECTROCHEMICAL REDUCTION OF PELLETIZED UO₂–PD POWDER MIXTURE IN THE LiCl–Li₂O MELT AT 650°C

A. V. Shishkin, V. Yu. Shishkin, A. A. Maslenikova, Yu. P. Zaikov

Institute of High Temperature Electrochemistry of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
Ekaterinburg, Russia

Electrochemical cathode reduction of the oxide sample by lithium during the electrolysis of molten LiCl–Li₂O (~1.5 wt.%) salts is one of the basic technological operations of processing of MOX oxide nuclear fuel (ONF) of fast reactors with short storage time within the national project “Proryv” (“Breakthrough”) realized by the state corporation “Rosatom” [1]. Uranium-plutonium ONF contains fission products that have to be removed and target components – uranium and plutonium, that should be returned to the fuel cycle. There are several groups of fission products including the elements with common chemical and physical properties, for instance, rare-earth metal (REM) oxides and noble metals (NM). Our previous research on the metallization of the uranium dioxide pellets and model fuel composed of REM and uranium oxides demonstrated that both pure uranium dioxide and that containing small amounts of cerium, lanthanum, neodymium oxides, that do not metallize, are successfully reduced with lithium [2, 3]. It is extremely important to determine the influence of the noble metals on the reduction process parameters relative both to uranium and plutonium oxides as well as to REM oxides, which are associated with the possibility of alloys formation from the reduced products (metals) with NM under the conditions of the electrolytic reduction.

The conditions of uranium and palladium alloys formation at the reduction of the metallic uranium and palladium (54 wt.%) dioxide mixed powder pellets were studied during the LiCl–Li₂O (~1.5 wt.%) molten salt electrolysis at the temperature of 650°C. During this process the alkali metal was deposited at the cathode and gas-like oxygen evolved at the indifferent ceramic (NiO–Li₂O) anode. After the reduction, the pellets remained compact, their size and form were unchanged, they were impregnated with salt electrolyte that was removed by evacuation at heating [4]. The obtained reduced samples before and after the electrolyte distillation were studied using an automatic X-ray diffractogram Rigaku D/Max-220VL/PC (Rigaku, Japan). The uranium dioxide reduction to metal was determined according to residual oxygen concentration in the sample, which was determined by the method of reduction melting of metals and oxides in a graphite crucible using the molten metallic bath at high temperature by a METAVAK-AK device (JSC EKSAN Ltd., Russia) [5, 6].

It was found that pelletized sintered samples of uranium dioxide and metallic palladium mixed powders placed on the cathode are reduced by lithium solutions in a salt electrolyte during the electrolysis. Inter-metallic compounds UPd₃, UPd₄ and U_{0.2}Pd_{0.8} were identified as reduction products. It was assumed that, depending on the value of the cathode potential during the reduction, the formation of the detected alloys

occurs according to different mechanisms. At the positive potentials relative to Li^+/Li^0 ($\sim +0.5$ V), an intermetallic compound of the basic phase $\text{U}_{0.2}\text{Pd}_{0.8}$ composition and small amounts of UPd_4 are formed, and at the potentials close to the formation of a liquid phase, lithium-based intermetallic UPd_3 compound is formed.

References

1. **Adamov, E. O.** Conceptual framework of a strategy for the development of nuclear power in Russia to 2100 [Text] / E. O. Adamov, A. V. Dzhalyan, A. V. Lopatkin et al. // *At. Energy.* – 2012. – Vol. 112. – P. 391–403.
2. **Shishkin, A. V.** Electrochemical reduction of uranium dioxide in $\text{LiCl-Li}_2\text{O}$ melt [Text] / A. V. Shishkin, V. Yu. Shishkin, A. B. Salyulev, V. A. Kesikopoulos, A. S. Kholkina, and Yu. P. Zaikov // *Atomic Energy.* – 2021. – Vol. 131, No. 2.
3. **Shishkin, A. V.** Electrochemical Reduction of La_2O_3 , Nd_2O_3 , and CeO_2 in $\text{LiCl-Li}_2\text{O}$ Melt [Text] / A. V. Shishkin, V. Y. Shishkin, A. A. Pankratov, A. A. Burdina, Y. P. Zaikov // *Materials.* – 2022. – Vol. 15, No. 11. – C. 3963.
4. **Salyulev, A. B.** Distillation of lithium chloride from the products of uranium dioxide metalization [Text] / A. B. Salyulev, A. V. Shishkin, V. Y. Shishkin, Y. P. Zaikov // *Atomic Energy.* – Vol. 126, No. 4. – P. 226–229.
5. **Burdina, A. A.** Reduction of rare earth metals' oxides in pyrometallurgical reprocessing of spent nuclear fuel [Text] / A. A. Burdina, D. A. Danilov, V. Y. Shishkin // *AIP Conference Proceedings.* – AIP Publishing LLC, 2020. – Vol. 2313, No. 1. – C. 050007.
6. **Burdina, A. A.** Fractional gas analysis in the determination of oxygen in the products of pyrochemical reprocessing of spent nuclear fuels [Text] / A. A. Burdina, D. A. Danilov, A. V. Shishkin // *AIP Conference Proceedings.* – AIP Publishing LLC, 2022. – Vol. 2466, No. 1. – C. 050008.

КРИТИЧЕСКИЕ И НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЕ BENCHMARK-ЭКСПЕРИМЕНТЫ С РАЗМНОЖАЮЩИМИ СИСТЕМАМИ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКОГО ПЛУТОНИЯ БЕЗ ОТРАЖАТЕЛЯ ДЛЯ ВАЛИДАЦИИ ЯДЕРНО-ФИЗИЧЕСКИХ ДАННЫХ И КОМПЬЮТЕРНЫХ КОДОВ, МОДЕЛИРУЮЩИХ ПЕРЕНОС НЕЙТРОНОВ

*В. А. Адарченко, С. А. Андреев, А. А. Вайвод, С. С. Бесов, Д. А. Прокопьев, И. И. Костенко,
Д. И. Сергина, Д. В. Хмельницкий, А. А. Юдов*

ФГУП «Российский Федеральный Ядерный Центр – Всероссийский НИИ технической физики
имени академика Е. И. Забабахина», Снежинск, Россия

В настоящее время возможности повышения точности нейтронных констант путем их непосредственного измерения в дифференциальных экспериментах исчерпаны, и интегральные эксперименты на критических сборках являются единственным способом совершенствования константного обеспечения.

В работе представлены результаты критических, корреляционных и нейтронно-активационных экспериментов со сферическими, цилиндрическими и комбинированными сборками из металлического плутония, выполненных на стенде для критическихборок ФКБН-2 в РФЯЦ – ВНИИТФ.

Приведено описание исследований интегральных характеристик размножающих систем: определения критического зазора между верхней и нижней частями исследуемых систем, соответствующего критическому на запаздывающих нейтронах состоянию, построения корреляционных функций, характеризующих временное поведение нейтронного поля, определения зависимости асимптотической

постоянной спада мгновенных нейтронов от зазора $\alpha(H)$ и величины $\partial\alpha/\partial H$, характеризующую время жизни нейтронов в РС. Помимо критических и корреляционных экспериментов, ставших уже стандартными для ВНИИТФ, для цилиндрической и сферической РС были проведены эксперименты по облучению различных типов нейтронно-активационных детекторов (ДНА) размещенных в центре и на поверхности РС, выведенной на небольшой уровень мощности (~ 15 Вт).

Использовались ДНА на основе алюминия, золота, меди, магния, индия, титана, ниобия, никеля, фтора, скандия. ДНА представляют собой диски диаметром 2 см и толщиной от 0,02 до 2 мм. Измерение активности облученных ДНА проводилось с использованием полупроводникового детектора из особо чистого германия с высоким энергетическим разрешением.

По результатам экспериментов определялись активационные интегралы и спектральные индексы (отношения нормированных значений активационных интегралов детекторов различных типов к значениям активационных интегралов детекторов из никеля), дающие информацию о спектре нейтронов. Погрешность абсолютных измерений активационных интегралов определялась по аттестованной методике и составила от ~ 4 до ~ 8 % (2σ).

В ходе экспериментов было дополнительно исследовано влияние на критические параметры сборок изменения температуры АЗ вследствие саморазогрева делящегося материала из-за альфа-распада изотопов плутония. С использованием полученных экспериментальных данных были оценены температурные коэффициенты реактивности (ТКР) РС. Предлагается учитывать данный температурный эффект при описании результатов экспериментов, включающем оценку погрешностей.

Целью проведенного комплекса экспериментов было дополнение и уточнение ранее опубликованных данных, которые могли бы быть использованы для тестирования нейтронно-физических расчетов и библиотек оцененных ядерных констант размножающих систем, содержащих плутоний.

CRITICAL AND NEUTRON ACTIVATION BENCHMARK EXPERIMENTS WITH MULTIPLYING SYSTEMS OF METAL PLUTONIUM WITHOUT A REFLECTOR INTENDED FOR VALIDATION OF NUCLEAR PHYSICS DATA AND COMPUTER CODES SIMULATING NEUTRON TRANSPORT

*V. A. Adarchenko, S. A. Andreev, A. A. Vaivod, S. S. Besov, D. A. Prokopyev, I. I. Kostenko,
D. I. Sergina, D. V. Khmelnskiy, A. A. Yudov*

FSUE "Russian Federal Nuclear Center – Zababakhin All-Russian Research Institute of Technical Physics",
Snezhinsk, Russia

To date, we have exhausted the possibilities to enhance the accuracy of neutron constants by their direct measurement in differential experiments, so integral experiments at critical assemblies are the only way to further refine neutron constants.

The paper presents the results of critical, correlation, and neutron activation experiments with spherical, cylindrical and combined assemblies made of metal plutonium that have been carried out at the FKBN-2 test stand for critical assemblies at RFNC – VNIITF.

The study of integral characteristics of the multiplying systems is presented, including determining the critical gap between the upper and the lower parts of the systems under study that corresponds to critical state of assemblies on delayed neutrons, construction of correlation functions that characterize temporal behavior of a neutron field, and determining the dependence of the asymptotic constant of prompt neutron decay on the gap $\alpha(H)$ and on the value of $\partial\alpha/\partial H$ that characterizes neutron lifetime in a multiplying system. In addition to the critical and correlation experiments that have already become a standard procedure at RFNC – VNIITF, we conducted experiments at a cylindrical and spherical multiplying system on irradiation of different types of neutron activation detectors (NADs) installed at the center and on the surface of a multiplying system operating at ~ 15 W.

We used the NADs based on aluminum, gold, copper, magnesium, indium, titanium, niobium, nickel, fluorine, and scandium. NADs are 0.02...2 mm thick discs that are 2 cm in diameter. The activity of the irradiated NADs was measured by a high-resolution semiconductor detector made of high-purity germanium.

Based on the results of experiments, we determined activation integrals and spectral indices (the ratios of normalized values of activation integrals of detectors of different types to the activation integrals of nickel detectors) that provide data on neutron spectrum. The absolute measurement error of activation integrals was determined by the certified method and ranged from ~4 to ~8 % (2σ).

During the experiments, we additionally studied the effect of core temperature variation (as a result of self-heating of fissile material due to alpha-decay of plutonium isotopes) on critical parameters of assemblies. Using the obtained experimental data, we assessed the temperature coefficients of reactivity (TCRs) of the multiplying system. It is proposed to take into account the given temperature effect when describing the experimental results with due regard to error estimates.

The aim of the set of experiments was to complement and refine the previously published data that could be used for validating neutron physics calculations and libraries of evaluated nuclear constants of multiplying systems containing plutonium.
