

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(77), МАРТ 2019

Издается с января 2000 г.

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР – д.ф.-м.н., профессор БАТЫРБЕКОВ Э.Г.

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ: д.ф.-м.н. СКАКОВ М.К. – заместитель главного редактора, к.б.н. АЙДАРХАНОВ А.О., д.т.н. БАТЫРБЕКОВ Г.А., д.ф.-м.н. БУРТЕБАЕВ Н.Т., доктор инженерии ВИЕЛЕБА В.К. (Польша), к.ф.-м.н. ВИТЮК В.А., к.ф.-м.н. ВУРИМ А.Д., д.т.н. ГРАДОБОЕВ А.В. (Россия), д.ф.-м.н. МАКСИМКИН О.П., д.ф.-м.н. МИХАЙЛОВА Н.Н., к.г.-м.н. ПОДГОРНАЯ Л.Е., д.ф.-м.н. СОЛОДУХИН В.П., д.ф.-м.н. ТАЖИБАЕВА И.Л., профессор ФУДЖИ-Е (Япония)

ҚР ҰЯО Жаршысы

ҚАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ҰЛТТЫҚ ЯДРОЛЫҚ ОРТАЛЫҒЫНЫҢ МЕРЗІМДІК ҒЫЛЫМИ-ТЕХНИКАЛЫҚ ЖУРНАЛЫ

1(77) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2019 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

RESEARCH AND TECHNOLOGY REVIEW NATIONAL NUCLEAR CENTER OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN

ISSUE 1(77), MARCH 2019

Периодический научно-технический журнал «Вестник НЯЦ РК» входит в перечень научных изданий, рекомендуемых Комитетом по контролю в сфере образования и науки Министерства образования и науки Республики Казахстан для публикации основных результатов научной деятельности по следующим направлениям:

- Естественные науки;
- Науки о Земле и географические науки.

В журнале представлены доклады VIII Международной конференции «Семипалатинский испытательный полигон: наследие и перспективы развития научно-технического потенциала» (11–13 сентября 2018 г., Курчатов, Казахстан), стр. 108–149.

СОДЕРЖАНИЕ

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ТЕКСТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ НАНОТРУБОК Козловский А.Л., Здоровец М.В., Кенжина И.Е., Шумская Е.Е., Кадыржанов К.К
ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe ⁷⁺ НА СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ TiO ₂ Козловский А.Л., Дукенбаев К., Здоровец М.В., Кадыржанов К.К
ПРИМЕНЕНИЕ ЗД-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИЗВЕСТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЯДЕРНОГО МАТЕРИАЛА В ЦЕЛЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ИХ НЕЗАКОННОМУ ОБОРОТУ Горин Н.В., Воронин Е.В., Пачурин Д.В., Стародумова И.Г., Орлова Н.Ю., Орлов Ю.А., Горбатов И.В
«ПЛАЗМАЛЫҚ ФОКУС-30» ТЕРМОЯДРОЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ СТАТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ Ж.М. Молдабеков, А.М. Жукешов, А.Т. Габдуллина, А.У. Амренова, Қ. Серік
ИЗУЧЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА АКТАУСКОГО СЕЛЬСКОГО ОКРУГА ЗАПАДНО- КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ Салихов Т.К., Салихова Т.С
АҚМОЛА ОБЛЫСЫ АТБАСАР АУДАНЫНЫҢ ТОПЫРАҚ ЖАМЫЛҒЫСЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ГАЖ- ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ НЕГІЗІНДЕ ЗЕРТТЕУ Т.Қ. Салихов, Т.С. Салихова
РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ОБЛУЧЕННОГО ТОПЛИВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Шаймерденов А.А., Сильнягин П.П., Буртебаев Н.Т., Уета Ш
ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ОТРАБОТАВ- ШИХ ТВС РЕАКТОРА БН-350 В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ Кожахметов Е.А., Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е., Мухамеджанова Р.М., Бельдеубаев А.Ж
ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ РЕАКТОРНОЙ АМПУЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫ- ДЕЛЕНИЯ ИЗ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К Чихрай Е.В., Аскербеков С.К., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Аханов А.М., Кенжин Е.А., Кабулбек Е.Б.
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА ТОКАМАКЕ КТМ Чектыбаев Б.Ж., Садыков А.Д., Батырбеков Э.Г., Скаков М.К., Кашикбаев Е.А., Жаксыбаева А.А
ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОРПУСА ПРИЕМА РАСПЛАВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ЛАВА-Б Бекмулдин М.К., Гановичев Д.А., Акаев А.С
ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12X18H10T В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСТДЕФОРМАЦИОННЫХ ОТЖИГОВ Цай К.В., Рофман О.В., Отставнов М.А
ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ВТГР Дюсамбаев Д.С., Гизатулин Ш.Х., Шаймерденов А.А., Сильнягин П.П., Аханов А.М., Буртебаев Н.Т., Уета Ш

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УРАНА В МОЧЕ МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ Кириллова Т.Г., Дюсембаева М.Т., Мухамедияров Н.Ж
ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ ЛЕГКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В РЕАКЦИЯХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 30 МэВ НА ЯДРЕ ⁵⁸ Ni Жолдыбаев Т.К., Мукан Ж., Садыков Б.М., Насурлла М., Дуйсебаев Б.А., Садуев Н.О., Дуйсенбаева А.Ж., Жумадилов И., Байбекова Н91
РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ ГАФНИЙ-УГЛЕРОД Тулеушев Ю.Ж., Жаканбаев Е.А., Суслов Е.Е., Сарсенбаева К.Б., Оракова М.С
ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ И ЭЛЕКТРОНАМИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ ВНУТРЕННИХ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ Максимкин О.П., Мережко М.С., Отставнов М.А
КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРОВ Воронова Н.А., Купчишин А.И., Ниязов М.Н., Кирдяшкин В.И
ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОБЛУЧЕННЫХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ И ОБЛУЧЕННЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ Купчишин А.И., Есырев О.В., Ходарина Н.Н., Таипова Б.Г., Зубарева Т.И
МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭВМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЕФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ Купчишин А.И., Ниязов М.Н., Абдухаирова А.Т., Тронин Б.А116
ПОЛИМЕРНЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА Купчишин А.И., Таипова Б.Г., Тронин Б.А., Шаханов К.Ш120
ОБОБЩЕННАЯ КАСКАДНО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ ФУНКЦИЯ ДЛЯ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ И ЕЕ СВЯЗЬ С УРАВНЕНИЕМ БОЛЬЦМАНА Воронова Н.А., Купчишин А.И., Шмыгалева Т.А., Кирдяшкин В.И., Купчишин А.А
ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОРГСТЕКЛА ПРИ ИЗГИБЕ, ОБЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОНАМИ Купчишин А.И., Ниязов М.Н., Таипова Б.Г., Абдухаирова А.Т., Яр-Мухамедова Г.Ш
СВОЙСТВА РАСПЛАВА МАТЕРИАЛОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА, ПОЛУЧЕН- НОГО НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ИГР Скаков М.К., Мухамедов Н.Е., Пахниц А.В., Дерявко И.И
ВНУТРИРЕАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИСПЫТАНИЮ ТВЭЛА БЫСТРОГО РЕАКТОРА В УСЛОВИЯХ АВАРИИ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ Сулейменов Н.А., Пахниц А.В., Сураев А.С133
ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУЛЛЕРЕН-СОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ
Муратов М.М., Габдуллин М.Т., Хамитова К.К., Исмаилов Д.В., Керимбеков Д.С., Черноштан А.В., Султангазина М.Н
ADAPTATION PROCESSES IN BIOCOENOSES OF CONTAMINATED PLOTS OF THE SEMIPALA- TINSK TEST SITE P. P. Plicak, S.V. Plicak
СПИСОК АВТОРОВ

УДК 539.23; 539.216.1

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНОЙ ТЕКСТУРЫ ЖЕЛЕЗНЫХ НАНОТРУБОК

^{1,2)} Козловский А.Л., ^{1,2)} Здоровец М.В., ^{1,2)} Кенжина И.Е., ³⁾ Шумская Е.Е., ¹⁾ Кадыржанов К.К.

¹⁾ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан ²⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ³⁾ НПЦ НАН Беларуси по материаловедению, Минск, Беларусь

В работе представлены результаты исследования изменения структурных свойств и магнитной текстуры Fe нанотрубок в зависимости от условий синтеза. В качестве метода получения был применен метод электрохимического синтеза из сернокислых растворов электролитов, диапазон напряжений составлял от 1,25 до 2,0 В, с шагом 0,25 В. Для исследования влияния условий осаждения на магнитные характеристики и сверхтонкую магнитную структуру нанотрубок были использованы методы рентгеноструктурного анализа и мессбауэровская спектроскопия. Установлено, что синтезированные нанотрубки представляют собой вискероподобные структуры с текстурным направлением роста кристаллитов (110), объемно-центрированной кубической решеткой характерной для фазы железа пространственной сингонии *Im-3m*(229). Согласно мессбауэровским данным спектры исследуемых наноструктур в общем случае представляют собой малоинтенсивный зеемановский секстет и квадрупольный дублет, характерный для парамагнитного состояния катионов Fe²⁺ и Fe³. Наличие квадрупольного дублета свидетельствует о наличие в структуре примесных включений, что приводит к разупорядочению магнитной текстурры, а также наличием большого количества катионных вакансий в кристаллической структуре. В ходе исследования установлена динамика изменения магнитной текстуры и концентрации примесных включений от условий синтеза.

Введение

Одной из актуальных проблем современного технологического процесса является получение новых металлических наноматериалов, обладающих уникальными свойствами. В свою очередь, качество металлических наноструктур зависит от метода получения, определяющего его структурные характеристики и физико-химические свойства [1-4]. Потенциальные приложения наноструктур варьируются от магнитной записи до датчиков и биомагнетизма. Наноразмерные магнитные массивы также являются привлекательными для хранения информации с сверхвысокой плотностью записи информации. Плотность обычной продольной магнитной записи, как правило, меньше, чем 50 Гбит/дюйм², а также ограничено термической нестабильностью. Массивы магнитных наноструктур имеют потенциал для проведения записи до 100 раз больше, чем на существующие запоминающие устройства [5-7]. Датчики на основе наноструктур имеют лучшее разрешение и чувствительность, высокую эффективность улавливания и быстрое время отклика, из-за их большой поверхности для адсорбции и малого времени диффузии [8-10]. Среди разнообразия наноструктурных материалов, наноструктуры на основе Fe являются привлекательными из-за их превосходных ферромагнитных свойств, высокого уровня намагниченности и возможности управления магнитной текстурой, которая является одной из важных характеристик для потенциального применения наноструктур [11–14].

В работе представлены исследования влияния условий синтеза на структурные свойства и магнитную текстуру железных нанотрубок, полученных методом электрохимического синтеза.

Экспериментальная часть

В качестве шаблонных матриц использовались трековые мембраны с плотностью пор $4 \cdot 10^7$ пор/см² с цилиндрическими порами диаметром ~380±10 нм. Выбор метода электрохимического осаждения обусловлен простотой масштабирования и возможностью управления физико-химическими свойствами синтезируемых наноструктур.

Электрохимическое осаждение в нанопоры ПЭТФ темплата проводилось в потенциостатическом режиме при разности потенциалов от 1,25 до 2,0 В, с шагом 0,25 В. Выбор диапазона разности потенциалов обусловлен полупотенциалами восстановления ионов железа из сернокислых растворов электролитов. Состав раствора электролита для получения железных наноструктур: 7-водный сульфат железа -FeSO₄×7H₂O, борная (H₃BO₃) и аскорбиновая (С6Н8О6) кислоты. Все использованные химические реактивы имели чистоту ч.д.а или х.ч. Контроль за процессом роста наноструктур осуществлялся методом хроноамперометрии с использованием мультиметра Agilent 34410А. Поскольку шаблонная матрица является диэлектриком, для создания проводящего слоя на матрице методом магнетронного напыления в вакууме наносился слой золота толщиной 10 нм, который служил рабочим электродом (катодом) при осаждении. При данных условиях напыления поры в матрице остаются открытыми, что позволило получить наносистемы в форме нанотрубок.

Исследование структурных характеристик и элементного состава нанотрубок проводилось с использованием растрового электронного микроскопа *Hitachi TM3030* с системой микроанализа *Bruker XFlash MIN SVE* при ускоряющем напряжении 15 кВ. Рентгеноструктурный анализ проводился на дифрактометре *D8 ADVANCE ECO (Bruker, Германия)* при использовании излучения CuK α (λ =1,54060 Å). Для идентификации фаз и исследования кристаллической структуры использовалось программное обеспечение *BrukerAXSDIFFRAC.EVA v.4.2* и международная база данных ICDD PDF-2.

Мессбауэровские исследования проводились с использованием спектрометра MS1104Em, работающего в режиме постоянных ускорений с треугольной формой изменения доплеровской скорости движения источника относительно поглотителя. В качестве источника выступали ядра ⁵⁷Со в матрице Rh. Калибровка мессбауэровского спектрометра осуществлялась при комнатной температуре с помощью стандартного поглотителя α -Fe. Для обработки и анализа мессбауэровских спектров использовались методы восстановления распределений сверхтонких параметров мессбауэровского спектра с учетом априорной информации об объекте исследования, реализованные в программе *SpectrRelax* [15].

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлены РЭМ изображения полученных наноструктур в зависимости от разности прикладываемых потенциалов.

Как видно из представленных данных, исследуемые структуры представляют собой полые нанотрубки, внешний диаметр которых составляет 380 нм, что соответствует диаметру пор шаблонных матриц. Внутренний диаметр варьируется от 200–250 нм в зависимости от условий синтеза. При этом для образцов, полученных при разности потенциалов 1,25 и 2,0 В, наблюдается наличие небольших включений в структуре нанотрубок, что может быть обусловлено внедрением примесных включений в структуру нанотрубок.

Для оценки влияния условий облучения на структурные характеристики, а также определение фазового состава синтезированных наноструктур был применен метод рентгеноструктурного анализа. На рисунке 2 представлены рентгеновские дифрактограммы исследуемых Fe нанотрубок.

Исследуемые образцы представляют собой вискероподобные структуры с текстурным направлением роста кристаллитов (110), объемно-центрированной кубической решеткой, характерной для фазы железа пространственной сингонии *Im-3m(229)*. Малоинтенсивный пик в области 54–55° соответствует полимерной матрице, так как дифрактограммы снимались с массива нанотрубок в матрице. Как видно из представленных данных увеличение разности прикладываемых потенциалов приводит к изменению формы и интенсивности дифракционного пика (110), что свидетельствует об изменении концентрации напряжений в структуре.

1.25 E

Рисунок 1. РЭМ изображения синтезированных наноструктур при различных условиях синтеза



Рисунок 2. Рентгеновские дифрактограммы исследуемых образцов Fe нанотрубок

Для исследования влияния условий осаждения на магнитные характеристики и сверхтонкую магнитную структуру нанотрубок были измерены мессбауэровские спектры. Мессбауэровские спектры всех исследуемых образцов были сняты при комнатной температуре в диапазоне скоростей –10/+10 мм/с (рисунок 3) и были обработаны методом восстановления распределения сверхтонкого магнитного поля.

Как видно из представленных данных, для нанотрубок, полученных при разности потенциалов 1,25 В, исследуемый спектр представляет собой малоинтенсивный зеемановский секстет и квадрупольный дублет, характерный для парамагнитного состояния катионов Fe²⁺ и Fe³. Наличие квадрупольного дублета свидетельствует о наличии в структуре примесных включений, что приводит к разупорядочению магнитной текстуры, а также наличию большого количества катионных вакансий в кристаллической структуре. На рисунке 4-а представлена динамика изменения интенсивностей парциальных спектров. Для образцов, полученных при разности потенциалов 1,5 и 1,75 В, наблюдается снижение вклада парамагнитного дублета и увеличение вклада зеемановского секстета, что подтверждает результаты рентгеноструктурного анализа о снижении в структуре макроискажений и аморфноподобных включений. При этом для образцов, полученных при разности потенциалов 2,0 В, наблюдается увеличение вклада парциального спектра дублета, что подтверждает высказанное ранее предположение о разупорядочении структуры за счет примесных включений.

На рисунке 4-б представлен график зависимости изменения величины сверхтонкого магнитного поля от условий синтеза. Как видно из представленных данных, при разности потенциалов 1,25 В величина сверхтонкого поля составляет 269±12 кЭ, что свидетельствует о сильном разупорядочении структуры и большой концентрации катионных вакансий в кристаллической решетке. Уширение распределения сверхтонкого магнитного поля для образцов, полученных при 1,25 В, также подтверждает наличие локальных неоднородностей катионов Fe²⁺ и Fe³⁺, находящихся в парамагнитном состоянии в структуре нанотрубок.



Рисунок 3. Мессбауэровские спектры исследуемых нанотрубок



Рисунок 4. Динамика изменения интенсивностей парциальных спектров в зависимости от условий синтеза (а) и динамика изменения величины сверхтонкого магнитного поля от условий синтеза (б)

При этом увеличение разности прикладываемых потенциалов приводит к увеличению величины сверхтонкого магнитного поля до 329±15 кOe, значения сдвига δ мессбауэровской линии и квадрупольного смещения ε для зеемановского секстета близки к нулю, которые характерны для α-Fe.

Известно, что в мессбауэровском спектре ядер 57 Fe отношение интенсивностей резонансных линий зеемановского секстета зависит от угла \mathcal{G} между направлением пролета гамма кванта и сверхтонким магнитным полем на ядре (магнитным моментом атома Fe), и может быть описано как:

$$\frac{I_{2,5}}{I_{1,6}} = \frac{4\sin^2 \vartheta}{3(1+\cos^2 \vartheta)}$$

где *I*_{2.5}, *I*_{1,6} – интенсивности второй и пятой, и первой и шестой линий в секстете.

На рисунке 5 представлен график зависимости изменения среднего значения угла θ от условий синтеза.



Рисунок 5. График зависимости изменения среднего значения угла в от условий синтеза. Линия на графике показывает значение, характерное для отсутствия упорядочения магнитных моментов

Согласно расчетам для нанотрубок, полученных при разности потенциалов 1,25 В, значение угла составляет 54,73°, что соответствует случайной пространственной ориентации магнитного момента атома железа, что свидетельствует об отсутствии магнитной текстуры в нанотрубках. При этом увеличение разности потенциалов приводит к формированию в структуре нанотрубок магнитной текстуры со средним значением угла 44–46°.

Заключение

В работе представлены исследования влияния условий синтеза на структурные свойства и магнитную текстуру железных нанотрубок, полученных методом электрохимического синтеза. В качестве метода получения был применен метод электрохимического синтеза из сернокислых растворов электролитов, диапазон напряжений составлял от 1,25 до 2,0 В, с шагом 0,25 В. Установлено, что синтезированные нанотрубки представляют собой вискероподобные структуры с текстурным направлением роста кристаллитов (110), объемно-центрированной кубической решеткой характерной для фазы железа пространственной сингонии Іт-3т(229). Согласно мессбауэровским данным спектры исследуемых наноструктур в общем случае представляют собой малоинтенсивный зеемановский секстет и квадрупольный дублет, характерный для парамагнитного состояния катионов Fe²⁺ и Fe³. Установлено, что увеличение разности потенциалов выше 1,25 В приводит к снижению вкладов примесных включений и формированию магнитной текстуры со средним значением угла 44-46°.

Работа выполнена в рамках Грантового финансирования МОН РК по договору №132 от 12 марта 2018 года.

Литература

- 1. Wulfhekel W. et al. Growth and magnetism of Fe nanostructures on W (001) //Physical Review B. 2003. Vol. 68. №. 14. P. 144416.
- Osterloh F. E. Inorganic nanostructures for photoelectrochemical and photocatalytic water splitting //Chemical Society Reviews. – 2013. – Vol. 42. – №. 6. – P. 2294-2320.
- 3. Kipferl W. et al. Thermal spin excitations in epitaxial Fe nanostructures on GaAs (001) //Journal of applied physics. 2003. Vol. 93. №. 10. P. 7601-7603.
- 4. Oster J. et al. Crystallography, morphology, and magnetic properties of Fe nanostructures on faceted α-Al 2 O 3 m plane //Journal of applied physics. – 2005. – Vol. 97. – №. 1. – P. 014303.
- Aravamudhan S. et al. Porous silicon templates for electrodeposition of nanostructures //Applied Physics A. 2007. Vol. 87. № 4. – P. 773-780.
- 6. Hu J. et al. Fe nanostructures stabilized by long-range interactions on Cu (111): kinetic Monte Carlo simulations //New Journal of Physics. 2008. Vol. 10. №. 2. P. 023033.
- Zanganeh S. et al. CVD fabrication of carbon nanotubes on electrodeposited flower-like Fe nanostructures //Journal of Alloys and Compounds. – 2010. – Vol. 507. – № 2. – P. 494-497.
- Fleischer K. et al. Optical reflectance anisotropy of buried Fe nanostructures on vicinal W (110) //Journal of Physics: Condensed Matter. – 2007. – Vol. 19. – №. 26. – P. 266003.
- Luches P. et al. Structure and electronic properties of Fe nanostructures on MgO (0 0 1) //Surface Science. 2007. Vol. 601. №. 18. – P. 3902-3906.
- 10. Wiley B., Sun Y., Xia Y. Polyol synthesis of silver nanostructures: control of product morphology with Fe (II) or Fe (III) species //Langmuir. – 2005. – Vol. 21. – №. 18. – P. 8077-8080.
- Kong X. et al. Very high-resolution etching of magnetic nanostructures in organic gases //Microelectronic Engineering. 2008. Vol. 85. – №. 5-6. – P. 988-991.
- 12. Oster J. et al. Growth of Fe nanostructures //Journal of magnetism and magnetic materials. 2004. Vol. 272. P. 1588-1589.
- 13. Honda Y. et al. Growth and characterization of Fe nanostructures on GaN //Applied Surface Science. 2009. Vol. 256. №. 4. P. 1069-1072.
- 14. Yang C., Wu J., Hou Y. Fe 3 O 4 nanostructures: synthesis, growth mechanism, properties and applications //Chemical Communications. 2011. Vol. 47. №. 18. P. 5130-5141.
- Matsnev M. E., Rusakov V. S. SpectrRelax: an application for Mössbauer spectra modeling and fitting //AIP Conference Proceedings. – AIP, 2012. – Vol. 1489. – №. 1. – P. 178-185.

ТЕМІР НАНОТҮТІКТЕРІНІҢ МАГНИТ ТАЛШЫҒЫН ЗЕРТТЕУ

^{1,2)} А.Л. Козловский, ^{1,2)} М.В. Здоровец, ^{1,2)} И.Е. Кенжина, ³⁾ Е.Е. Шумская, ¹⁾ К.К. Кадыржанов

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
 ²⁾ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
 ³⁾ Беларусь ҰҒА Материалтану Ғылыми-Өндірістік Орталығы, Минск, Беларусь

Зерттеудің синтез шарттарына байланысты Fe нанотүтікшелер құрылымдық қасиеттерінің және магниттік кұрылымының өзгеруін зерттеудің нәтижелері келтірілген. Өндіріс әдісі ретінде күкірт қышқылының электролит ерітінділерінен электрохимиялық синтездеу әдісі қолданылды, кернеу диапазоны 0,25 B қадаммен 1,25-тен 2,0 B-ға дейін болды. Тұндыру жағдайларын магниттік сипаттамаларға және нанотүтіктердің ультратиндік магниттік құрылымдық талдау және Мостбауэр спектроскопиясы қолданылды. Синтезделген нанотүтікшелердің кристалды өсімдіктің текстуралық бағытымен (110), *Im-3m (229)*.темір фазалық кеңістіктік жүйенің торлы-торлы текше торлы сипаттамасымен виськиге ұқсас құрылымдар екендігі анықталды. Мостбауэр мәліметтеріне сәйкес, жалпы жағдайда зерттелген наноқұрылымдардың спектрі төмен қарқынды зееман секстеті және Fe²⁺ және Fe³ катиондарының парамагнитналық күйінің квадраколды дублет сипаттамасы болып табылады. Квадрупол дублетінің болуы құрылымда қоспалардың қосылыстарының болуын көрсетеді, бұл магниттік құрылымның бұзылуына әкеледі, сондай-ақ кристалдық құрылымда қаңистік құрылымда қаңистік құрылымда қаңисталдық қарылымда қаңистік құрылымда өзгерістердің динамикасы және синтез жағдайынан қоспалардың қосындыларының концентрациясы анықталды.

STUDY OF MAGNETIC TEXTURE OF IRON NANOTUBES

^{1,2)} A.L. Kozlovskiy, ^{1,2)} M.V. Zdorovets, ^{1,2)} I.E. Kenzhina, ³⁾ E.E. Shumskaya, ¹⁾ K.K. Kadyrzhanov

¹⁾ Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan ²⁾ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

³⁾ Scientific-Practical Materials Research Centre, National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, Belarus

The paper presents the results of a study of changes in the structural properties and magnetic structure of Fe nanotubes depending on the synthesis conditions. As a method of obtaining, the method of electrochemical synthesis from sulfuric acid electrolyte solutions was used, the voltage range was 1.25 to 2.0 V, with a step of 0.25 V. To study the influence of deposition conditions on the magnetic characteristics and the hyperfine magnetic structure of nanotubes, X-ray diffraction and Mossbauer spectroscopy were used. It has been established that the synthesized nanotubes are whisker-like structures with a textural direction of crystallite growth (110), a body-centered cubic lattice characteristic of the iron phase of the spatial system *Im-3m (229)*. According to the Mossbauer data, the spectra of the studied nanostructures in the general case are a low-intensity Zeeman sextet and a quadrupole doublet characteristic of the paramagnetic state of the Fe²⁺ and Fe³ cations. The presence of a quadrupole doublet indicates the presence of impurity inclusions in the structure, which leads to a disordering of the magnetic texture, as well as the presence of a large number of cationic vacancies in the crystal structure. During the study, the dynamics of changes in the magnetic texture and the concentration of impurity inclusions from the synthesis conditions were established.

УДК 539.23; 539.216.1

ВЛИЯНИЕ ОБЛУЧЕНИЯ ИОНАМИ Fe⁷⁺ НА СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ TiO₂

^{1,2)} Козловский А.Л., ³⁾ Дукенбаев К., ^{1,2)} Здоровец М.В., ¹⁾ Кадыржанов К.К.

Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан
 ²⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
 ³⁾ Школа инженерии, Назарбаев Университет, Астана, Казахстан

Методом магнетронного напыления были получены наноструктурные пленки на основе TiO_2 толщиной 620 нм. Облучение образцов проводилось на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 Астанинского филиала Института ядерной физики ионами Fe^{7+} с энергией 85 МэВ с флюенсом от 1×10^{11} до 1×10^{14} ион/см². Установлены зависимости изменения концентрации дефектов в структуре тонких пленок от дозы облучения. Снижение интенсивностей дифракционных пиков свидетельствует об увеличении микроискажений в структуре, а также образовании областей разупорядоченности. Оценка влияния облучения на аморфизацию и разрушение кристаллической структуры была проведена с применением модифицированного критерия Гриффитса. Установлено, что снижение степени кристалличности в результате облучения приводит к формированию в структуре аморфных включений и снижению радиационной стойкости тонких пленок.

Введение

Одним из важных факторов применения тонкопленочных материалов в качестве микроэлектронных устройств является их устойчивость к различного вида ионизирующему излучению. При взаимодействии ионизирующего излучения с элементами микроэлектронных устройств возникшие дефекты могут привести к дестабилизации и полному отказу работоспособности оборудования, как за счет накопленной дозы, так и одиночных радиационных дефектов [1-6]. Механизмы отказа при облучении, связанные с эффектами смещения, наиболее характерны для подложек на основе полупроводников, изготовленных по биполярной технологии, поскольку их основные характеристики, в основном, определяются объемными свойствами полупроводниковых материалов и характерны в случае воздействия излучения частиц, таких как протоны, альфа-частицы, тяжелые ионы [7-11]. Электронные возбуждения, вызванные процессами ионизации, могут привести к разрушению химических связей, последующим формированиям дефектов в структуре и локальным изменениям барьеров для диффузии атомов и фазовым превращениям. В случае инициированной облучением аморфной трансформации основным источником накопления дефектов в структуре является внутрикаскадная аморфизация [12]. На основании вышесказанного представляет интерес изучение влияния облучения тяжелыми ионами с энергией до 100 МэВ на изменение морфологии, структурных и прочностных свойств, а также фазовых превращений в тонких фольгах брукита.

Экспериментальная часть

Тонкие фольги на основе диоксида титана получали методом высокочастотного магнетронного напыления на стандартной установке *Auto 500* производства *Edwards*, частота генератора 13,56 МГц. Пленки наносили путем распыления мишени из оксида титана производства *K. Lesker (США)*, диаметр мишени 4 см, толщина 0,6 см; расстояние мишеньподложка равнялось 6 см. В качестве рабочего газа использовалась смесь аргона (45 %) и кислорода (55 %). Мощность разряда составляла примерно 240 Вт, давление рабочего газа — 6·10⁻³ мбар. Время напыления 2 минуты на один слой. При указанном времени напыления толщина пленок примерно равнялась 20–25 нм. Толщина полученных фольг составляла 620 нм.

Облучение образцов проводилось на ускорителе тяжелых ионов ДЦ-60 Астанинского филиала Института ядерной физики ионами Fe^{7+} с энергией 85 МэВ с флюенсом от 1×10^{11} до 1×10^{14} ион/см².

Микротвердость исследуемых образцов до и после облучения определялась с помощью цифрового микротвердомера *LM-700 (Leco Corporation, США)*. Индентером служила пирамида Виккерса. Микротвердость (HV) измерялась при нагрузке 100 H.

Оценка изменения структурных свойств и дефектообразования в покрытиях проводилась с применением метода рентгеноструктурного анализа. Рентгеноструктурный анализ (XRD) проводился на дифрактометре *D8 ADVANCE ECO (Bruker, Германия)* при использовании излучения СиКа. Условия съемки рентгеновских дифрактограмм: напряжение – 20 кВ, ток – 5 мА, $2\theta = 40-80^{\circ}$. Максимальная глубина проникновения рентгеновских лучей при таких условиях съемки составляет не более 0,5 мкм для диоксида титана.

Результаты и обсуждение

На рисунке 1 представлена динамика изменения рентгеновских дифрактограмм исследуемых образцов в процессе облучения. Согласно полученным данным, исходный образец представляет собой поликристаллическую структуру диоксида титана орторомбической фазы брукита, пространственной сингонии Pbca(61), с высокой степенью кристалличности (83,7 %) и текстурирования вдоль направления (212).



Рисунок 1. Рентгеновские дифрактограммы исследуемых покрытий. Динамика изменения интенсивностей дифракционных пиков: 1) исходный; 2) 10¹¹ ион/см²; 3) 10¹² ион/см²; 4) 10¹³ ион/см²; 5) 10¹⁴ ион/см²

Флюенс, ион/см²	Фаза	Тип структуры	Средний размер кристаллитов, нм	Параметр ячейки, Å	Степень кристалличности, %	Плотность, г/см ³		
Исходный			64,06±4,05	a=9,20667, b=5,61089, c=5,10917	83,7	4,001		
10 ¹¹			59,45±5,11	a=9,25169, b=5,61143, c=5,11380	81,9	3,985		
10 ¹²	ТіО₂ - Брукит	орторомбическая	орторомбическая	орторомбическая	54,13±5,19	a=9,26195, b=5,61812, c=5,11473	77,1	3,982
10 ¹³			49,26±4,26	a=9,26215, b=5,61240, c=5,11469	76,5	3,974		
1014			43,94±4,82	a=9,26307, b=5,61442, c=5,11567	59,9	3,967		

Таблица 1. Данные кристаллографических характеристик

Как видно из данных, представленных на рисунке 1, в результате облучения не наблюдается появление новых пиков, что свидетельствует о высокой стойкости фольг к имплантации ионов железа в структуру. На основании полученных данных были рассчитаны основные кристаллографические характеристики, изменение которых представлено в таблице 1.

Согласно проведенным расчетам видно, что увеличение флюенса облучения до 10^{13} ион/см² приводит к незначительному изменению степени кристалличности, что обусловлено формированием одиночных изолированных дефектов в структуре в результате облучения, в результате которых образуются каскады вторичных дефектов, способные привести к разрыву химических связей в решетке и образованию первично-выбитых атомов. Увеличение флюенса облучения до 10^{14} ион/см², характерного для формирования областей перекрывания дефектов, приводит к резкому снижению степени кристалличности и увеличению параметров кристаллической решетки, что обусловлено образованием в структуре большого количества областей разупорядоченности и смещенных атомов, которые, мигрируя по кристаллической решетке, приводят к дополнительным искажениям и напряжениям. При этом изменение параметров кристаллической решетки приводит к изменению объема решетки и, следовательно, плотности покрытия. Плотность рассчитывалась с помощью формулы (1):

$$p = \frac{1,6602 \sum AZ}{V_0},$$
 (1)

где V_0 – объем элементарной ячейки, Z – число атомов в кристаллической ячейке, A – атомный вес.

Результаты изменения плотности представлены в таблице 1.

Как видно из представленных данных таблицы 1 увеличение флюенса облучения приводит к снижению плотности исследуемых образцов, что обусловлено образованием областей разупорядоченности в структуре. При этом наблюдается изменение формы и интенсивности дифракционных пиков, что говорит об изменении концентрации дефектов и напряжений в структуре, а также формированию дополнительных искажений кристаллической решетки вследствие ионизационных потерь и образовавшихся каскадов дефектов.

Увеличение параметров кристаллической решетки и снижение плотности за счет образования областей разупорядоченности и смещенных атомов в структуре приводит к изменению межплоскостных расстояний и увеличению деформации и напряжениям в структуре кристаллической решетки. Увеличение напряжений и искажений может оказать существенное влияние на прочностные свойства и трещинообразование в структуре под действием облучения.

Для исследования влияния ионизирующего излучения на изменение морфологии поверхности и оценки элементного состава образовавшихся включений были применены методы атомно-силовой микроскопии и энерго-дисперсионного анализа.



10¹³ ion/cm²



На рисунке 2 представлены 3D изображения динамики изменения морфологии поверхности исследуемых образцов до и после облучения.







Рисунок 2. 3D-изображения изменения морфологии поверхности TiO2

Как видно из представленных 3D-изображений, поверхность исходного образца характеризуется относительно низкой шероховатостью и неровностью, что свидетельствует о достаточно равномерном формировании слоев в результате магнетронного напыления. Наличие небольших неровностей может быть обусловлено незначительными неровностями поверхности подложки. Для облученных малыми флюенсами образцов наблюдается появление пирамидообразных включений на поверхности, наличие которых обусловлено миграцией дефектов в процессе облучения к стокам дефектов с последующим образованием хиллоков. При этом концентрация хиллоков на поверхности увеличивается с увеличением флюенса облучения. Однако при флюенсе облучения 10¹⁴ ион/см² наблюдается появление трещин и кратеров, что свидетельствует о резком снижении прочностных свойств исследуемых образцов и увеличению шероховатости и волнистости.

Заключение

В ходе исследования получены результаты динамики изменения структурных свойств и морфологии поверхности тонких фольг на основе TiO₂ в зависимости от флюенса облучения ионами Fe⁷⁺ с энергией 85 МэВ. Выбор энергии налетающих ионов обусловлен возможностью моделирования процессов одиночных дефектов и областей перекрывания дефектов в структуре при энергиях налетающих ионов до 100 МэВ. Установлено, что снижение плотности и образование большого количества областей разупорядоченности в структуре приводит к снижению радиационной стойкости и стрессоустойчивости исследуемых образцов. Установлено, что увеличение флюенса облучения до 10¹⁴ ион/см², характерного для формирования областей перекрывания дефектов, приводит к резкому снижению степени кристалличности и увеличению параметров кристаллической решетки, что обусловлено образованием в структуре большого количества областей разупорядоченности и смещенных атомов, которые, мигрируя по кристаллической решетке, приводят к дополнительным искажениям и напряжениям, с последующим образованием хиллоков.

Литература

- 1. Sung-Suh H. M. et al. Comparison of Ag deposition effects on the photocatalytic activity of nanoparticulate TiO₂ under visible and UV light irradiation //Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2004. Vol. 163. №. 1-2. P. 37-44.
- Wang Q. et al. Change of adsorption modes of dyes on fluorinated TiO₂ and its effect on photocatalytic degradation of dyes under visible irradiation //Langmuir. – 2008. – Vol. 24. – №. 14. – P. 7338-7345.
- Asiltürk M., Sayılkan F., Arpaç E. Effect of Fe3+ ion doping to TiO₂ on the photocatalytic degradation of Malachite Green dye under UV and vis-irradiation //Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. – 2009. – Vol. 203. – №. 1. – P. 64-71.
- 4. Sayılkan H. Improved photocatalytic activity of Sn4+-doped and undoped TiO₂ thin film coated stainless steel under UV-and VIS-irradiation //Applied Catalysis A: General. 2007. Vol. 319. P. 230-236.
- Meng Z. D., Zhang K., Oh W. C. Preparation of Fe-AC/TiO₂ composites and pH dependence of their Photocatalytic activity for methylene blue //Journal of the Korean Crystal Growth and Crystal Technology. – 2009. – Vol. 19. – №. 5. – P. 268-276.
- Neren Ökte A., Akalın Ş. Iron (Fe³⁺) loaded TiO₂ nanocatalysts: characterization and photoreactivity //Reaction Kinetics, Mechanisms and Catalysis. - 2010. - Vol. 100. - №. 1. - P. 55-70.
- 7. Hossain M. F., Naka S., Okada H. Annealing effect of E-beam evaporated TiO₂ films and their performance in perovskite solar cells //Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry. 2018. Vol. 360. P. 109-116.
- Bharati B., Mishra N. C., Rath C. Effect of 500 keV Ar²⁺ Ion Irradiation on Structural and Magnetic Properties of TiO₂ Thin Films Annealed at 900 C //Applied Surface Science. – 2018. – P. 1-10.
- 9. Agashe K. et al. Effect of gamma irradiation on resistive switching of Al/TiO₂/n+ Si ReRAM //Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. 2017. Vol. 403. P. 38-44.
- 10. Aguirre M. et al. Accelerated ageing of hybrid acrylic waterborne coatings containing metal oxide nanoparticles: Effect on the microstructure //Surface and Coatings Technology. 2017. Vol. 321. P. 484-490.
- 11. Garlisi C., Palmisano G. Radiation-free superhydrophilic and antifogging properties of e-beam evaporated TiO₂ films on glass //Applied Surface Science. – 2017. – Vol. 420. – P. 83–93.
- 12. Abubakar S. et al. The gamma irradiation responses of yttrium oxide capacitors and first assessment usage in radiation sensors //Sensors and Actuators A: Physical. – 2017. – Vol. 258. – P. 44-48.

ФАЗА Fe⁷⁺ ИОНДАРЫМЕН СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ЖҰҚА ТіО₂ ҚАБЫРШАҚТАРЫНА ҚҰРЫЛЫМДЫҚ СИПАТТАМАЛАРЫНА ӘСЕРІН ЗЕРТТЕУ

^{1,2)} А.Л. Козловский, ³⁾ К. Дукенбаев, ^{1,2)} М.В. Здоровец, ¹⁾ К.К. Кадыржанов

Л.Н. Гумилев атындагы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан
 ²⁾ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
 ³⁾ Назарбаев Университетінің Инженерия мектебі, Астана, Қазақстан

620 нм қалыңдығы бар TiO₂ негізіндегі наноқұрылымды пленкалар магнетронды шашырау арқылы алынды. Сынамалар 85 МэВ энергиясы бар Fe⁷⁺ иондары бар Ядролық физика институтының Астана қаласындағы филиалының ауыр еріткіш үдеткіші ДЦ-60-та 1×10¹¹-ден 1×10¹⁴ ион/см² -ге дейін сәулелендірілді. Сәулелік дозада жұқа пленкалар құрылымында ақаулардың шоғырлануындағы өзгерістердің тәуелділігі белгіленді. Төмендету дифракционды шыңдардың қарқындылығы құрылымдағы микро қажалудың өсуін, сондай-ақ бұзылу аймақтарын қалыптастыруды көрсетеді. Сәулеленудің аморфтануға және кристалдық құрылымның бұзылуына әсерін бағалау жаңартылған Гриффит өлшемі бойынша жүргізілді. Сәулелену нәтижесінде кристалл дәрежесінің төмендеуі құрылымда аморфты қосындылар пайда болуына және жұқа қабыршақтардың сәулелену қарсылығын төмендеуге әкеп соқтырады.

INFLUENCE OF IRRADIATION WITH Fe⁷⁺ IONS ON THE STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF TiO₂ FILMS

^{1,2)} A.L. Kozlovskiy, ^{1,2)} M.V. Zdorovets, ³⁾ K. Dukenbyev, ¹⁾ K.K. Kadyrzhanov

¹⁾ Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
 ²⁾ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
 ³⁾ School of Engineering, Nazarbayev University, Astana, Kazakhstan

Nanostructured films based on TiO₂ with a thickness of 620 nm were obtained by magnetron sputtering. The samples were irradiated at the DC-60 heavy ion accelerator of the Astana branch of the Institute of Nuclear Physics with Fe⁷⁺ ions with an energy of 85 MeV at the fluence of 1×10^{11} to 1×10^{14} ions/cm². The dependences of the change in defects concentration in the structure of thin films from the irradiation dose are established. A decrease in intensities of diffraction peaks indicates an increase in microdistortions in the structure, as well as the formation of regions of disorder. Evaluation of the effect of irradiation on amorphization and destruction of the crystal structure was carried out using a modified Griffiths criterion. It has been established that a decrease in the degree of crystallinity as a result of irradiation leads to the formation of amorphous inclusions in the structure and a decrease in the radiation resistance of thin films.

УДК 621.039.9

ПРИМЕНЕНИЕ 3D-СКАНИРОВАНИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОЙ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИЗВЕСТНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЯДЕРНОГО МАТЕРИАЛА В ЦЕЛЯХ ПРОТИВОДЕЙСТВИЯ ИХ НЕЗАКОННОМУ ОБОРОТУ

¹⁾ Горин Н.В., ¹⁾ Воронин Е.В., ¹⁾ Пачурин Д.В., ¹⁾ Стародумова И.Г., ²⁾ Орлова Н.Ю., ²⁾ Орлов Ю.А., ²⁾ Горбатов И.В.

¹⁾ Российский Федеральный ядерный центр Всероссийский научно-исследовательский институт технической физики имени академика Е.И. Забабахина, Снежинск, Россия ²⁾ Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» Снежинский физико-технический институт, Снежинск, Россия

Предложен способ дистанционной идентификации путем применения технологии 3D-сканирования на этапе сбора информации о неизвестной детали. Показано, что, в отличие от цифровой фотографии, использование 3D-модели на основе трехмерного скан-образа неизвестной детали упрощает анализ ее внешнего вида (формы, конструктивных особенностей), позволяет более точно определить важные идентификационные параметры (геометрические размеры и плотность) и, как следствие, дает возможность с большей вероятностью прогнозировать ее происхождение. Продемонстрирована методика сравнительного анализа отсканированной детали и ее предполагаемого базового прообраза путем совмещения соответствующих 3D-моделей средствами программного комплекса *Creo Parametric*.

Введение

В ходе оперативных мероприятий у правоохранительных органов может возникнуть необходимость срочной идентификации обнаруженной неизвестной детали с целью опровергнуть или подтвердить подозрения о ее изготовлении из ядерных материалов. Зачастую, в отсутствии дополнительной оперативной информации, единственно возможной остается идентификация техническими средствами для ответа на вопросы «Что это?», «Чье это?» и «Где изготовлено?». Первым из этих вопросов занимается ядерная криминалистика (nuclear forensics), которая нацелена на идентификацию материала (ядерный или не ядерный?). В область ее задач входят: измерение спектров, определение изотопного и элементного состава, обогащения, плотности и примесей. Однако, одно лишь определение материала детали как «ядерного» не поможет установить место ее изготовления, эксплуатации и хищения и, поэтому, не сможет предотвратить возможное продолжение незаконного оборота.

На заводах-изготовителях на каждую деталь ядерного материала оформляют паспорт и если идентифицировать деталь, а не материал, то из ее паспортных данных станут известны перечисленные выше характеристики материала и эксплуатирующее предприятие. Возможно, что таких предприятий окажется несколько, так как разные предприятия могут эксплуатировать одинаковые детали, выпускаемые разными заводами-изготовителями. Однако, их не может быть много, и информация будет полезна правоохранительным органам – как только проведена идентификация, пусть даже с небольшой неопределенностью, то становятся понятны дальнейшие шаги по противодействию незаконному обороту.

С целью обеспечить возможность идентификации деталей из ядерных материалов РФЯЦ-ВНИИТФ предложил создать единую базу данных на основе паспортных данных всех деталей из ядерных материалов [1-8]. Такая база должна содержать чертежи и трехмерные модели деталей, данные о материале каждой из них, его обогащении, плотности, элементном составе, легирующих добавках и примесях, а также информацию об изготовителях деталей и историю эксплуатации. Эксперт проводит измерения с неизвестной деталью, сравнивает свои результаты с величинами в одноименных полях в базе данных по каждой летали ЯМ и при их совпалении считает, что неизвестная деталь идентифицирована и он получает доступ к паспортам детали с указанием мест ее изготовления и истории эксплуатации. Одновременно эксперт получит из базы данных трехмерную модель детали, построенную по ее чертежу, и для надежности идентификации необходимо сравнить ее со сканированной трехмерной моделью. Их совпадение в пределах тех или иных погрешностей - дополнительный аргумент в пользу идентификации.

В результате эксперт получает ответы на все три поставленных выше вопроса.

На первом этапе эксперту достаточно проанализировать совокупность форм детали (тел и полостей) и их размеры, т.е. провести идентификацию «по внешнему виду». Далее возможно более сложное измерение плотности материала, определение обогащения, элементного и изотопного состава.

Ранее рассмотрены особенности идентификации неизвестной детали из ядерного материала при ручном обращении [1–6] и при дистанционной идентификации [7, 8] с использованием цифровых фотографий детали, пересылаемых с места задержания в идентификационный центр. В настоящей работе силами двух научных центров РФЯЦ-ВНИИТФ и НИЯУ МИФИ независимо, с использованием разного оборудования и программного обеспечения, продемонстрирована эффективность применения технологии 3D-сканирования в алгоритме дистанционной идентификации. При этом были учтены и смоделированы особенности условий сканирования вне специализированных центров, не позволяющие получить качественный скан-образ.

МОДЕЛИ ДЕТАЛЕЙ ЯДЕРНОГО МАТЕРИАЛА

Для демонстрации дистанционной идентификации на основе трехмерного скан-образа детали был использован набор макетов из инертного материала – полусфера, полусфера с четырьмя полукруглыми отверстиями у основания и одним отверстием в полюсе, конус, плоский диск с центральным отверстием и обломок графитовой детали (рисунок 1).



Рисунок 1. Внешний вид макетов деталей ядерного материала

Данный набор внешне различных макетов выбран для того, чтобы продемонстрировать анализ различных форм с использованием 3D-моделей, сформировать у эксперта представления об облике детали, а также отработать навык восстановления формы исходной детали по форме ее фрагмента.

Кроме того, макеты изготовлены из разных материалов – стали, сплава алюминия и графита. Такое разнообразие позволит продемонстрировать возможность быстрого и точного определения плотности материала отсканированного макета с использованием его 3D-модели. Следует отметить, что возможность дистанционной идентификации по мелким особенностям конструкции, когда один линейный размер на два порядка отличается от другого, продемонстрирована ранее в методе с использованием цифровых фотографий [7, 8].

ПРОЦЕСС СКАНИРОВАНИЯ И ИДЕНТИФИКАЦИИ

Трехмерные сканеры используются во многих областях, в частности, они успешно решают задачи реверсивного инжиниринга, контроля формы объектов, для оценки износов оснастки, создания упаковки, точно повторяющей форму изделия, таким образом, они необходимы во всех случаях, когда требуется зарегистрировать форму объекта с высокой точностью за короткое время. Они позволяют упростить и ускорить процесс, исключить большой объём ручного труда, уменьшить количество используемого мерительного инструмента, повысить точность, а также выполнить задачи, которые другими способами решить очень трудоёмко или невозможно. В настоящее время технологии сканирования с учётом особенностей объекта в России не разработаны и для процесса идентификации объектов не используются.

Для идентификации использована технология объёмного сканирования. Ее преимущества:

- малое время получения 3D-модели изделия;
- высокая степень детализации 3D-модели;

 возможность последующей обработки и модернизации 3D-модели отсканированного объекта.

На примерах трех макетов продемонстрируем возможности идентификации в различных условиях с применением трехмерного сканирования. Для сканирования использован бесконтактный способ с текстурированным светом, т.е. оптическая технология сканирования (3D-сканер *RangeVision Standart+*).

Процесс получения 3D-модели детали посредством ее трехмерного сканирования состоит из следующих этапов:

 Получение единичных сканов (среднее время подсветки сканируемого объекта 7 с, время обработки данных скана 5 с). Количество единичных сканов зависит от сложности контролируемой поверхности;

 Объединение (сшивание) единичных сканов в единую трехмерную структуру (скан-образ) с использованием специализированных программ;

- Очистка скан-образа от шумов;
- Создание 3D-модели на основе скан-образа.

В качестве усложнений условий сканирования выбраны наиболее часто встречающиеся на нестационарных пунктах контроля, т.е. не в лабораторных условиях – изменяющаяся в процессе сканирования освещённость и наличие вибраций, которые приводят к появлению в скане участков поверхности с неопределёнными координатами.

Идентификация полусферы (№1)

Сканирование макета полусферы проведено в наилучших лабораторных условиях, в результате чего получено минимальное количество точек с неопределенными координатами.

В левой части рисунка 2 представлена базовая 3Dмодель, построенная по чертежу исходной детали, ее поверхность обозначена серым цветом. В правой части рисунка – трехмерный скан-образ детали, голубым цветом обозначена надежно отсканированная поверхность, а темным – области точек с неопределёнными координатами, т.е. – неотсканированные. Суммарная площадь таких неопределенных областей невелика, не более 5–8 % от общей площади поверхностей детали. Это позволяет безошибочно определить форму отсканированной детали и особенности ее конструкции. Так, например, у основания детали виден центрирующий буртик для ее соединения с ответной частью, и эксперт может допустить существование второй аналогичной полусферы с ответным буртиком.



Рисунок 2. Базовая 3D-модель и скан-образ полусферы (№1)

Форма детали достаточно простая и для получения ее 3D-модели достаточно 20 сканов, при этом было произведено сканирование как наружной, так и внутренней поверхности детали. Точность сканирования составляет 0,02 мм. В результате объединения (сшивания) единичных сканов получен результирующий трехмерный скан-образ (рисунок 2), на основе которого в дальнейшем создана 3D-модель. С использованием CAD-программ проведено измерение габаритных размеров 3D-модели, определение ее объёма (таблица 1) и проанализировано их совпадение с соответствующими геометрическими параметрами базовой 3D-модели. Результат указанного анализа приведен на рисунке 3.

Логично предположить, что деталь изначально была изготовлена с хорошим качеством, и допуски размеров не превосходили 0,1 мм. В результате незаконного оборота деталь могла получить повреждения. Фактические размеры такой детали будут отличаться от базовых. Поэтому сравнительный анализ геометрии целесообразно проводить для различных величин размерных допусков, а также, учитывая, что модель поврежденной поверхности представляет собой сложную, многоэлементную структуру, определять статистические характеристики измеряемых для нее параметров и, таким образом, получать наиболее достоверные результаты (рисунок 3).



а – цветовая идентификация сравнения детали;

б, в – отклонение определённых точек от трехмерной модели, построенной по чертежу;

г – цветовая шкала сравнения;

д – числовые значения габаритных размеров.

Рисунок 3. Количественные результаты сравнения 3D-моделей полусферы (№1)

По результатам сравнительного анализа (рисунок 3) видно, что наружная поверхность исследуемой модели на 86 % находится в поле допуска, внутренняя поверхность на 43 % находится в поле допуска, а остальная часть имеет размер несколько меньший в основном на 0,05-0,07 мм, но не более чем на 0,1 мм. Это можно трактовать как износ внутренней поверхности. Доверительный интервал действительных отклонений всей поверхности полусферы составляет ±0,18 мм (P=0,96). Используя специализированную программу, можно оценить наибольшие отклонения геометрии исследуемой 3D-модели от базовой. Вкладка «б» - наибольшее значение отклонений «из тела» (+1,046 мм). В реальности это может означать, например, налипание герметика. Вкладка «в» - наибольшее значение отклонений «в тело» (-1,0369 мм), что можно трактовать, как механическое повреждение. Участки поверхности с данными отклонениями чётко определены и это позволяет предположить причины их возникновения.

На основании вышесказанного можно утверждать, что исследуемая 3D-модель полусферы (№1) соответствует своему базовому прототипу, и эксперт может принять решение о ее успешной идентификации.

Идентификация конуса (№2)

Для идентификации конуса были смоделированы ухудшенные условия сканирования, и для большего числа точек не были определены координаты. Суммарная площадь неотсканированных поверхностей больше, чем при сканировании предыдущей детали – около 15–18 % от общей площади поверхностей детали, тем не менее, скан правильно передает облик детали – тонкостенный конус с углом раствора 90 градусов.

Результат сравнительного анализа исследуемой 3D-модели конуса (№2) от соответствующей базовой 3D-модели показан на рисунке 4.



а - цветовая идентификация сравнения совмещенных моделей;

б - цветовая шкала сравнения;

в – числовые значения отклонений размеров исследуемой 3D-модели от базовой 3D-модели.

Рисунок 4. Результаты сравнения 3D-моделей конуса (№2)

Несмотря на ухудшенное качество сканирования, в данном случае, как и для полусферы, можно утверждать, что исследуемая 3D-модель конуса (№2) соответствует своему базовому прототипу, и эксперт может принять решение об успешной идентификации.

Идентификация полусферы с отверстиями (№3)

Для идентификации полусферы с отверстиями (№3) условия сканирования макета были еще более ухудшены. Суммарная площадь неотсканированных участков поверхностей получилась большей, чем при сканировании конуса – около 38% от общей площади поверхностей детали, тем не менее, скан правильно передал облик детали – тонкостенная полусфера с одним отверстием в полюсе и четырьмя полукруглыми отверстиями у основания. Характерная форма полусферы предполагает существование второй, ответной детали, при совмещении с которой образовывалась бы цельная сферическая оболочка с замкнутыми круглыми отверстиями по экватору. Такое предположение позволяет отыскать в базе данных 3D-модель соответствующей исходной детали.

Результат сравнительного анализа исследуемой 3D-модели полусферы с отверстиями (№3) и соответствующей базовой 3D-модели показан на рисунке 5.



а – цветовая идентификация сравнения совмещенных моделей;
 б – цветовая шкала сравнения;

в – числовые значения отклонений размеров исследуемой 3D-модели от базовой 3D-модели.

Рисунок 5. Результаты сравнения 3D-моделей полусферы с отверстиями (№3)

По результатам анализа полусферы с отверстиями видно (рисунок 5), что, как и в предыдущих примерах, 3D-модель отсканированной полусферы с отверстиями соответствует базовой 3D-модели, и эксперт может принять решение об успешной идентификации детали.

Идентификация обломка графитовой детали (№5)

При идентификации обломка (рисунок 6) эксперту необходимо сначала восстановить облик целой детали по ее фрагменту и только потом идентифицировать предполагаемую исходную деталь. При визуальном исследовании обломка логично допустить, что исходная деталь геометрически представляла собой параллелепипед с отверстием. Такое допущение позволяет отыскать возможный вариант соответствующей детали в базе данных. Алгоритм действий эксперта в этой ситуации, его взаимодействие с базой данных по деталям ядерного материала рассмотрен в [7].



Рисунок 6. Определение диаметра цилиндрического участка 3D-модели макета графитового обломка и результат встраивания в базовую модель предполагаемой исходной детали

Диаметр отверстия базовой модели предполагаемой исходной детали составляет 67 мм. Поверхность графитового обломка сильно повреждена, наименее поврежденным является участок цилиндрической поверхности, который и должен быть исследован с использованием полученной 3D-модели. Диаметр цилиндрического участка не может быть измерен стандартными методами. Для этого на основе вершин выступающих неровностей по границе предполагаемого отверстия строится вспомогательная окружность. Включая в себя граничные точки цилиндрической поверхности, такая окружность позволяет определить приближенное значение ее диаметра как 67,54±0,15 мм (рисунок 6). С учетом погрешности метода измерения и предполагаемого истирания поверхности, можно говорить о совпадении диаметров цилиндрических поверхностей для модели отсканированного обломка и для соответствующей базовой детали. В завершении проводится встраивание исследуемой 3D-модели обломка в каркас базовой 3D-модели предполагаемой исходной детали, менее поврежденная цилиндрическая поверхность используется как опорная (рисунок 6). Результатом проведенных исследований 3D-модели отсканированного обломка является подтверждение достоверности сделанного предположения об исходной детали.

ИЗМЕРЕНИЕ ПЛОТНОСТИ МАТЕРИАЛА ОТСКАНИРОВАННЫХ МАКЕТОВ

Одно из преимуществ использования трехмерного сканирования в нашем методе – возможность достаточно просто программным способом вычислять объем 3D-модели отсканированной детали для дальнейшего определения плотности детали по известному объему и массе. Совпадение значений плотности детали и плотности ядерного материала является самым надежным идентификационным критерием.

В таблице 1 представлены результаты измерений геометрических размеров и определения плотностей с использованием 3D-моделей отсканированных макетов. Взвешивание макетов проведено на лабораторных весах с погрешностью не более 0,01 г.

Результаты измерений размеров 3D-моделей отсканированных макетов, объемов этих моделей и полученные значения плотностей соответствуют базовым величинам в пределах допустимых погрешностей. Действительно, полусфера изготовлена из стали, конус из сплава алюминия, обломок из графита, табличные значения их плотностей ~7,85, ~2,7 и 1,7...2,3 г/см³, соответственно, и вычисленные плотности деталей соответствуют плотностям перечисленных материалов. Однако, плотность полусферы с отверстиями (№3) определена с большой погрешностью из-за неточного вычисления объема 3D-модели с большой долей (38 %) неотсканированных участков поверхности. Учитывая успешную идентификацию данной детали по остальным признакам, можно принять такую погрешность за допустимый предел при измерениях в неспециализированных идентификационных центрах, т.е. в местах задержания детали.

Внешний вид макета	Параметр	В базовой 3D-модели	Для 3D-модели отсканированной детали	Для макета (вручную)
	Ø _{наруж.} , мм	74	73,72	74
	Ø _{внутр.} , мм	10	10,57	10,5
0	h, мм	4	4,25	4,2
	V, см ³	16,9	17,72	—
	М, г	132,67	1	132,11
	р, г/см ³	7,85	7,46	—
	R1, мм	30	29,71	29,95
	S, мм	3	2,54	2,95
	V, см ³	14,5	16,405	—
	М, г	113,82	_	124,36
	р, г/см ³	7,85	7,57	_
	R1, мм	40	40,315	40,35
	R₂, мм	38	38,44	38,35
3	R _{1 отв.} , мм	2,5	2,8	2,75
	R _{2 отв.} , мм	12,5	12,5	12,4
	V, см ³	17	15,59	-
	М, г	133,45	—	134,99
	р, г/см³	7,85	8,66	—
(min)	а _{раствора} , град	90	91,04	90
	Ø _{наруж.} , мм	96	96,558	96,4
	Ø _{внутр.} , мм	57	57,6	57,2
	V, см ³	10,4	9,982	—
	М, г	28,08	1	28,08
	р, г/см³	2,7	2,81	—
	L1, мм	100	99,46	—
	L ₂ , мм	170	170,4	—
	D, мм	67	67,5422	—
12/18/17/20	V, см ³	_	311,4	_
A CARLER COMPANY	М, г	_	-	520,71
	р, г/см ³	2	1,67	—

Таблица 1. Результаты ручных измерений для макетов деталей и измерений программным способом для 3D-моделей отсканированных макетов

Заключение

Таким образом, с использованием макетов деталей разных форм проведено моделирование действий эксперта в идентификационном центре и показана возможность успешной дистанционной идентификации деталей с применением технологии их трехмерного сканирования.

3D-модель, созданная на основе трехмерного скан-образа, даже при 38 % неотсканированных участков поверхности, позволяет правильно передать облик и особенности конструкции детали.

Использование технологии трехмерного сканирования позволяет достаточно быстро и с высокой точностью создавать 3D-модели отсканированных деталей, которые в последующем пригодны для проведения всевозможных контрольных операций - измерение, сравнение и пр.

Трехмерные скан-образы низкого качества, полученные в месте задержания детали, могут быть переданы в специализированные центры для дальнейшей квалифицированной обработки. Использование технологии трехмерного сканирования вместо цифровой фотографии неизвестной детали значительно повышает надежность и точность ее идентификации.

С применение 3D-модели, созданной на основе трехмерного скан-образа, возможно быстрое и точное определение плотности отсканированной детали, что в большинстве случаев является важнейшим параметром идентификации.

Благодарности

Авторы считают своим приятным долгом поблагодарить специалистов РФЯЦ-ВНИИТФ – Ф.Ф. Исламгулова за предоставленные макеты деталей и С.В. Кузнецову за изготовление их цифровых фотографий, руководителя НИЯУ МИФИ О.В. Линник за содействие в проведении работ и специалиста «Центра аддитивных и лазерных технологий» А.А. Пильщикова.

Литература

- Горин Н.В., Чуриков Ю.И., Щербина А.Н., Бобылев А.И., Ровный С.И., Архангельский Н.В., Комков О.В., Павшук В.А., Вурим А.Д., Гайдайчук В.А. Идентификация топливных деталей исследовательских реакторов // Атомная энергия, 2007, т.102, вып.4, с.233-237.
- Дерявко И.И., Чернядьев В.В., Горин Н.В., Черепнин Ю.С., Тухватулин Ш.Т. Особенности идентификации стержневых твэлов ЯРД // Вестник НЯЦ РК, выпуск 4, стр. 95-105, октябрь 2010.
- Бакланов В.В., Гныря В.С., Горин Н.В., Дерявко И.И., Кенжин Е.А., Колбаенков А.Н., Павшук В.А., Тухватулин Ш.Т., Черепнин Ю.С., Чернядьев В.В. Идентификация цирконий-урановых твэлов исследовательского реактора ИВГ.1М // Вестник НЯЦ РК, выпуск 2(46), стр.91-97, 2011.
- Горин Н.В., Чуриков Ю.И. Корнеев А.А., Волошин Н.П., Архангельский Н.В., Простаков В.И., Дикарев В.С., Павшук В.А., Абалин С.С., Шведов О.В., Дерявко И.И., Колбаенков А.Н. Возможности идентификации твэлов/ТВС исследовательских реакторов СССР и США первого поколения // Атомная энергия, 2012, т.113, вып.4, с.218-222.
- Горин Н.В., Корнеев А.А., Липилина Е.Н., Чуриков Ю.И., Архангельский Н.В. База данных по исследовательским реакторам как инструмент противодействия незаконному обороту ядерных материалов // Вестник НЯЦ РК, выпуск 1 (53), стр.94-102, 2013.
- 6. Горин Н.В., Волошин Н.П., Корнеев А.А., Липилина Е.Н., Стародумова И.Г., Простаков В.И., Чуриков Ю.И., Шмаков Д.В., Скаков М.К., Чернядьев В.В. Система тренинга экспертов по идентификации неизвестных топливных деталей исследовательских реакторов, как инструмент противодействия незаконному обороту ядерных материалов // Вестник НЯЦ РК, выпуск 3 (67), стр.23-27, 2016.
- 7. Горин Н.В., Корнеев А.А., Пачурин Д.В., Стародумова И.Г., Липилина Е.Н., Чуриков Ю.И., Шмаков Д.В. Дистанционная идентификация неизвестных деталей ядерного материала, как инструмент противодействия их незаконному обороту // Препринт РФЯЦ-ВНИИТФ, №256, 2017.
- 8. Горин Н.В., Корнеев А.А., Пачурин Д.В., Стародумова И.Г., Липилина Е.Н., Чуриков Ю.И., Шмаков Д.В. Дистанционная идентификация неизвестных деталей ядерного материала, как инструмент противодействия их незаконному обороту // Вестник НЯЦ РК, выпуск 4 (72), стр. 110-117, 2017.

ЯДРОЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДАН ЖАСАЛҒАН БЕЛГІСІЗ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЗАҢСЫЗ АЙНАЛЫМЫНА ҚАРСЫ ТҰРУ МАҚСАТЫНДА ОЛАРДЫ ҚАШЫҚТАН СӘЙКЕСТЕНДІРУГЕ АРНАЛҒАН 3D-СКАНЕРЛЕУДІ ҚОЛДАНУ

¹⁾ Н.В. Горин, ¹⁾ Е.В. Воронин, ¹⁾ Д.В. Пачурин, ¹⁾ И.Г. Стародумова, ²⁾ Н.Ю. Орлова, ²⁾ Ю.А. Орлов, ²⁾ И.В. Горбатов

¹⁾ Ресей Федералдық ядролық орталығы, Академик Е.И. Забабахин атындағы Бүкілресейлік техникалық физика ғылыми-зерттеу институты, Снежинск, Ресей

²⁾ «МИФИ» Ұлттық ядролық зерттеу университеті, Снежинск физика-техника институты, Снежинск, Ресей

Белгісіз бөлшек туралы ақпаратты жинау кезеңінде 3D-сканерлеу технологиясын қолдану жолымен қашықтан сәйкестендіру тәсілі ұсынылды. Цифрлық фотосуреттерге қарағанда белгісіз бөлшектің үшөлшемді скан-бейнесі негізінде 3D-моделдеуді қолдану оның сыртқы түрін (пішінін, конструктивтік ерекшеліктерін) талдауды жеңілдететіні, маңызды сәйкестендіру параметрлерін (геометриялық өлшемдері мен тығыздығы) неғұрлым нақты анықтауға мүмкіндік беретіні көрсетілді және нәтижесінде оның шығу тегін нақтырақ болжауға мүмкіндік береді. Сканерленген бөлшекті және оның болжамды базалық түпбейнесін *Creo Parametric* программалық кешен құралдарымен сәйкес 3D-моделдерді қиыстыру жолымен салыстырмалы талдау әдістемесі көрсетілді.

3D-SCANNING USED FOR REMOTE IDENTIFIABILITY OF NUCLEAR MATERIAL COMPONENTS AS A NUCLEAR ILLICIT TRAFFICKING COUNTERMEASURE

¹⁾ N.V. Gorin, ¹⁾ E.V. Voronin, ¹⁾ D.V. Pachurin, ¹⁾ I.G. Starodumova, ²⁾ N.Yu. Orlova, ²⁾ Yu.A. Orlov, ²⁾ I.V. Gorbatov

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

²⁾ Snezhinsk Physics and Technology Institute of the National Research Nuclear University "MEPhI", Snezhinsk, Russia

3D-scanning at the stage of collecting data on an unknown component is proposed as a method to improve the remote identification efficiency. In contrast to the digital photo image, the 3D-model based on the 3D-scanned image of an unknown component is shown to simplify analyzing the external view of this component (shape, design features), to allow higher-precision determination of its important identification parameters (geometrical dimensions and density), and as a consequence, higher-probability prediction of its origin. The comparative analysis of the scanned component and its anticipated basic preimage through superposition of 3D-models by means of Creo Parametric software package is demonstrated.

ƏOK 533.9.082

«ПЛАЗМАЛЫҚ ФОКУС-30» ТЕРМОЯДРОЛЫҚ ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ СТАТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІН ЗЕРТТЕУ

Ж.М. Молдабеков, А.М. Жукешов, А.Т. Габдуллина, А.У. Амренова, Қ. Серік

әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

Куатты импульсты разрядтардағы плазманың динамикасын зерттеу, термоядролық реактордың жаңа ұрпағын жасауда және өнеркәсіп үшін нейтронды сәулеленуді қуатты рентген көздерін алуда үлкен ғылыми және тәжірибиелік маңызға ие. Осы мақалада плазмалық фокус-30 (ПФ-30) коаксиалды геометриялық электродымен бастапқы 0,1 торр газ қысымындағы жұмысы зерттелді. 0,1 торр газ қысымындағы токтардың таралуы зерттелді, ПФ-30 термоядролық реакторының статикалық параметрлері анықталды. Бастапқы 0,1 торр газ қысымындағы, 16 кВ кернеудегі КПҮ-30 мен ПФ-30 қондырғыларының разрядты тоғы салыстырылды.

Кілттік сөздер: Плазмалық фокус, статикалық параметрлер, разрядты тоқ.

Кіріспе

«Плазмалық фокус» құбылысы ХХ ғасырдың орталарында Н.В. Филиппов (ССРО) [1] пен Дж. Мэйзердің (J. Mather, АҚШ) [2] басқарылатын термоядролық синтез бағдарламасы бойынша жүргізілген зерттеулерге тәуелсіз ашылды. Плазмалық фокусты экспериментальдық қондырғы, немесе «плазмалы фокус» (ағылшын тілінен баламасыdense plasma focus (DPF)) айтарлықтай қарапайым екі электродты газ толтырылатын электр разрядты прибор [3]. Бәрінен бұрын плазмылқ фокус қондырғысы зерттеушілердің өзіне деген қызығушылығын, жұмыс камерасында сиретілген дейтерии сутегі изотоптарын толтырған кезде, камера арқылы разрядты токтың өтуімен, жүздеген килоамперді өлшеу мен камера ішінде қуатты қысқа импульсті нейтронды және рентгенді сәулеленудің пайда болуымен байланыстырады [4]. Алғашқы ПФ қондырғысы 50 кДж деңгейінде энерия қоры болды. Осыдан кейін кондырғыларда нейтрондардың шығуы импульсына ~10⁹ нейтронды құрады. ПФ қондырғысы үшін нейтронның импульсінің ұзақтығы ~100 нс жетті. Нейтронның әдеттегі энергиясы 2,45 МэВ, ол әлі күнге дейін термоядролық процестердің болуы жайындағы пікірталасты тудырады [3-4].

Бүкіл әлем бойынша оннан көп ПФ типті қондырғылар бар. Қазіргі таңда ең қуатты қондырғы РF-1000 (Варшава, Польша) энергия қоры 1 МДж тең [5]. Лебедев атындағы РҒА физикалық институтында (Мәскеу, Ресей) қуатты лазерден және плазмалық фокус типті қондырғыдан «Тюльпан» атты бірегей плазмалық фокус жасалды [6]. Плазмалық қондырғы кешенінің құрамында энергиясы 4 кДж ден 0,4 МДжге дейін, тығыздығы 10 А/см, жоғары плазмадан 300 кА ден 3 МА ге дейін токты қамтамассыз ете алатын қондырғы бар [7]. Қазақстанда плазманың пайда болуын зерттеу, ПФ типтес қондырғы импульсты плазмалық үдеткіште КПҮ-30 жүргізілді [10]. Кондырғының энергиясы 35 кДж, разрядты тоғы 300 кА, ұзақтылығы 14 мкс. Аталған қондырғыда тығыз және сиретілген плазманың қоюлығы

және олардың динамикасы зерттелді, сонымен қатар плазмалық ұшқындардың фокусталуының негізгі заңдылықтары анықталды [9, 11]. Ұсынылып отырған жұмыста КПҮ-30 қондырғысы плазмалық фокус деп аталатын жаңа электродтар жүйесімен жасақталды, қондырғының электротехникалық сипаттамалары зерттеліп, екі жүйенің де максималды тоқтарының шамасы салыстырылды.

Плазмалық фокус қондырғысы

Коаксиалды плазмалық үдеткіш [10] Мейзер типті плазмалық фокус ПФ-30 қондырғысы ретінде қайта жасалып шықты. Аталған қондырғыда коаксиальды геометриялық электродты жүйе мыстан жасалған, олар оргшыны изолятор арқылы бөлінген. Сыртқы электродтың диаметрі 1,5 см, ішкісі – 2,5 см құрайды, сыртқы және ішкі электродтардың ұзындығы сәйкесінше 650 мм және 750 мм [11]. Плазмалық фокус қондырғысындағы электродтар жүйесіндегі катодтың ұзындығы анодтың диаметрінің қатынасы бойынша [12] көрсетілгендей А>1 шарт орындалды, яғни А=2,6 см тең болды. ПФ-30 қондырғысы толығымен Мейзер типті деп айтуға болады. Плазмалық фокустың принциптік схемасы 1- суретте келтірілген.



1 - жұмыс газы, 2 - манометр, 3 - электродинамикалық клапан,

4 - вакуумды разрядник, 5 - конденсатор, 6 - электродтар,

7 - эвакуациялық жүйе, 8 - камера

Сурет 1. ПФ-30 қондырғысының схемасы

Плазмалық фокус қондырғысы үшін изолятордың рөлі аса зор болып табылады [14]. Электродтар арасында жұмыс газы толтырылып, басқарушы пульт жоғары кернеу берілген тарапынан кезде электродтардың арасында Лоренц заңы бойынша остік (аксиал) бағытта қозғалатын плазма ағыны пайда болады. Жоғары жылдамдықпен қозғалған плазма ағыны анодттың басына жеткенде радиалды бағытта қозғалып сығыла бастайды [15], яғни пинчтың (плазманың сығылуына) пайда болуына алып келеді [18]. Плазманың сығылу уақытының ұзақ болуы изолятордің ұзындығына тікелей байланысты болып табылады [14].

ПФ-30 үдеткішіндегі токты өлшеу үшін Роговский белдігі қолданылды. Роговский белдігі соленоид тәрізді диаметрі d=4 мм ұзындығы l=20 см орам саны N=500 бұтақтан тұрады. Роговский белдігі разряд шинасының сыртына және үдеткіш жазықтығының ішіне яғни ток ағынының бағытына перпендикуляр бағытта шеңбер түрінде орналасады [9–10].

Белдіктегі сигналды тіркеу үшін UT-3200 осцилографы қолданылды. Сигнал осцилографқа коаксиальды 50 Ом кабель арқылы ешқандай күшейткішсіз арқылы берілді. Сигналдың осциллограмасы осцилограф экранында суретке түсіру жолымен алынды.

Статикалық параметрлерді анықтау

Плазмалық фокус қондырғысындағы статикалық параметрлерін есептеу өте маңызды шама болып табылады. Оны мынадай шамалар қамтиды индукция (L₀), кедергі (r₀), және конденсатор сиымдылығы (С0); аталған статикалық параметрлер плазманың параметрлері емес қондырғының (ПФ) параметрлері болып табылады. Конденсатор батареяларының сиымдылығы ПФ жалғанған конденсаторлардың жалпы сиымдылығымен байланысты. ПФ-30 қондырғысында 6 конденсатор, әрқайсысы 3 мкФ-дан жалпы сиымдылығы 18 микрофарадты құрайды. Статикалық параметрлерін өлшеу қондырғыда анод пен катодқа жоғары кернеу беру арқылы жүзеге асады. Электродтардың арасындағы жоғары кернеу режимінде >20 торр неон газы ушін ПФ қондырғыларында статистикалық параметрлерін өлшеудің альтернативті жолы болып табылады [13-14]. Әдетте жоғары қысым режимінде плазмалық қабықша (plasma sheath) остік фаза бойынша ұзақ қашықтыққа қозғала алмағандықтан, статистикалық параметрлерін бағалау жақсы нәтиже береді [12].

ПФ-30 қондырғысындағы электрлік тізбек RLC тізбек арқылы жүзеге асырылады [12] және бұл жағдайда Т периодты синусоидалы токтың формасын беріп мына шарт орындалады $r_0 << 2\sqrt{L_0 / C_0}$ [15].

ПФ-30 қондырғысында тізбекті тұйықтау 16 кВ кернеумен жүзеге асырылып, нәтижесінде 2-суретте көрсетілгендей өшетін синусоидалы толқын алынды. Кейбір жуықтаулардан, статикалық параметрлер (r₀

және L_0) және I_0 пиктік ток мына теңдеулер бойынша анықталды [18]:

$$L_0 = \frac{T^2}{4\pi^2 C_0}$$
(1)

$$r_0 = -\left(\frac{2}{\pi}\right) \left(\ln f\right) \left(\frac{L_0}{C_0}\right)^{0.5} \tag{2}$$

$$I_0 = \frac{\pi C_0 V_0 (1+f)}{T}$$
(3)

Мұндағы *f* суреттегі пиктен табылатын реверсивті коэффициент.

$$f_{1} = \frac{V_{2}}{V_{1}}, f_{2} = \frac{V_{3}}{V_{2}}, f_{3} = \frac{V_{4}}{V_{3}}, f_{4} = \frac{V_{5}}{V_{4}}$$

$$f = \frac{f_{1} + f_{2} + f_{3} + f_{4}}{4}$$
(4)

ПФ-30 үшін орташа реверсивті коэффициент f=0.7974 құрады. Алғашқы үш период бойынша разрядтты токтың периоды T=14 мкс 2-сурет. Қондырғының және разрядттың параметрлері 16 кВ кернеу берілген кезде есептеліп мына мәнге тең болды L₀=280 нГн, r₀=15 мОм, және разрядты ток I_{peak}=210 кА.



Сурет 2. 0.1 торр қысымдағы разрядты тоқ



Сурет 3. Разрядтты токтың кернеуге тәуелділігі

Есептеу нәтижелері тек қана 16 кВ кернеу үшін ғана жүзеге асырылды. Плазмалық қабықшаның өстік бағыты бойынша қозғалғандағы разрядты токтың өсуін 5, 8, 10, 12, 14 және 16 кВ зарядттаушы кернеу аралығында зерттеліп статикалық параметрлері есеп-

ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ӘДЕБИЕТТЕР

телді. Сәйкесінше І_{реак} токтың өсуі кернеуге тікелей қатысты болды (3 б-сурет). І_{реак} токтың өзгеруі 47–210 кА аралығында өзгерісі байқалды. Индукция 2,6–280 нГн аралығында өзгерді.

Қорытынды

Плазмалық фокус типті қондырғылардың басқада эксперименталды кондырғылардан коэксиаллы айырмашылығы рентген сәулелері мен нейтрондар көзіне бай болуымен ерекшелінеді. ПФ электродтар жүйесіне жоғары кернеу берілген кезде электродтар арасында плазма пайда болады. Плазмалық қабықша сыртқы электродтардың ішкі бетіне жеткен кезде, Лоренц J_r×B₀ күшінің әсерімен коэксиалды электродтардың бойымен аксиалды бағытта қозғалады. Осы күштің радиалды құраушылары қабықшаны сыртқы электродқа қарай, аксиалды құраушылары коэксиалды электродтардың соңына жеткенге дейін итереді. J_r ток тығыздығы және В₀ магниттік өрістің тәуелділігі 1/r байланысты болғандықтан, ішкі электродтардың маңындағы қабықшаның жоғары жылдамдықпен жүргізетін Лоренц күшінің мәні жоғары болады.

Бұл жұмыста жүргізілген эксперимент нәтижелері ПФ-30 қондырғысында Аргон газы негізінде қысымы 0,1 торр да плазманың өстік (аксиалды) бағытта қозғалатынын көрсетті. Аталған бағыт бойынша разрядты токтың өсуі 16 кВ 210 кА жетті. Авторлардың алдыңғы жұмысында КПҮ-30 қондырғысында 16 кВ 180 кА жеткен болатын [10]. Бұл бағыт бойынша ПФ-30 қондырғысында разрядты токтардың өсуі байқалады. Разрядты токтардың өсуі электродтардың басында плазманың радиалды бағыттағы қозғалысын туғызады. Есептелген статикалық мәліметтер алдағы уақытта плазманың радиалды қозғалысын зерттеуде өстік (аксиалды) ток бағытының қозғалысы жеткілікті болатынын көрсетті.

- Петров Д.П., Филиппов Н.В., Филиппова Т.И., Храбров В.А. Мощный импульсный газовый разряд в камерах с проводящими стенками. //В сб. Физика плазмы и проблемы управляемых термоядерных реакций. Изд. АН СССР, 1958. -Т. 4. - С. 170-181.
- 2 Mather J. W. Formation of the high-density deuterium plasma focus. //Phys. Fluids, 1965, Vol. 8. P. 366.
- 3 Filippov N.V., Filippova T.I., Khutoretskaia I.V., Mialton V.V., Vinogradov V.P.. Megajoule Scale Plasma Focus as Efficient Xray Source // Physics Letters A -1996. – 211. - P. 168-171.
- 4 Плазменный фокус. Физическая энциклопедия. В 5-ти томах. М.: Советская энциклопедия. 1988. С.1437.
- 5 Krokhin O.N., NikulinV.Ya. The upgraded plasma focus installation "FLORA" the installation "TULIP" // Journal of Technical Physics, -1999, vol. XL, № 1.
- 6 Никулин В. Я., Полухин С. Н. О насыщении нейтронного выхода плазменных фокусов мегаджоульного диапазона. //Физика плазмы, 2007. – Т.33, № 3. - С. 1–7.
- 7 Nikulin V.Ya., Polukhin S.N., and Tikhomirov A.A. A Simple Criterion for the Snowplowing Efficiency of the Working Gas in a kJ Plasma Focus // Plasma Physics Reports, 2005. -Vol. 31, No. 7. P. 591-595.
- 8 Волобуев И.В., Гурей А.Е., Никулин В.Я., Полухин С.Н. Магнито-зондовые и нейтрон¬ные измерения на плазменном фокусе ПФ-400. // Физика плазмы, 2010. – Т. 36, № 12. - С. 1075–1084.
- 9 F.B Baimbetov, A.M. Zhukeshov and A.U. Amrenova. Dynamics of Plasma Flow Formation in a Pulsed Accelerator Operating at a Constant Pressure. Technical Physics Letters, 2007. Vol. 33, No. 1. P. 77–79.
- 10 Zhukeshov A. M., Amrenova A.U., Gabdullina A.T., Ibraev B.M. A plasma Formation in Pulsed Coaxial Gun at Continuously Filling Regime // American Journal of Physics and Applications. – 2013. - Vol. 1, No. 1. - P. 5-9.
- 11 Zhukeshov A.M., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., Ibraev B.M. Parameters calculation and design of vacuum camera for "Plasma Focus" facility. International Journal of Mathematics and Physics. – 2016. – №1, – P. 137-140.
- 12 M. Frignani, "Simulation of gas breakdown and plasma dynamics in plasma focus devices," Ph.D. dissertation, Alma Mater Studiorum Universitàdegli Studi di Bologna, Rimini, Italy, 2007.

- 13 S. H. Saw, S. Lee, F. Roy, P. L. Chong, V. Vengadeswaran, A. S. M. Sidik, Y. W. Leong, and A. Singh, "In situ determination of the static inductance and resistance of a plasma focus capacitor bank," Rev.Sci. Instrum., vol. 81, no. 5, p. 053 505, May 2010.
 C. Moreno, A. Clausse, H. Bruzzone, J. Martínez, R. Llovera, and A. Tartaglione, "Small-chamber 4.7 kJ plasma focus for
- applications," in Proc. Plasma Phys.-IX Latin Amer. Workshop, 2001, vol. 563, pp. 276-281.
- 15 V. Siahpoush and M. A. Mohammdi, "Preliminary results of neutron production in Sahand plasma focus device," in Proc. 2nd Int. Conf. Nucl. Sci. Technol. Iran, Shiraz Univ., Apr. 27-30, 2004, pp. 27-30.
- 16 Zhukeshov A.M., Ibraev B.M., Useinov B.M., Giniatova Sh.G. Pulsed plasma flow interaction with a steel surface //High
- Temperature materials and processes: 2015. Vol. 19. –No2, Р. 113-119 (индексируется в Scopus). 17 Ibraev B.M., Zhukeshov A.M., Gabdullina A.T., Amrenova A.U., Research of plasma accelerator KPU 30. Int. J. of Math. and Physics. - 2012.- Vol. 3, - No1. - P. 50 - 53.
- 18 S. Lee, T.Y. Tou, S.P. Moo, M.A. Eissa, A.V. Gholap, K.H. Kwek, S. Mulvodrono, A.J. Smith, Survadi, W. Usada, and M. Zakaullah, "A simple facility for the teaching of plasma dynamics and plasma nuclear fusion," Amer. J. Phys., vol. 56, no. 1, pp. 62-68, Jan. 1988.

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА «ПЛАЗМЕННЫЙ ФОКУС-30»

Молдабеков Ж.М., Жукешов А.М., Габдуллина А.Т., Амренова А.У., Серік Қ.

Казахский Национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Изучение динамики плазмы в мощных импульсных разрядах представляет большой научный и практический интерес для создания термоядерных реакторов нового поколения и мощных источников рентгеновского и нейтронного излучения для индустрии. В данной статье проведено экспериментальное изучение работы установки «Плазменный фокус-30» (ПФ-30) с коаксиальной геометрией электродов при начальном давлении рабочего газа 0.1 торр. Исследовано распределение тока и определены статические параметры термоядерного реактора ПФ-30, проведено сравнение разрядного тока КПУ-30 и ПФ-30 при начальном давлении 0,1 торр и напряжении 16 кВ.

Ключевые слова: плазменный фокус, статические параметры, разрядный ток.

THE STUDY OF THE STATIC PARAMETERS OF FUSION REACTOR "PLASMA FOCUS-30"

Zh.M. Moldabekov, A.M. Zhukeshov, A.T. Gabdullina, A.U. Amrenova, K. Serik

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Investigation of the dynamics of plasma in powerful-pulsed discharges has great scientific and practical interest for creation of fusion reactors of new generation and powerful sources of X-ray and neutron radiation for industry. In this article the experimental study of work of the Plasma focus-30 (PF-30) is conducted with coaxial geometry of electrodes at 0,1 torr initial pressure of working gas. Distribution of current is investigational and the static parameters of the thermonuclear reactor PF-30 are determined compared discharge current CPA-30 and PF-30 at an initial pressure of 0.1 Torr at a voltage of 16 kB.

Keywords: plasma focus, static parameters, discharge current.

УДК 910.3:631.4

ИЗУЧЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА АКТАУСКОГО СЕЛЬСКОГО ОКРУГА ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Салихов Т.К., Салихова Т.С.

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Рациональное использование и охрана почв в рыночных условиях требует адекватного применения новых научно-методических подходов. Одним из таких системно-аналитических способов организаций почвенного кадастра является сочетания традиционных наземных методов с технологиями геоинформационных систем (ГИС) на базе широкого использования аэрокосмических изображений разного разрешения. Совокупность информации, необходимой для картографирования структур почвенного покрова и их количественной оценки, описывается в базах данных ГИС. Интеграция данных реализуется через пространственную и атрибутивную составляющую в виде результатов топографической и тематических карт. При этом создание атрибутивных баз данных ГИС предполагает оцифровку тематических карт, привязанных в единой картографической проекции (в качестве которой служила топографическая карта масштаба 1:50 000). В результате работы сформированы тематические карты и атрибутивные базы данных ГИС: почв. В результате исследований на основе ГИС-технологии разработана цифровая почвенная карта Актауского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области с помощью программного продукта ArcGIS.

Ключевые слова: геоинформационные системы, почвенный покров, темно-каштановые почвы, сельский округ.

Введение

Индустриально-инновационная стратегия, направленная на диверсификацию экономики нашей страны, определяет приоритетные наукоемкие, экологически чистые, энерго- и ресурсосберегающие технологии и производства. Их успешное и эффективное развитие невозможно без получения новых фундаментальных знаний и создания научно-теоретических основ новых технологий, которые позволяют им стать конкурентно способными на мировом рынке промышленного и сельскохозяйственного производства.

Состояние почвенного покрова Казахстана. Территория Казахстана характеризуется сложным и разнообразным почвенным покровом, который подчинен определенным географическим закономерностям. Богатейшие почвенные ресурсы республики изучены далеко не полно, не равномерно и используются еще недостаточно рационально. Современное состояние, дальнейшее расширение и интенсификация сельского хозяйства Казахстана находится в тесной зависимости от правильного использования его почвенного покрова.

Современная оценка почв является актуальной для развития государства и общества, т.к. обеспечивает информацией об учете географического распределения, о стоимости почв, о рациональном использовании, об охране и планировании использования почв.

Почвы как географические объекты распределяются по известным закономерностям по поверхности Земли. Тематическое картирование почв при наличии опыта аналитика может выполняться в автоматизированном режиме. В то же время следует подчеркнуть, что технологии ГИС могут максимально облег-

чить учет и картирование почв, но не могут заменить полностью интеллектуальный потенциал почвоведа исследователя и традиционные методы. Традиционные полевые, камеральные и лабораторные методы исследования почв являются фундаментом, на котором развиваются геоинформационные и космические технологии, способствуя автоматизации процессов учета и картирования почвенного покрова.

Кроме того, когда идет формирование общества, основанного на рыночных отношениях, особую актуальность приобретает размещение производительных сил, благодаря которым происходит рациональное использование ресурсов почвенного покрова.

Рациональное использование и охрана почв в рыночных условиях требует адекватного применения новых научно-методических подходов. Одним из таких системно-аналитических способов организаций почвенного кадастра является сочетания традиционных наземных методов с технологиями геоинформационных систем (ГИС) на базе широкого использования аэрокосмических изображений разного разрешения. Такой подход лежит в основе аграрных геоинформационных систем развитых стран мира [1-3], где почвы являются основной подсистемой этого информационного продукта. Развитие научных исследований в этом направлений соответствует требованиям Государственной программы по форсированному индустриально-инновационному развитию Республики Казахстан и Программе развитию космической деятельности в Республике Казахстан.

Объект и методика исследования

Цель исследования – изучение почвенного покрова и разработка почвенной карты Актауского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области на основе применения ГИС-технологий для решения перспективных задач мониторинга земельных ресурсов и развития агробиоиндустрии.

Материалы и методы исследований. Для проведения крупномасштабных почвенных изысканий придерживались соответствующих методических рекомендаций [4, 5]. Физико-химические параметры почв изучались общепринятыми методами [6–8]. Для топографо-геодезических работ использованы бумажные почвенные карты разного масштаба – от 1:100 000 до 1:25 000 (для поиска и выделения эталонных участков). Разработка крупномасштабной почвенной карты с применением ГИС-технологий осуществляли на основе программного продукта ArcGIS с использованием отсканированных бумажных карт и аэрофотопланов.

Результаты исследования и их обсуждение

На исследуемой территории нами проведены исследования почвенного покрова на основе геосистемного подхода и новых информационных технологий (см. рисунок). В настоящем систематическом описании выделены почвенные подразделения, которые были встречены нами на территории Актауского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области.

На исследуемой территории в структуре почвенного покрова формируются темно-каштановые почвы. Они формируются в условиях сухостепной зоны, при непромывном типе водного режима, разнотравно-житняково-таволговым, чернополынно-дерновино-злаковым и мятликово-белополынно-кокпековым растительным сообществами, на лессовидных суглинках.

Темно-каштановые почвы. Перед описанием разновидностей следует отметить, что в основу характеристики ниже описываемых почв положены морфологические признаки, физические, биологические и химические свойства, мощность гумусового горизонта, глубина вскипания от соляной кислоты, гранулометрический состав, количество гумуса, содержание подвижных элементов. При описании почв под горизонтом «А» имеется в виду горизонт с равномерной окраской, обильно пронизан корнями растений.

Горизонт «В» обычно обозначается горизонт интенсивно окрашенный, с хорошо выраженной структурой, часто в какой-то степени уплотнен. «ВС» - переходный горизонт с преобладанием признаков материнской породы, но еще с наличием признаков гумуса. «С» - горизонт видимого скопления карбонатов, гипса и других солей, материнская порода.

Сформировались они на полого-плоской и широко-волнистой равнине с хорошо выраженным микрорельефом в виде сусликовин и микрозападин. Грунтовые воды залегают глубже 10 м. Почвообразующими породами служат желто-бурые средние и тяжелые суглинки.

Остановимся на физико-химической характеристике темно-каштановых средне- тяжелосуглинистых почв. По гранулометрическому составу это иловатопылеватые и песчано-пылеватые средние и тяжелые суглинки. Преобладает фракция крупной пыли. Фракция пыли определяет сильную связность гранулометрических частиц, плохую воздухо- и водопроницаемость. Гумусовые горизонты содержат малый процент перегноя (2,3–2,5 %), равномерно уменьшающийся с глубиной.

Из подвижных форм питания почвы хорошо обеспечены азотом (5,1 мг/100 г), очень низко фосфором (1,2 мг/100 г почвы).

Углекислота карбонатов появляется в верхних слоях породы в количестве, составляющем 0,8–6 %. легкорастворимыми солями профиль не засолен. В составе поглощенных оснований преобладает кальций (90–92 % от суммы обменных оснований).

Лугово-каштановые суглинистые почвы развиты повсеместно по западинам, залегая в сочетании с зональными почвами или с солонцами. На западинах собирается много снега зимой и талых вод весной. Образование луговых почв связано с дополнительным увлажнением за счет вод поверхностного стока или подпитыванием корнеобитаемого слоя токами пленочно-капиллярной влаги, поднимающейся от залегающих на небольшой глубине (5–7 м) грунтовых вод.

В результате перечисленных причин почвы на пониженных элементах рельефа получают дополнительное увлажнение не только весной, но и летом.

Дополнительное увлажнение содействует развитию более густого травостоя. Растительность развивается пышно, отличается густотой, разнообразием видов.

После отмирания остается много органических остатков, которые в последствии, разлагаясь, превращаются в гумус.

Поэтому у лугово-каштановых почв мощный гумусовый горизонт и много гумуса по сравнению с зональными почвами. Вследствие застаивания воды в нижних частях почвенного профиля появляются ржавые пятна полуторных окислов.

Морфологическое строение лугово-каштановых почв характеризуется следующими средними данными по хозяйству: мощность гумусового горизонта (A+B) 45 см, темно-серой окраски, комковатой структуры.

Выделения карбонатов в виде «белоглазки» и пятен с 67 см. вскипание от соляной кислоты с 52 см. Переход от одного генетического горизонта к другому постепенный по цвету.

Использование лугово-каштановых почв в хозяйстве зависит от условий их залегания. Однородными массивами они встречаются очень редко. Если они сформировались в сочетании с зональными почвами, то они распаханы. Если же в комплексе солонцов больше 30 % или лугово-каштановые почвы залегают в глубоких балках, то эти комплексные массивы используются как сенокосы и пастбища. Солонцы. Образование солонцов может быть связано с первоначальной засоленностью пород или с биологической аккумуляцией солей в верхних горизонтах и по следующей вертикальной дифференциации их по профилю. Следовательно, солонцовому типу почвообразования должно предшествовать засоление.

При преобладании солей натрия происходит вхождение катионов натрия в почвенный поглощающий комплекс. Натрий распыляет почвенные коллоиды. После вхождения натрия в почву соли должны быть вымыты, иначе они будут препятствовать диспергированию коллоидов. При таких условиях почвенные коллоиды приобретают подвижность и передвигаются в глубь по профилю. Причиной их закрепления является механическое поглощение и наличие солей, которые вымылись на эту глубину и способствуют свертыванию и осаждению коллоидов.

В результате такого перераспределения формируется верхний аллювиальный горизонт, объединенный илистой фракцией, и переходный плотный иллювиальный горизонт, обогащенный коллоидами.

Солонцы имеют ясно выраженные горизонты «А» – перегнойно-элювиальный, «В» – иллювиальный (солонцовый), С_к – карбонатный и солевой. Горизонт А имеет мощность, в среднем по хозяйству, 6 см, листовато-пылеватую структуру, сравнительно рыхлого сложения.

Горизонт «В» имеет бурый или шоколадно-бурый цвет, очень плотный, с хорошо выраженным коллоидным глянцем, призматический. Мощность его в среднем 17 см. Этот горизонт содержит много обменного натрия, обогащен коллоидами и способен диспергироваться. Поэтому он отличается очень плохим водным режимом и физическими свойствами. Во влажном состоянии он очень набухает, становится очень вязким и практически водонепроницаемым. Часто в нижней части этого горизонта наблюдается скопление солей. От соляной кислоты вскипает с 23 см. Почвообразующими породами является желто-бурые засоленные средние или тяжелые суглинки.

Обеспеченность этих почв подвижными элементами питания низкая. Профиль почвы промыт от воднорастворимых солей. Изредка почвообразующие породы засоленные в слабой степени. Тип засоления по анионам сульфатно-хлоридный, по катионам – натриевый. В составе солей преобладают сернокислый натрий и хлористый натрий. Последний является токсичной солью для растений.

По глубине залегания солей описываемые солонцы относятся к солончаковым. Тип засоления по анионам хлоридный, по катионам натриевый. В составе солей преобладает хлористый натрий, который является вредной солью для растений. В почвенном поглощающем комплексе преобладают катионы кальция. В переходном горизонте резко увеличивается количество поглощенного натрия. Солончаки формируются на засоленных породах с близким залеганием высокоминерализованных грунтовых вод (2–6 м). Непромывной режим, восходящие токи при сильном испарении приводят засолению почвенной толщи.

Растительный покров представлен солевыносливыми видами. Расчленение почвенного профиля на генетические горизонты слабое.

Солончаки соровые получили широкое распространение. Они образуются в плоских обширных понижениях, заливаемых в весеннее время водой и представляющих собой соленые озера (Тлеуликоль и т.д.), которые пересыхают к концу лета, покрываясь с поверхности коркой солей. Вопрос накопления и современного перемещения солей в Прикаспийской низменности хорошо освещен В.А. Ковдой [9].

Высокая концентрация водорастворимых солей подавляет развитие биологических и почвообразовательных процессов.

Вскипание от соляной кислоты наблюдается с 5– 7 см. На поверхности образуется не большая корочка (около 1 см), под которой идет рыхлый, накопленный кристаллами солей горизонта, где прослеживается слабая гумусированность. В верхнем слое почвы содержится 1,31 % гумуса. Емкость катионного обмена средняя, и составляет в среднем 19,35 мг-экв на 100 г почвы. Содержание обменного натрия значительное и составляет в среднем, 21,46 % от суммы поглощенных оснований. Содержание солей в верхнем слое почвы колеблется от 0,89 до 1,12 %.

Тип засоления по профилю хлоридный. В современном состоянии эти почвы относятся к землям пастбищного значения требующим проведением сложных мероприятий по борьбе с засолением.

Сильная степень деградации почвенно-растительного покрова проявляется локально и отмечается вокруг населенных пунктов, стоянок скота, по скотопрогонным тропам. Она выражается упрощением состава и структуры растительных сообществ, а в крайних случаях до их полного уничтожения.

В зависимости от характера антропогенного воздействия возникают изменения и в почвенном покрове. Деградация проявляется в полном или частичном уничтожении почвенного профиля, нарушении мощности генетических горизонтов; изменении физических и химических свойств почв; нарушении температурного, воздушного и водного режимов почв.

Таким образом, разрушение почвенного покрова происходит в тысячу раз быстрее, чем его образование. В связи с этим на исследуемой территории нужно проводить мероприятия, направленные на восстановление и сохранение почвенного покрова.

Подробные диагноститеские показатели даны для наиболее распространенных почвенных разновидностей в пределах исследуемой территории. Указаны характерные морфологические генетические признаки почвенного покрова, основанные на имеющихся данных полевых исследований и камеральной обработки. На исследуемой территории в структуре почвенного покрова формируются темно-каштановые почвы в комплексе с различными почвенными сочетаниями. Они формируются в условиях сухостепной зоны, при непромывном типе водного режима, разнотравно-житняково-таволговым, чернополынно-дерновино-злаковым и мятликово-белополынно-кокпековым растительным сообществам, на лессовидных суглинках. На рисунке приведена разработанная цифровая почвенная карта Актауского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области, которая была создана нами с применением вышеописанной методики на основе сканированных почвенных карт.



Рисунок. Почвенная карта Актауского сельского округа Западно-Казахстанской области

Почвы								
Nº	шифр	мех. состав	название					
1a	237	TC	темно-каштановые среднемощные почвы (тс - тяжелосуглинистые)					
16	237	С	темно-каштановые среднемощные почвы (с - среднесуглинистые)					
1в	237	лс	темно-каштановые среднемощные почвы (лг - легкосуглинистые)					
1г	237	п	темно-каштановые среднемощные почвы (п - песчаные)					
2a	237+671	TC	темно-каштановые среднемощные почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 10-20%					
26	237+671	лс	темно-каштановые среднемощные почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 10-20%					
2в	237+671	лс	темно-каштановые среднемощные почвы в комплексе с солонцами мелкими 20-30%					
3	237+671	ЛС	темно-каштановые среднемощные почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 20-30%					
4	237+563	TC	темно-каштановые среднемощные почвы в сочетании с лугово-каштановыми почвами 20-30%					
5a	242	TC	темно-каштановые среднемощные карбонатные почвы					
56	242	СП	темно-каштановые среднемощные карбонатные почвы (сп - супесчаные)					
5в	242	п	темно-каштановые среднемощные карбонатные почвы					
6	242+301	TC	темно-каштановые среднемощные карбонатные почвы с пятнами темнокаштановых малоразвитых карбонатных почв 10-20%					
7a	242+244	TC	темно-каштановые среднемощные карбонатные почвы с пятнами темнокаштановых слабосмытых карбонатных почв 10-20%					
76	242+244	С	темно-каштановые среднемощные карбонатные почвы с пятнами темнокаштановых слабосмытых карбонатных почв 10-20%					
8	242+244	TC	темно-каштановые среднемощные карбонатные почвы с пятнами темнокаштановых слабосмытых карбонатных почв 20-30%					
9a	261	TC	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы					
96	261	С	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы					
9в	261	лс	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы					
9г	261	СП	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы					
10a	261+256	лс	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы с пятнами темнокаштановых среднемощных слабосолонцеватых почв 20-30%					
106	261+256	СП	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы с пятнами темнокаштановых среднемощных слабосолонцеватых почв 20-30%					
10в	261+256	п	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы с пятнами темнокаштановых среднемощных слабосолонцеватых почв 20-30%					
11	261+301	С	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы с пятнами темнокаштановых карбонатных малоразвитых защебненных почв 20-30%					
12	261+263	TC	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватыпочвые с пятнами					

(шифр почв по республиканскому систематическому списку)
Таблица Пегенда к поцеецной карте Актауского сельского октог

	Почвы								
Nº	шифр	мех. состав	название						
			темнокаштановых слабосмытых среднесолонцеватых почв 20-30%						
13	261+671	С	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 10-20%						
14a	261+671	TC	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 20-30%						
14б	261+671	С	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 20-30%						
14в	261+671	лс	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 20-30%						
14г	261+671	лс	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими 10-20%						
15	261+671	TC	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 30-50%						
16a	261+671	TC	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 30-50%						
16б	261+671	С	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 30-50%						
17	261+563	тс	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в сочетании с лугово- каштановыми почвами 30-50%						
18	261+563	тс	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые почвы в комплексе с солонцами средними 10-20% и в сочетании с лугово-каштановыми почвами 10-20%						
19	266	С	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые солончаковатые почвы						
20	266+	TC	темно-каштановые среднемощные среднесолонцеватые солончаковатые почвы в комплексе с солонцами солончаковатыми до 30%						
21	271	С	темно-каштановые среднемощные сильносолонцеватые почвы						
22a	271	TC	темно-каштановые среднемощные сильносолонцеватые почвы в комплексе с солонцами до 30%						
226	271	С	темно-каштановые среднемощные сильносолонцеватые почвы в комплексе с солонцами до 30%						
22в	271	ЛС	темно-каштановые среднемощные сильносолонцеватые почвы в комплексе с солонцами до 30%						
23	271	лс	темно-каштановые среднемощные сильносолонцеватые почвы в комплексе с солонцами 30-50%						
24	242+256	СП	темно-каштановые среднемощные карбонатные слабосолонцеватые почвы						
25	242+256+671	С	темно-каштановые среднемощные карбонатные слабосолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми						
26	242+256+671	с	темно-каштановые среднемощные карбонатные слабосолонцеватые почвы в комплексе с солонцами мелкими солончаковатыми 10-20% и с пятнами темнокаштановых малоразвитых карбонатных почв 10-20%						
27a	470	ЛС	темно-каштановые карбонатные неполноразвитые почвы						
276	471	СП	темно-каштановые карбонатные неполноразвитые защебненные почвы						

ИЗУЧЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА АКТАУСКОГО СЕЛЬСКОГО ОКРУГА ЗАПАДНО-КАЗАХСТАНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

	Почвы								
Nº	шифр	мех. состав	название						
28	301	г	темно-каштановые карбонатные малоразвитые солончаковатые почвы						
29a	301	С	темно-каштановые карбонатные малоразвитые почвы						
296	301	ЛС	темно-каштановые карбонатные малоразвитые почвы						
29в	301	СП	темно-каштановые карбонатные малоразвитые почвы						
30	301+261	СП	темно-каштановые карбонатные малоразвитые защебненные почвы с пятнами темнокаштановых среднемощных карбонатно-среднесолонцеватых почв 30-50%						
31	301+244	Г	темно-каштановые карбонатные малоразвитые защебненные почвы с пятнами слабосмытых карбонатных почв 20-30%						
32	301+739	TC	темно-каштановые карбонатные малоразвитые почвы с выходами меловых пород 30-50%						
33	244+563	TC	темно-каштановые слабосмытые карбонатные почвы в сочетании с лугово-каштановыми почвами 20-30%						
34a	240	СП	темно-каштановые слабодефлированные почвы						
34б	240	П	темно-каштановые слабодефлированные почвы						
34в	240	ЛC	темно-каштановые слабодефлированные почвы						
35	256	СП	темно-каштановые среднемощные слабосолонцеватые почвы						
36a	563	TC	лугово-каштановые почвы						
366	563	С	лугово-каштановые почвы						
36в	563	СП	лугово-каштановые почвы						
36г	563	П	лугово-каштановые почвы						
37a	563+672	С	лугово-каштановые почвы в комплексе с солонцами средними 30-50%						
376	563+672	п	лугово-каштановые почвы в комплексе с солонцами средними 30-50%						
38	563+672	СП	лугово-каштановые среднесолонцеватые почвы						
38a	563+672	TC	лугово-каштановые среднесолонцеватые почвы						
38б	563+672	С	лугово-каштановые среднесолонцеватые почвы						
38в	563+672	ЛC	лугово-каштановые среднесолонцеватые почвы						
39	563+672+261	TC	лугово-каштановые среднесолонцеватые почвы в сочетании с темнокаштановыми среднемощными среднесолонцеватыми почвами 30-50%						
40	469	TC	луговые среднеосолоделые почвы						
41	564+566	с	луговые карбонатно-среднесолонцеватые солончаковатые почвы						
42	591	тс	лугово-болотные почвы						

	Почвы							
N⁰	шифр	мех. состав	название					
43	670	TC	солонцы степные корковые и средние солончаковатые					
44	671	ЛС	солонцы мелкие солончаковатые					
45	724	тс	солонцы луговые					
46	670+266	TC	солонцы степные солончаковатые в комплексе с темнокаштановыми среднемощными солончаковатыми почвами до 30%					
47	670+237	TC	солонцы степные солончаковатые в комплексе с темнокаштановыми почвами 30-50%					
48	723	TC	солончаки					
49	426	лс	аллювиальные карбонатные почвы					
49б	426	с	аллювиальные карбонатные почвы					
49в	426	СП	аллювиальные карбонатные почвы					
49в	426	п	аллювиальные карбонатные почвы					
50	739		выходы меловых пород					

Таким образом, в результате проведенных исследований выполнено картографирование почвенного покрова с привлечением традиционных наземных методов с технологиями геоинформационных систем (ArcGIS) на базе широкого использования аэрокосмических изображений разного разрешения. Это позволило охарактеризовать почвенные комбинации по их принадлежности к определенной генетико-геометрической форме, условиям залегания в рельефе, количественным показателям.

Для защиты почв от водной и ветровой эрозии необходима разработка и реализация комплекса противоэрозионных мер. В этой связи, учитывая особую неустойчивость экосистем к антропогенному воздействию, нужно высаживать поперек господствующих ветров лесозащитные полосы и высокостебельные растения, а также передвижение по территории должно осуществляться по проложенным и укрепленным дорогам и тропам.

Для повышения плодородия почвенного покрова требуется проведение мероприятий по борьбе за накопление и сохранение влаги, применение мелиорантов и органо-минеральных удобрений, особенно фосфорных, так как они низко обеспечены фосфором.

Литература

- 1. Есполов, Т.И. О разработке агрогеоинформационной системы Казахстана: постановка проблемы /Т.И. Есполов, О.А. Алипбеки, Ж.Т. Сейфуллин и др. //Исследования. Результаты, 2006. - №6. - С.3-8.
- Алипбеки, О.А. Разработка и внедрение электронного сельского хозяйства путь к повышению конкурентоспособности аграрного производства Казахстана /О.А. Алипбеки //Повышение конкурентоспособности сельскохозяйственного производства Казахстана: проблемы и пути решения: сб. тр. межд. науч.-практ. конф. – Алматы: Агроуниверситет. -2007. - С.14-17.
- Есполов, Т.И. О проблеме устойчивого развития агроресурсов и фондов /Т.И. Есполов, О.А. Алипбеки, С.А. Кешуов //сб. тр. межд. науч.-практ. конф. посвящ. 70-летию заслуженного работника сельского хозяйства Республики Казахстан Байжуманова А.Б. - Алматы: Бастау.- 2008.- С. 4-6.
- 4. Салихов, Т.Қ. Топырақтану: оқулық / Т.Қ. Салихов Алматы: «Эверо» баспасы, 2016. 457 бет.
- Салихов, Т.К., Сапиев Е., Салихова Т.С. Изучение почвенного покрова Жанакушского сельского округа Западно-Казахстанской области на основе применения ГИС-технологий /Т.К.Салихов, Е.Сапиев, Т.С.Салихова //Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстана. - 2018. - № 1. – С. 105-109.
- 6. Салихов, Т.К. Биохимические свойства почвенного покрова геоэкосистем Акшатского сельского округа / Т.К. Салихов //Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстана. 2018. № 1. С. 110-113.

- 7. Салихов, Т.К. Современное состояние плодородия почвенного покрова геоэкосистем Лубенского сельского округа /Т.К.Салихов //Вестник Казахско-Британского технического университета. 2017. № 1. С. 52-55.
- 8. Салихов, Т.К. Лубен ауылдық округінің геоэкожүйелеріндегі топырақ жамылғысының қазіргі кездегі жағдайы
- /Т.К. Салихов //Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстана. 2017. № 1. С. 113-119.
- 9. Ковда В.А. Солончаки и солонцы: монография. М: Академия наук СССР, 1937. 249 с.

БАТЫС ҚАЗАҚСТАН ОБЛЫСЫ АҚТАУ АУЫЛДЫҚ ОКРУГІНІҢ ГАЖ-ТЕХНОЛОГИЯЛАР ҚОЛДАНУ НЕГІЗІНДЕ ТОПЫРАҚ ЖАМЫЛҒЫСЫНЫҢ ЗЕРТТЕУ

Т.Қ. Салихов, Т.С. Салихова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Қәзіргі нарықтық жағдайда топырақты тиімді пайдалану және қорғау жаңа ғылыми-әдістемелік тәсілдер қолдану талап етуде. Осындай жүйелі-аналитикалық тәсілдерін арқылы топырақ кадастрын ұйымдастыру үшін дәстүрлі жерүсті әдістерімен геоақпараттық жүйелер (ГАЖ) технологияларын үйлестіру үшін әр түрлі аэроғарыштық суреттерді кеңінен пайдалану қажет. Топырақ жамылғысының құрылымдарын картаға түсіру және оларды сандық бағалау үшін қажетті ақпарат жиынтығы ГАЖ деректер базасында сипатталады. Деректерді интеграциялау кеңістік және атбибуттік компонент арқылы жүзеге асырылады: топографиялық және тақырыптық карталардың нәтижелері. Сонымен қатар, ГАЖ атбибуттік деректер базасын құру кезінде тақырыптық карталарды цифрландыруды қамтиды, олар бір картографиялық проекцияға қосылған (1:50 000 масштабтағы топографиялық карта ретінде қолданылды). Жұмыстың нәтижесінде ГАЖ-нің тақырыптық карталары және атбибуттік деректер базасы құрылды: топырақ. Зерттеу нәтижесілері ҒАЖ технологиясына негізінде Батыс Қазақстан облысың Шыңғырлау ауданы Ақтау ауылдық округінің сандық топырақ картасы АгсGIS бағдарламалық өнімін қолдана отырып құрастырылды.

Түйінді сөздер: геоақпараттық жүйелер, топырақ жамылғысы, күнгірт қара қоңыр топырақ, ауылдық округі.

THE STUDY OF SOIL COVER AKTAU RURAL DISTRICTS IN WEST KAZAKHSTAN REGION ON THE BASIS OF GIS-TECHNOLOGIES

T.K. Salikhov, T.S. Salikhova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Rational use and protection of soil in market conditions requires the adequate application of new scientific and methodological approaches. One of such system-analytical methods of soil cadastre organizations is the combination of traditional ground-based methods with geographic information systems (GIS) technologies based on the wide use of aerospace images of different resolutions. The set of information necessary for mapping of soil cover structures and their quantitative assessment is described in GIS databases. Data integration is realized through the spatial and attribute components in the form of topographic and thematic maps. At the same time, the creation of GIS attribute databases involves digitizing thematic maps linked in a single map projection (which was a topographic map of 1:50,000 scale). As a result of the work, thematic maps and GIS attributive databases were formed: soils. As a result of research based on GIS technology, a digital soil map of Aktau rural district of Chingirlau district of West Kazakhstan region was developed using the ArcGIS software product.

Keywords: geographic information systems, soil cover, dark chestnut soils, rural district.

УДК 910.3:631.4

АҚМОЛА ОБЛЫСЫ АТБАСАР АУДАНЫНЫҢ ТОПЫРАҚ ЖАМЫЛҒЫСЫ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ГАЖ-ТЕХНОЛОГИЯСЫН ҚОЛДАНУ НЕГІЗІНДЕ ЗЕРТТЕУ

Т.Қ. Салихов, Т.С. Салихова

Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

Топырақ құнарлылығын сақтау және жақсарту негізінде ауыл шаруашылық жерлерін пайдаланудың тиімділігін арттыру топырақтанудың басым міндеттерінің бірі болып табылады, оның шешімі экономиканың аграрлық секторының және елдің азық-түлік қауіпсіздігін тұрақты дамытуды қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады. Топырақтың құнарлылығын сақтау және жақсарту жер ресурстарын ұтымды пайдалану, өнімділікті арттыру және агроландшафтардың топырақ экологиясын жақсартудың жалпы проблемасының негізгі бөлігі болып табылады. Топырақтың қазіргі таңдағы бағасы мемлекет пен қоғамның дамуы үшін өте маңызды, себебі географиялық тарадуың есебімен, топырақ құнымен, тиімді пайдаланумен, топырақты пайдаланудағы қорғау мен жоспарлаумен ақпараттандырады. Жұмыстың нәтижесінде ГАЖ-нің тақырыптық карталары және атбибуттік деректер базасы құрылды: топырақ картасы АrcGIS бағдарламалық өнімін қолдана отырып құрастырылды.

Түйінді сөздер: геоақпараттық жүйелер, топырақ жамылғысы, оңтүстік қара топырақ, қара қоңыр топырақ.

Кіріспе

Қазақстан жер ресурстарының ең үлкен қорларына ие. Жер қорының аумағы 272 млн. гектар жерді құрайды. Осыған байланысты Қазақстанның топырақ жамылғысын зерттеу өте қызықты және өзекті мәселе. Қазақстан Республикасының аумағы шегінде орналасқан жерлер және жеке жер учаскелері топырақ жамылғысының объектісі болып табылады.

Топырақ құнарлылығын сақтау және жақсарту негізінде ауыл шаруашылық жерлерін пайдаланудың тиімділігін арттыру топырақтанудың басым міндеттерінің бірі болып табылады, оның шешімі экономиканың аграрлық секторының және елдің азықтүлік қауіпсіздігін тұрақты дамытуды қамтамасыз етуде маңызды рөл атқарады [1].

Топырақтың құнарлылығын сақтау және жақсарту жер ресурстарын ұтымды пайдалану, өнімділікті арттыру және агроландшафтардың топырақ экологиясын жақсартудың жалпы проблемасының негізгі бөлігі болып табылады [2].

Сондықтан, заттардың табиғи циклінің асқынып кетуіне және бұзылуына әкеліп соқтыратын нашар жерлерді қалпына келтіру ауыл шаруашылық және техногендік бұзылған жерлер үшін инновациялық әдістерді әзірлеуді талап етеді.

Топырақты нарықтық жағдайында ұтымды пайдалану және қорғау жаңа ғылыми және әдіснамалық тәсілдерді дұрыс қолдануды талап етеді. Топырақ кадастры ұйымдарының осындай жүйеліканалитикалық әдістерінің бірі - әртүрлі шешімдердің аэроғарыштық суреттерін кеңінен пайдалану негізінде геоақпараттық жүйелер (ГАЖ) технологиясымен дәстүрлі жердегі әдістердің үйлесуі. Мұндай көзқарас әлемнің дамыған елдерінің аграрлық геоақпараттық жүйелеріне негізделген [3], мұнда топырақ осы ақпараттық өнімнің негізгі кіші жүйесі болып табылады. Осы саладағы ғылыми зерттеулерді дамыту Қазақстан Республикасының Үдемелі индустриалды-инновациялық дамыту жөніндегі мемлекеттік бағдарламасының және Қазақстан Республикасындағы ғарыш қызметін дамыту бағдарламасының талаптарына сәйкес келеді.

Зерттеудің мақсаты - топырақ жамылғысының ағымдағы жай-күйін зерттеу және ГАЖ технологиясын қолдану негізінде Ақмола облысының Атбасар ауданының топырақ картасын жасау.

Нарықтық жағдайдағы топырақ жамылғысын ұтымды пайдалану және қорғау ГАЖ технологиялары мен жаңа ақпараттық технологияларға негізделген жаңа ғылыми және әдіснамалық тәсілдерді барабар қолдануды талап етеді. Сондықтан, мақала жазу барысында физико-географиялық сипаттамалардың қазіргі жағдайы, жерді физико-географиялық бағалау принциптерін жасау, жердің жай-күйіне әсер ететін теріс процестерді анықтау және жердің физикалық-географиялық жағдайын талдау.

Зерттеу әдістемесі, нысанасы және жағдайы

Геоақпараттық технологиялар негізінде топырақ зерттеу жұмыстары жүргізілген Ақмола облысы Атбасар ауданының дала зонасының топырақ жамылғысы зерттеу объектісі болды.

Зерттеу әдістері: Эксперименттік және ғылымизерттеу жұмыстарын жүргізу кезінде ГОСТ-қа сәйкес келетін экологиялық, физикалық, су-физикалық, химиялық, физика-химиялық және геоақпараттық зерттеулердің жалпы қабылданған әдістері пайдаланылды. Топырақтың ауқымды зерттеулерін жүргізу үшін тиісті әдістемелік ұсыныстар орындалды [4-5]. Топографиялық және геодезиялық жұмыстарды жүргізу үшін 1:100 000-нан 1:25 000-ға дейінгі әртүрлі масштабтағы қағаз топырақ карталары қолданылды [6-7]. ГАЖ-технологияларды пайдалана отырып кең ауқымды топырақ картасын жасау ArcGIS бағдарламалық өнімінің негізінде сканерленген қағаз карталарын және аэрофототүсірілімдерді қолданумен, сондай-ақ Ақмола облысының жүйелі топырақ атаулары пайдаланылды [8-10].

Зерттеу нәтижелері және оларды талдау

Атбасар ауданы Қазақстан Республикасы Ақмола облысының батыс бөлігінде орналасқан. Аймақ ауданы оңтүстіктен солтүстікке 180 км қашықтыққа созылып, 10562,5 км² құрайды.

Аймақ солтүстік бөлігінде Сандықтау ауданымен, оңтүстікте – Қорғалжын және Егіндікөл, шығыста – Бұланды және Астрахан, батыста – Жақсы аудандарымен шектеседі. Аудан орталығы Атбасар қаласы ауданның солтүстік жағында орналасқан. Атбасар қаласынан Көкшетау қаласының облыс орталығына дейінгі қашықтығы – 200 км, Астана қаласына дейін – 260 км [11].

Атбасар ауданының топырағы үш топырақ аймақтарынан тұрады: оңтүстік қара топырақ, қүнгірт қара қоңыр және кәдімгі қара қоңыр топырақтар. Территорияның топырақ жамылғысы біркелкі емес, және құрылымы күрделі, топырақ жиынтықтарының кең дамуымен (кешендер, жиынтықтар, дақтылығы). Бірақ көбінесе топырық қара қоңыр (сурет).

001 топырақ кескіні. Оңтүстік қара топырақ ауданның солтүстік болігінде таралған. Тың жер. Өсімдік жамылғысы шөпті-бетегелі-селеулі. Тұзды қышқылдан қайнауы – 57 см. Ақкөздер түрінде карбонаттар – 58 см.

А 0–18 см. Қою сұр түсті, борпылдақ, шаңдытүйнекті, орташа саздақ, тамырлармен көмкерілген.

В₁ 18–32 см. Қоңыр реңді қою сұр түсті, тығыздалған, орташа саздақ, тамырлармен көмкерілген. В₂ 32–57 см. Қоңыр-қою-сұр, аналық жынысты ашық түсті сыналығы бар, түйнекті, орташа саздақ, әлсіз тамырлармен көмкерілген.

С₁ 57–132 см. Ақкөздер түріндегі карбонаттардың үлкен мөлшері бар қоңыр орташа саздақ, тығыз.

С₂ 132–150 см. Дәл сондай, тек карбонаттары жоқтың қасы (кесте).

Кестедегі қара топырақтың жоғарғы горизонтта орташа қуатты орташа саздақты механикалық құрамда қарашірінді мөлшері 5,2 % шамасында. Терендеген сайын ол бірден азаяды. Сипатталған қара топырақтың «жеңіл» түрлерінде қарашірінді мөлшері төмендеген (4%). Орташа саздақты оңтүстік қара топырақтың жоғарғы горизонтында жалпы азоттың мөлшері 0,28 % жетеді, ал С:N қатынасы 10,5 құрайды, төмен қарай бұл шама азаяды. СО2 карбонаттардың 40-60 см тереңдікте мөлшері 4-6% шегінде болады. Су суспензиясының рекациясы жоғарғы горизонттарда бейтараптан төменгісінде элсіз сілтіліге көшеді. Қоректік элементтері бойынша оңтүстік қара топырақ азот пен калийдің жылжымалы түрлеріне (өсімдіктер үшін қолжетімді) бай және фосфор қосындылары тапшы болады.

002 топырақ кескіні. Күңгірт қара қоңыр топырақтың морфологиялық құрылымы оңтүстік қара топыраққа қарағанда ерекше, қарашірінді горизонтының қуаттылығы аздау, түсі ақшылдау. Күңгірт қара қоңыр топырақтың қарашірінді горизонтының қуаттылығы (А+В) орташа есеппен 45– 55 см. Қарашірінді горизонтының қуаттылығына байланысты орташа қуатты және қуаттылығы аз деп бөлінеді. Карбонаттардың аз бөлгіштігі ақ көзділігі түрінде 40–45 см тереңдікте байқалады. Тұз қышқылынан қайнауы 35–40 см. Ұсақ қабыршақ түріндегі гипс 100–120 см/ден байқалады.

Топырақ	Үлгілердің	Қара Жалпы	Жалпы	C:N	СО₂ кар-	Сінірілген негіздер, мг-экв. 100 га				pН	Қозғалмалы түрлері, мг/100 г		
Keckihi Nº	тереңдігі, %	шрінді, %	a301, %		оонаттар, %	Ca	Mg ⁻	Na	Σ	-	Ν	P_2O_5	K ₂ O
	0-10	5,2	0,28	10,5	жоқ	15,6	5,8	0,1	21,5	6,8	12,0	5,0	82,7
	20-30	2,4	0,15	9,2	жоқ	15,3	5,0	0,1	20,4	7,6	8,7	1,1	24,7
001	40-50	1,6	0,10	9,0	4,1	13,5	4,2	жоқ	17,7	8,5	5,3	1,2	18,0
	60-70	-	-	-	6,2	-	-	-	-	8,8	-	-	-
	140-150	-	-	-	3,7	-	-	-	-	8,2	-	-	-
	0-10	4,1	0,20	12,0	-	18,8	3,0	0,4	22,2	7,2	2,2	61,0	-
	20-30	3,1	0,17	10,7	0,6	21,8	2,9	0,3	25,0	8,3	1,1	28,8	-
002	35-45	2,0	0,11	10,3	4,0	15,0	6,1	0,2	21,3	8,6	1,2	13,8	-
	55-65	-	-	-	7,1	-	-	-	-	8,6	-	-	-
	125-135	-	-	-	4,4	-	-	-	-	8,2	-	-	-
	0-10	3,8	0,20	10,7	-	19,4	0,9	0,6	23,0	7,5	-	-	-
	11-21	1,8	0,14	7,4	-	15,4	1,9	0,9	18,2	8,0	-	-	-
002	26-36	1,0	0,08	7,0	4,0	7,7	1,9	1,7	11,3	8,5	-	-	-
003	45-55		-	-	4,8	-	-	-	-	8,8	-	-	-
	75-85	-	-	-	3,2	-	-	-	-	8,5	-	-	-
	115-125	-	-	-	1,7	-	-	-	-	8,2	-	-	-

Кесте. Топырақтың химиялық және физико-химиялық қасиеттері
Күңгірт қара қоңыр топырақ Есілдің көлбеу жазықтығында орналасқан. Өсімдіктері бетегелібозды түрлі шөптілігімен. Топырақ бетінің жобалы жамылғысы 70–75 %. Карбонаттар бөлінуі – 16– 95 см, гипс – 122 см. Тұз қышқылынан қайнауы – 25–28 см.

А 0–15 см.. Қоңыр сұр, құрғақ, тығыздалған, орташа саздақ; өтуі - байқалады.

В₁ 15–33 см.. Қызғылт қоңыр сұр, құрғақ, тығыз, ірі-кесектелген, орташасаздақ; өтуі - байқалады.

В₂ 33–46 см.. Алдыңғысынан ақшылдау, құрғақ, тығыз, кезектелген-призмалық. Ауыр саздақ.

С₁ 46–95 см. Қызғылт сары. Тығыз, балшықты, ақ көздерінің көп болуымен

С₂ 95–125 см.. Сары балшықты, ұсақ кристалл түрінде гипстің бөлінуі.

Қоректі заттардың мөлшері оңтүстік кара топыраққа қарағанда қара қоңыр топырақтарда төмендеу. Одан басқа қарашірінді қоры механикалық құрамымен байланысты. «Жеңіл» түрлері ауыр түрлеріне қарағанда қарашіріндіге бай емес. Жалпы азот жоғарғы горизонты 0,20 % аспайды. Тереңдігі ұлғайған сайын оның мөлшері азаяды. С:N қатынасы кеңірек – 12 (жоғарғы горизонт), төмендеген сайын ол тарылады. Карбонаттар жиыны қарашірінді горизонтының төменгі шегінде айқындалады, оның мөлшері 6-7 % (50-90 см тереңдікте). Қара қоңыр топырақта қозғалмалы фосфор түрлеріне ие, оның мөлшері 6,0 мг 100 г топыраққа аспайды. Сіңірілген негіздерден қара қоңыр қалыпты топырақта кальций басым (жалпы мөлшерінен 87 %), аз мөлшерде магний және біраз натрий – сіңірілген негіздер мөлшерінен 2 %. Топырақ ерітіндісінің реакциясы қышқыл. pH мөлшері тереңдеген сайын өседі, карбонаттар жиналу горизонтында максимумга жетеди.Қара қоңыр топырақтар тұзды емес. Қарашірінді горизонтында суда еритін тұздар мөлшері 0,1 % аспайды.

003 топырақ кескін. Сортаң қара қоңыр топырақ Атбасар ауданының оңтүстік бөлігінде орналасқан. Өсімдіктер әлемі жусанды-бетегелі желінсаудың көп мөлшерімен ерекшеленеді. Жобалы жамылғысы – 40 %. Шамасында. Карбонаттар 27 см терендікте кездеседі. 60 см-ден бастап гипс және жеңіл еритін тұздар кездеседі. Тұз қышқылынан 25 см-де қайнайды.

А 0–11 см. Сұр қоңыр, құрғақ, тығыздалған, кескін-шаңды, сазды; өтуі - айқын.

B₁ 11–23 см. Қызғылт қоңыр, құрғақ, тығыз, жаңғақты-призмалық, сазды; келесі горизонтқа өтуі - айқын

В₂ 23–37 см. Қызғылт қоңыр, карбонаттармен, тығыз, жаңғақты-призмалық. сазды.

С₁ 37-60 см. Қызғылт сары тығыз саз.

С₂ 60–115 см. Қызғылт сары аз тығыздалған саз, гипспен және жеңіл еритін тұздармен

Сортаң қара қоңыр топырақтың қарашірінді құрамына сәйкес азоттың мөлшері мен С:N қатынасы өзгереді. Жоғарғы горизонтта азот мөлшері 0,20 %, келесісінде-азырақ – 0,14 %, С:N қатынасы жоғарғы горизонтта 10,7 ден 7-7,4 түседі. Карбонаттардың 40-50 см максималды жиналуы тереңдікте иллювиалды горизонт астында байқалады. Сортаң қара қоңыр топырақта сіңірілген негіздерден ең көп кальший мен магнийге тиесілі, олардын мөлшері құбылмалы негізгі қосындысынан 84,6 тен 68% дейін және 10,4 тен 16,8 % дейін. Кальций мен магнийға қоса қарастырылып отырған топырақтар құрамында натрий мен калий мөлшерлері де басым (сіңірілген негіздер суммасынан 15% тен астам). Топырақтар реакциясы қышқыл, pH 7,5 тен 8,8 ге дейін, ең үлкен рН мөлшері сортаң және сортаң асты горизонттарда кездеседі.

Топырақтың қазіргі таңдағы бағасы мемлекет пен қоғамның дамуы үшін өте маңызды, себебі географиялық тарадуың есебімен, топырақ құнымен, тиімді пайдаланумен, топырақты пайдаланудағы қорғау мен жоспарлаумен ақпараттандырады.



2 – Күңгірт қара қоңыр топырақ

- 3 Сортаң қара қоңыр топырақ
- 4 Шалғындық қара қоңыр топырақ
- 5 Кәдімгі қара қоңыр топырақ

Сурет. Ақмола облысы Атбасар ауданының топырақ жамылғысы

Заманға сай картографиялық негіздерді түзуде негізгі дәстүрлі жерүсті әдістерін қолдану бірнеше онжылдықтар мен қаржыны талап етеді. Осы мәселені шешу картографиялық өнімді өндірумен байланысты кәсіпорныдардың интеграциялық күштері болып табылады. Мерзімдерді қысқартудың негізгі бір бөлігі картографо-геодезиялық өндірісте жаңа технологиядарға өту болып табылады. Бұл координат геоорталық жүйесіне өту (спутникті координатты анықтауыштардың автономды әдістері арқылы анықтау) және сандық картографияны пайдаланумен ГАЖ-технологиялар пайдалана отырып карта құрастыру.

Топырақтар географиялық объектілер ретінде Жер беті бойынша белгілі заңдылықтарғы сай таратылады. Аналитик тәжірибесінің бар болуына байланысты топырақтың тақырыптық карттауы автоматты режимде өтуі мүмкін. Топырақты зерттеудің далалы, камералді және лабораторлы зерттеу әдістері геоанықтамалық және космостық технологиялар дамуының іргетасы болып саналады. Одан басқа нарық жағдайына негізделген қоғамның түзілуі кезінде ең маңыздысы өндіріс күштерінің таратылуы болып саналады. Олардың арқасында топырақ жамылғысын тиімді пайдалануға реттеледі.

ГАЖ-технологияларын пайдалу арқылы ірімасштабты топырақ картасын құруды ArcGIS бағдарлама өнімі негізінде масштабы – 1:50 000 қағаз карталарын сканерлеумен қатар (эталон учаскелерін іздеу мен бөліп қарау) жүзеге асырылды.

1 суретте Ақмола облысы Атбасар ауданының ірімасштабты топырақ картасы құрылған, ол бізбен топырақ карталар сканерлерінің негізінде жоғарыда көрсетілген әдістемені пайдаланумен жасалған. Топырақ жамылғысы құрылымының картографиялануы үшін маңызды ақпараттар жиынтығы және олардың бағалар саны ГАЖ база мәліметтерінде көрсетіледі. Мәліметтер интеграциясы кеңістіктік және атрибутивтік келесі түрде жүзеге асырылады: топографиялық және тақырыптық карталар негізінде. ГАЖ мәліметтер атрибутты базасының құрылуы тақырыптық карталар сандықталуын қарастырады, олар ортақ картографиялық проекцияда байланысты (масштабы 1:50000 тақырыптық картасына байланысты). Жұмыс нәтижеінде ГАЖ мәліметтер базасы және топырақ жамылғысының картасы құрастырылды.

Топырақ құнарлылығын көтеру үшін жүргізілетін шаралар

Қолайлы физикалық қасиеттері және химиялық құрамына байланысты оңтүстік қара мен қара қоңыр топырақтардың табиғи өнімділігі жоғары болады. Бірақ, осыған қарамастан, қара топырақты дала зонасында кей жылдары құрғақшылыққа байланысты өнім алынбай қалады, кейде тіпті ауыл шаруашылық дақылдары жойылып та кетеді. Оның негізгі себептері топырақта ылғалдың жетіспеуі, шаңды дауылдар мен аңызақтың соғуы, әлсін-әлсін болып тұратын құрғақшылық. Сондықтан, ылғал үшін күресу бойынша жүргізілетін агрономиялық ісшаралар кешенінің маңызы өте жоғары. Топырақта ылғалды жинап ұстау және сақтау әрекеттері әр түрлі, олар: егістікті қорғайтын орман жолақтары, топырақтың құрылымын қалпына келтіру, терең жырту, қопсыту, тегістеу, арамшөптерді жою, қар тоқтату, суару т.б.

Ылғал үшін күресте егістіктерді қорғайтын орман жолақтарының үлесі зор. Орман ағаштары егістіктерде қардың жиналуын және бірқалыпты тегіс таралуын қамтамасыз етеді. Егістікті қорғайтын орман жолақтары қар суының жер бетімен ағып кетуіне кедергі жасай отырып, жыралар пайда болуынан және топырақ эрозиясынын сақтайды. Егістіктерді қорғайтын орман жолақтары желдің жылдамдығын азайту арқылы, құрғақ аңызақ желдің зиянды әсерінен, егілген дәндерді желмен ұшырып кетуінен сақтайды. Орманды аймақтардағы топырақтар атмосфералық жауын-шашынды көп мөлшерде жинақтайды, жер асты суларының қорын жасауға қабілетті, сонымен қатар жер асты суы деңгейін орман жолақтары астында да, олардың аралықтарындағы егістіктер астында да көтере алады. Орманды жолақтардың арасында ауа ылғалдылығы ашық далаға қарағанда жоғары, ол ауыл шаруашылық дақылдарын өсіру жағдайын жақсартады. Қара және қара күнгірт қара қоңыр топырақтардың қолайлы су режимін қамтамасыз етуде егістікті қорғайтын орман жолақтарымен қатар ирригациялық құрылымдар салып, жергілікті су көздері арқылы суару да ерекше орын алады.

Терең жырту арқылы ылғалдың топырақта сақталуын және өсімдіктерге қажетті қоректік заттың жинақталуын қамтамасыз етуге болады, сол арқылы алатын өнім мөлшері де жоғарылайды. Терең жырту арамшөптермен күресудің бір жолы болып табылады.

Қара және қара қоңыр топырақтың құнарлылығын жоғарылату мақсатында тыңайтқыш енгізу де маңызды. Қандай топырақ болсын, өнімділігіне минералдық және органикалық тыңайтқыштар қосу арқылы ықпал етіп отырмаса, үнемі жоғары өнім бере алмайды. Қара және қара қоңыр топырақтарға минералдық тыңайқыштардан – фосфор, азот тыңайтқыштары қолданылады. Органикалық тыңайтқыштардың топырақтардың физикалық және биохимиялық қасиеттерін, құрылымын жақсартудағы, құнарлы қарашірігін арттырудағы үлесі зор. Топыраққа органикалық заттарды көң, қи, т.б. түрінде оқтыноқтын салып тұру қара топырақ құнарлылығын арттырып отырудың нақты жолы.

Қорытынды

Осылай, өткізген зерттеулер нәтижесінде топырақ жамылғысының картографиялануы дәстүрлі жер асты әдістерін геоақпараттық жүйе технологияларымен (ArcGIS) бірге пайдалану арқылы аэрокосмостық суреттерді пайдаланумен жүзеге асырылды. Бұның барлығы топырақтық кешендерді олардың белгілі бір генетико-сызбанұсқалық түрі бойынша, жер бедерінде орналасуы бойынша, сандық көрсеткіштері бойынша бөлініп құрастырылды.

Ауданның биоклиматтық жағдайларының табиғатына қарай, топырақ қалыптастыру тұқымының құрамы мен қасиеттері топырақтың тұз профилі, қарашірінді қабатының қуаттылығына және т.б. байланысты келесі тегіне болінеді: қалыпты, карбонатты, сортаң, толық емес, дамымаған.

Оңтүстік қара топырақ Ақмола облысы Атбасар ауданының жақсы егістік жері. Қазірде олар толық игерілген. Оңтүстік қара топырақтың «жеңіл» сорттары дефляцияға қарсы шараларды енгізуді талап етеді, өйткені қазір бұл топырақтардың айтарлықтай аудандары қатты нашарлады. Орман жолақтарын егу, көпжылдық шөптерді егу, сондай-ақ жолақ егіншіліктің ең тиімді шаралар болып табылады.

Қара қоңыр топырақтар ұзындықтың арқасында, солтүстіктен оңтүстікке қарай созылған қара қоңыр топырақ аның көрсетілген әртектілікпен ерекшеленеді, климаттық жағдайлардың өзгеруінде және ең алдымен, солтүстіктен оңтүстікке дейін құрғақтықты жоғарылатуда байқалады, бұл өз кезегінде топырақөсімдік жамылғысының және тұтастай ландшафттың өзгеруіне әкеледі. Осыған байланысты облыс аумағында қара қоңыр топырақты аймақ үш кіші аймаққа бөлінеді: күңгірт қара қоңыр, кәдімгі қара қоңыр және ашық қара қоңыр топырағы.

қара қоңыр топырақтар жыртуға Күңгірт жарамды жерлер, бірақ олардың сапасы механикалық құрамы өндеген кезде үнтатылған. Агроэкологиялық тұрғыдан қарағанда күңгірт қара қоңыр топырақтар орташа саздақ және ауыр саздақ, әдетте ауылшаруашылық техникасымен оны тиімлі пайдалану мүмкін. Топырақтардың «жеңіл» түрі ауыл шаруашылығында эрозияға қарсы шараларды қолдану жағдайына байланысты. Жоғары және тұрақты өнімділік алу үшін топыраққа ылғалды жинау және сақтау, органикалық тыңайтқыштарды, әсіресе фосфор тыңайтқыштарын қолдану талап етеді, себебі олар жеткілікті түрде фосформен қамтамасыз етілмеген.

Сортаң қара қоңыр топырағы біртекті сілем (массив) болып табылады. Негізінен, олар сортаң кешенде таратылады, қолданылатын сілемге байланысты олардың саны және қолдну сипаты анықталады. Сонымен қатар, бұл күрделі учаскелер көбінесе кішігірім аудандарда шашырайды. Осыған байланысты, осы сілемдерді ауыл шаруашылықта қолдану табиғаттың пайда болу жағдайларына сортаңдар саны бойынша анықталады. Белгілі-бір аумақтарда үлкен алаптарды иеленетін және 20 %дан аспайтын сортандануы бар жерлерді, егін шаруашылығында сортандануға қарсы іс-шараларында және топырақта ылғалдың сақталуы мен жинақталуында қолдануға болады. Егер сортаңдану жалпы аумақтың 20%-дан астамын қамтыса, ауыл шаруашылық дақылдары үшін сілемдердің дамуы күрделі болып табылады және сортаңдардың мелиорациясы (жерді жақсартуға бағытталған техникалық және шаруашылық-ұйымдастырушылық шаралар жиынтығы) үлкен шығынды қамтиды.

Бұл ауданда жел эрозиясы мен шаңды дауылдар халық шаруашылығына үлкен зиян келтіреді. Қара және қара қоңыр топырақтардың құнарлылығын жоғарылату біріншіден ылғал жинақтаумен, суарумен және сортаң топырақтарды гипстеумен, тыңайткыш енгізумен тікелей байланысты. Топырақ қасиеттерін жақсартатын, дұрыс жүргізілген агротехникалық шаралар аса маңызды. Жер өңдеуде қайырмасыз жырту, биік сабақты дақылдар жолағын егу, қорғаныш орман жолақтарын егу жел эрозиясымен күресуде ерекше орын алады.

Әдебиеттер

- 1. Есполов Т.И., Алипбеки О.А., Сейфуллин Ж.Т. и др. О разработке агрогеоинформационной системы Казахстана: постановка проблемы //Исследования. Результаты, 2006. №6. С.3-8.
- Алипбеки О.А. Разработка и внедрение электронного сельского хозяйства путь к повышению конкурентоспособности аграрного производства Казахстана /Повышение конкурентоспособности сельскохозяйственного производства Казахстана: проблемы и пути решения: сб. тр. межд. науч.-практ. конф. – Алматы: Агроуниверситет. - 2007. - С.14-17.
- 3. Есполов Т.И., Алипбеки О.А., Кешуов С.А. О проблеме устойчивого развития агроресурсов и фондов /сб. тр. межд. науч.-практ. конф. посвящ. 70-летию заслуженного работника сельского хозяйства Республики Казахстае Байжуманова А.Б. - Алматы: Бастау.- 2008.- С. 4-6.
- 4. Панин М.С. Экология почв. Алматы: Раритет, 2008. 528 с.
- 5. R. Lal. Soil and environmental degradation in Central Asia /Climate change and terrestrial carbon sequestration in Central Asia. Taylor & Francis/Balkema. - 2007. - 493 p.
- 6. Салихов Т.Қ. Топырақтану: оқулық Алматы: «Эверо» баспасы, 2016.– 457 бет.
- 7. Алтаев Ж. ГИС и земельный кадастр Казахстана //ArcReview, 2003. № 2 (25) http://dataplus.ru/Arcrev/Number_25/ 2_Kazah.htm.
- 8. Алтаев, Ж.С. ГИС и земельный кадастр Казахстана 2. Навсегда? //ГИС и земельный кадастр Казахстана 2. Навсегда? ArcReview, 2005. - № 2 (33) - http://dataplus.ru/ Arcrev/ Number_33/Index.htm
- 9. Салихов Т.К. Современное состояние плодородия почвенного покрова геоэкосистем Лубенского сельского округа //Вестник Казахско-Британского технического университета. - 2017. - № 1. - С. 52-55
- 10. Салихов Т.К. Лубен ауылдық округінің геоэкожүйелеріндегі топырақ жамылғысының қазіргі кездегі жағдайы //Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстана. 2017. № 1. С. 113-119
- 11. Редков В.В. Почвы Целиноградской области Алмата: Наука, 1964. 326 с.

ИЗУЧЕНИЕ ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА АТБАСАРСКОГО РАЙОНА АКМОЛИНСКОЙ ОБЛАСТИ НА ОСНОВЕ ПРИМЕНЕНИЯ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ

Салихов Т.К., Салихова Т.С.

Евразийский национальный университет имени Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

Повышение эффективности использования земель сельскохозяйственного назначения на основе сохранения и повышения плодородия почв является одной из приоритетных задач почвоведения, решение которой имеет ключевое значение в обеспечении устойчивого развития аграрного сектора экономики и продовольственной безопасности страны. Сохранение и повышение плодородия почв является основной частью общей проблемы рационального использования земельных ресурсов, увеличения продуктивности и улучшения почвенной экологии агроландшафтов. Современная оценка почв является актуальной для развития государства и общества т.к. обеспечивает информацией об учете географического распределения, о стоимости почв, о рациональном использовании, об охране и планировании использования почв. В результате работы сформированы тематические карты и атрибутивные базы данных ГИС: почв. В результате исследований на основе ГИС-технологии разработана цифровая почвенная карта Атбасарского района Акмолинской области с помощью программного продукта ArcGIS.

Ключевые слова: геоинформационные системы, почвенный покров, южный чернозем, каштановые почвы.

THE STUDY OF SOIL COVER OF THE ATBASAR DISTRICT OF AKMOLA REGION ON THE BASIS OF GIS-TECHNOLOGIES

T.K. Salikhov, T.S. Salikhova

L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

Improving the efficiency of agricultural land use on the basis of conservation and improvement of soil fertility is one of the priorities of soil science, the solution of which is of key importance in ensuring sustainable development of the agricultural sector of the economy and food security of the country. The preservation and improvement of soil fertility is a major part of the general problem of rational use of land resources, increasing productivity and improving the soil ecology of agricultural landscapes. The modern assessment of soil is relevant for the development of the state and society because provides information on the accounting of geographical distribution, on the value of the soil, on rational use, on the protection and planning of the use of soil. As a result of the work, thematic maps and GIS attributive databases were formed: soils. As a result of research based on GIS technology, a digital soil map of the Atbasar region of the Akmola region has been developed using the ArcGIS software.

Keywords: geographic information systems, soil cover, southern chernozem, chestnut soils.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ОБЛУЧЕННОГО ТОПЛИВА ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА

¹⁾ Гизатулин Ш.Х., ¹⁾ Дюсамбаев Д.С., ¹⁾ Шаймерденов А.А., ¹⁾ Сильнягин П.П., ¹⁾ Буртебаев Н.Т., ²⁾ Уета Ш.

¹⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ²⁾ Japan Atomic Energy Agency, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki, Japan

РГП «Институт ядерной физики» Министерства энергетики Республики Казахстан совместно с агентством по атомной энергии Японии на протяжении ряда лет проводят исследования, направленные на развитие технологии высокотемпературного газоохлаждаемого реактора (ВТГР). Настоящая работа посвящена разработке технологии исследования свойств облученного топлива реактора ВТГР. Объектом исследования являются топливные элементы реактора ВТГР. Потливные элементы содержат микротвэлы, представляющие собой сферическое трехструктурное изотропное топливо с внешним диаметром 0,92 мм. Микротвэлы имеют тройную оболочку из пироуглерода и карбида кремния. Микротвэлы спрессованы с графитовой матрицей в компакт.

В задачи исследований входят:

- внешний осмотр и анализ размеров топливного компакта;
- отделение микротвэлов от графитовой матрицы;
- определение доли поврежденных микротвэлов;
- определение выгорания урана.

Подобные исследования в институте проводятся впервые. Для реализации вышеописанных задач потребовалось разработать технологию обращения с облученным ядерным топливом. Полученные результаты будут применены для квалификации топлива ВТГР с целью дальнейшего увеличения глубины выгорания урана в нем.

Ключевые слова: ВТГР, ВВР-К, топливо, микротвэл, выгорание.

Введение

Согласно прогнозу развития энергетики мира до 2040 года ежегодно происходит рост энергопотребления на уровне 1,3 % [1, 2]. Основные виды энергоисточников это: нефтяное топливо, газовое топливо, уголь, атомная энергетика и альтернативные виды такие, как солнечная и ветряная энергетика. Альтернативная энергетика в Казахстане только начинает развиваться, и ее доля в общем энергобалансе страны незначительна. Наибольшее распространение в Казахстане имеют электрические станции, работающие на угле, но при работе такой станции выделяется много углекислого газа, что отрицательно влияет на окружающую среду. В Казахстане до 1998 года эксплуатировалась атомная энергетическая станция (АЭС), но в настоящее время она находится в режиме снятия с эксплуатации. Атомная энергетика является более экологически чистой и может внести существенный вклад в общую картину энергобаланса в стране. Сейчас проводится технико-экономическое обоснование по выбору площадки, а также типа и мощности реактора. Одним из претендентов является ВТГР, который способен вырабатывать не только электроэнергию, но и высокоэнтальпийное тепло для промышленности Казахстана, а также водород для энергетики будущего.

Высокотемпературный реактор типа ВТГР рассматривается как один из наиболее перспективных кандидатов на роль ядерной энергетической системы четвертого поколения (GEN-IV) и многие страны ведут разработки по его созданию. В основном все исследования направлены на решение двух задач – это безопасность и экономичность реактора.

Начиная с 2010 года в РГП «Институт ядерной физики» совместно с агентством по атомной энергии Японии ведутся работы по исследованию трехструктурного изотропного топлива [3]. Исследуемое топливо является эталонным топливом для коммерческого ВТГР, названного HTR50S [4]. Исследования направлены на увеличение уровня выгорания урана в топливе при сохранении целостности оболочек микротвэлов. Это приведет к повышению экономической эффективности реактора.

На сегодняшний день получены образцы топлива с расчетным значением выгорания урана в топливе на уровне 90 ГВт сут/т [5]. Разработана и адаптирована технология по отделению микротвэлов от графитовой матрицы для проведения дальнейших послереакторных исследований. Ведутся работы по отработке разработанной технологии с применением необлученного топлива.

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИССЛЕДОВАНИЯ СВОЙСТВ ОБЛУЧЕННОГО ТОПЛИВА ВЫСОКО-ТЕМПЕРАТУРНОГО ГАЗООХЛАЖДАЕМОГО РЕАКТОРА

В 2015 году были успешно завершены ресурсные испытания топлива ВТГР на исследовательском реакторе ВВР-К. Во время ресурсных испытаний на реакторе ВВР-К были воссозданы режимы работы ВТГР, т.е. гелиевая среда и высокая температура (>1000°С) [6]. Достигнуто выгорание урана в топливе

на уровне 90 ГВт·д/т. Выгорание топлива определялось расчетным путем с применением компьютерного кода MCU-REA. В 2017 году начаты работы по исследованию свойств этого топлива. Работы проводятся при финансовой поддержке международного научно-технического центра (МНТЦ).

В связи с тем, что облученное топливо имеет большую радиоактивность, все работы с ним должны проводится дистанционно, т.е. в «горячих» камерах. Для этого была адаптирована одна «горячая» камера реактора BBP-К (рисунок 1), в которой была улучшена биологическая защита, установлены дополнительные датчики контроля радиационной обстановки и дополнительные фильтры для поглощения газообразных продуктов деления.



Рисунок 1. «Горячая» камера реактора ВВР-К

Предварительно, перед началом работ, проведена оценка достаточности радиационной защиты в используемой «горячей» камере. Для этого проведены инженерные расчеты защиты и реальные измерения ослабления гамма-излучения с использованием источника ионизирующего излучения. В результате оказалась, что имеющейся защиты недостаточно для работы с образцами топлива ВТГР, поэтому была усилена защита «горячей» камеры изнутри. Дополнительная защита собрана из стандартных свинцовых кирпичей с толщиной 3 см.

Для непрерывного контроля радиационной обстановки при работе с облученными топливными компактами внутри «горячей» камеры и в рабочем пространстве оператора были установлены блоки детектирования ДБГ-С11д с пультом измерителем УИМ-Д (рисунок 2). Блок детектирования регистрирует гамма кванты с энергией 0,05÷3,0 МэВ и имеет диапазон измерения гамма-излучения 0,1 мкЗв/ч÷10 Зв/ч.



Рисунок 2. Расположение блоков детектирования

«Горячая» камера подключена к специальной системе вытяжной вентиляции. Система оснащена фильтрами, которые удаляют радиоактивные аэрозоли и йод из воздуха, выпускаемого в окружающую среду. В химической коробке система вентиляции оборудована также дополнительным фильтрующим устройством с фильтрами двух типов: (а) против аэрозолей и (б) сорбента. Устройство удаляет радиоактивные и токсичные вещества различного типа из воздуха, поступающего из коробки в систему вентиляции. Аэрозольный фильтр используется для очистки воздуха от дымовых, радиоактивных и токсичных веществ, аэрозолей и высокодисперсной пыли. Фильтр изготовлен из специального гофрокартона. Сорбент представляет собой активированный уголь, покрытый химическим абсорбером (щелочь) и катализатором (соли железа, меди, марганца и хрома). Абсорбция паров и газов в сорбенте осуществляется за счет адсорбции, хемосорбции и катализа.

Параллельно с вышеперечисленными работами проводилась разработка специального устройства, которое предназначено для отделения микротвэлов от графитового компакта. В основу этого устройства была взята модель, которая использовалась на реакторе HTTR в Японии во время исследования топлива этого реактора. Это устройство было доработано и адаптировано для «горячей» камеры реактора BBP-K. Схема устройства показана на рисунке 3.

Устройство предназначено для отделения микротвэлов от графитового компакта и выщелачивания урана из микротвэлов с поврежденными оболочками. Для разделения будет использоваться метод электролитической диссоциации, а выщелачивание будет проводится азотной кислотой.



1 – крышка, 2 - выход на «холодильник», 3 – термопара, 4 – анод, 5 – катод, 6 – пробка, 7 - стеклянный сосуд, 8 - топливный компакт, 9 - подставка

Рисунок 3. Схема устройства для электрической диссоциации и кислотного выщелачивания

Важными аспектами являются подбор параметров эксперимента, таких, как концентрация и температура азотной кислоты, ток, подаваемый на анод и катод, длительность диссоциации.

В результате было разработано специальное устройство для электролитической диссоциации и кислотного выщелачивания. Конструктивно данная установка удобна для работы в «горячей» камере с помощью манипуляторов. Устройство оснащено кислотно-стойкой термопарой для измерения и регулирования температуры кислоты.

С целью отработки разработанного устройства и методик эксперимента были проведены пробные эксперименты с образцами из реакторного графита и необлученными топливными образцами. По результатам серии экспериментов были окончательно подобраны необходимые параметры.

Методы исследований

Для решения вышеописанных задач будут применены два метода: гамма спектрометрический и радиографический анализ.

С помощью гамма спектрометрического анализа будут определены выгорание урана в топливе и доля поврежденных микротвэлов. Для этого будет применен широкодиапазонный гамма спектрометр компании Canberra. Схема гамма-спектрометра показана на рисунке 4. Выгорание урана в топливе будет определяться по наличию реперных продуктов деления (¹³⁴Cs, ¹³⁷Cs) и сравнению с их значениями, рассчитанными ранее с применением компьютерного кода MCU-REA, что позволит уточнить ранее определенную степень выгорания топлива.

Доля поврежденных микротвэлов Ф будет определяться следующим образом:

$$\Phi = \frac{A_i}{P_i \cdot X'}$$

где A_i – общее количество продуктов деления в выщелоченном растворе (Бк), P_i – общее количество продуктов деления в топливных частицах (Бк), X – число топливных частиц, содержащихся в топливном компакте.

Как известно, радиографический анализ – это совокупность методов исследования объектов, предназначенная для определения в них пространственного распределения и локальной концентрации элементов без разрушения исследуемых образцов в результате воздействия ионизирующих излучений на специальные детекторы. В нашем случае будет применен рентгенографический анализ, с помощью которого будут проанализированы все микротвэлы после кислотного выщелачивания. Полученные снимки подтвердят наличие повреждений оболочек микротвэлов, если этот факт будет иметь место. Технические характеристики рентгеновского аппарата (рисунок 5) приведены в таблице.



 свинцовый домик, 2 - германиевый полупроводниковый детектор, 3 - сосуд Дьюара с жидким азотом, 4 - многоканальный анализатор, 5 - компьютер

Рисунок 4. Схема гамма-спектрометра



Рисунок 5. Устройство для рентгеновской радиографии

Литература

- Прогноз развития энергетики мира и России до 2040 года // ФГБУН «Институт энергетических исследований Российской академии наук», Аналитический центр при Правительстве Российской Федерации. – 2013.
- 2. Рюль К. ВР: Прогноз развития мировой энергетики до 2030 года / К. Рюль // Вопросы экономики. Т.5. 2013.
- Ueta S. Irradiation Performance of HTGR Fuel in WWR-K Research Reactor / S. Ueta, A. Shaimerdenov, S. Gizatulin, L. Chekushina, M. Honda, M. Takahashi, K. Kitagawa, P. Chakrov, N. Sakaba // Proc. HTR2014, Weihai, China, October 27-31, 2014, Paper HTR2014-31213. – 2014.
- Ohashi H. A Small-Sized HTGR System Design for Multiple Heat Applications for Developing Countries / H. Ohashi, H. Sato, M. Goto, X. Yan, J. Sumita, Y. Tazawa, Y. Nomoto, J. Aihara, Y. Inaba, Y. Fukaya, H. Noguchi, Y. Imai, Y. Tachibana // Int. J. Nucl. Ener., Article ID 918567. – 2013.
- Ueta S. Irradiation test and post irradiation examination of the high burnup HTGR fuel / Shohei Ueta, Jun Aihara, Asset Shaimerdenov, Daulet Dyussambayev, Shamil Gizatulin, Petr Chakrov, Nariaki Sakaba // Proceeding of 8th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, November 6-10, 2016 Las Vegas, NV, USA. – pp. 246-252. – 2016.
- Shaimerdenov A.A. Investigation of irradiated propertied of extended burnup TRISO fuel / A.A. Shaimerdenov, Sh.Kh. Gizatulin, Ye.Kenzhin, D.S. Dyussambayev, S. Ueta, T. Shibata // Proceeding of International Conference on High Temperature Reactor Technology, October 8-10, 2018, Warsaw, Poland. – 2018.

ЖОҒАРЫ ТЕМПЕРАТУРАЛЫҚ ГАЗБЕН САЛҚЫНДАТЫЛАТЫН РЕАКТОРДЫҢ СӘУЛЕЛЕНГЕН ОТЫНЫНЫҢ ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

¹⁾ Ш.Х. Гизатулин, ¹⁾ Д.С. Дюсамбаев, ¹⁾ А.А. Шаймерденов, ¹⁾ П.П. Сильнягин, ¹⁾ Н.Т. Буртебаев, ²⁾ Ш. Уета

¹⁾ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан ²⁾Жапония Атом Энергиясы агенттігі, Оарай ауылы, Хигасиибараки ауданы, Ибараки префектурасы, Жапония

Қазақстан Республикасы Энергетика министрлігінің РМК «Ядролық физика институты» Жапонияның атом энергиясы агенттігімен бірлесе отырып бірнеше жыл бойы жоғары температуралық газбен салқындатылатын реактор технологиясын дамытуға бағытталған зерттеулер жүргізуде.

Бұл жұмыс ЖТГР реакторының сәулелендірілген отынының қасиеттерін зерттеу технологиясын дамытуға арналған. Зерттеу нысаны – ЖТГР реакторының отын элементтері. Отын элементтері сыртқы диаметрі 0,92 ммлік үш құрылымды сфералық изотропты отын болып табылатын микро жылу шығарушы элементерден тұрады. Микро жылу шығарушы элементтері пирокөміртегі мен кремний карбидінен туратын үш қабықшаға ие. Олар графит матрицасымен қоса ықшамға тығыздалған.

Таблица.	Технические характеристики рентгеновского	
	аппарата РПД-250С	

Анодное напряжение на рентгеновской трубке	100–250 кВ
Ток анода рентгеновской трубки	1–5 мА
Время экспозиции	1–998 сек
Рабочий пучок	прямой, конический с углом при вершине 40°×60°

Результаты

Разработанная технология позволит провести исследования свойств облученного топлива ВТГР. Послереакторные исследования будут проведены в «горячих» камерах исследовательского реактора ВВР-К.

Пробные эксперименты с необлученным топливом ВТГР показали, что разработанное устройство и методика проведения экспериментов полностью подходит для решения заявленных задач.

Полученные в результате исследований данные будут применены для улучшения конструкции топлива с целью увеличения степени выгорания.

Зерттеудің мақсаттары:

- отын ықшамын сырттай тексеру және өлшемін талдау;
- микро жылу шығарушы элементтерді графит матрицасынан бөлу;
- зақымдалған микро жылу шығарушы элементтердің үлесін анықтау;
- уранның жануын анықтау.

Мұндай зерттеулер институтта алғаш рет жүргізілуде. Жоғарыда сипатталған мақсаттарды орындау үшін сәулелендірілген ядролық отынды пайдаланудың өңдеу технологиясын әзірлеу қажет болды. Алынған нәтижелер ЖТГР отынын бағалау үшін ондағы уранның жануын одан әрі жоғарылату мақсатында пайдаланылатын болады.

Түйінді сөздер: ЖТГР, ССР-Қ, отын, микро жылу шығарушы элемент, отынның жануы.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY TO STUDY PROPERTIES OF IRRADIATED FUEL OF HIGH-TEMPERATURE GAS-COOLED REACTOR

¹⁾ Sh.Kh. Gizatulin, ¹⁾ D.S. Dyussambayev, ¹⁾ A.A. Shaimerdenov, ¹⁾ P.P. Silnyagin, ¹⁾ N. Burtevayev, ²⁾ Sh. Ueta

¹⁾ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan

²⁾ Japan Atomic Energy Agency, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki, Japan

RSE "Institute of Nuclear Physics" of the Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan, together with the Atomic Energy Agency of Japan over the years have been conducting research aimed at developing the technology of a high-temperature gas-cooled reactor (HTGR). This paper is devoted to the development of technology to study the properties of the irradiated fuel of the HTGR reactor. The object of research is the fuel elements of the HTGR reactor. Fuel cells contain particles, which is a spherical three-structured isotropic fuel with an outer diameter of 0.92 mm. Particles have a triple coating of pyrocarbon and silicon carbide. Particles pressed with a graphite matrix in a compact.

The objectives of the research include:

- external inspection and analysis of the size of the fuel compact;
- separation of particles from the graphite matrix;
- determination of the proportion of damaged particles;
- determination of uranium burnout.

Such studies are conducted at the institute for the first time. To accomplish the above tasks, it was necessary to develop a technology for handling irradiated nuclear fuel. The results obtained will be used to qualify the HTGR fuel in order to further increase the burnup of uranium in it.

Keywords: HTGR, WWR-K, fuel, particle, burnout.

УДК: 621.039.531:669

ИЗУЧЕНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ МАТЕРИАЛОВ ОТРАБОТАВШИХ ТВС РЕАКТОРА БН-350 В УСЛОВИЯХ ДЛИТЕЛЬНОГО ТЕРМИЧЕСКОГО СТАРЕНИЯ

Кожахметов Е.А., Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е., Мухамеджанова Р.М., Бельдеубаев А.Ж.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

kozhahmetov_e@nnc.kz

В работе представлены результаты испытаний облученных образцов материала различных ОТВС РУ БН-350 в условиях длительного и постоянного воздействия температуры и механической нагрузки. Определены зависимости прочностных характеристик образцов материала ОТВС из стали марки 12X18H10T от температуры и постоянной нагрузки путем кратковременных испытаний на одноосное растяжение. Исследован характер излома образцов материала ОТВС до и после испытаний.

Ключевые слова: реактор БН-350, тепловыделяющая сборка, оболочка, карбиды, карбонитриды, вязкое разрушение, квазистатическое разрушение.

Введение

В настоящее время определение физико-механических характеристик и прогнозирование поведения конструкционных материалов при долговременном хранении являются важными задачами развития атомной отрасли, поскольку длительное хранение является неотъемлемой частью обращения с отработавшим топливом.

Долговременное хранение (4–50 лет) в металлических и металлобетонных контейнерах, «сухих» модульных камерах-хранилищах, «мокрых» хранилищах, является одним из широко используемых методов хранения ОЯТ. Обоснование гарантируемого ресурса критических компонентов и конструкций ядерных реакторов, особенно при долговременном хранении, требует надёжной информации об изменении исходной структуры конструкционных материалов, их механических свойств, химическом составе после воздействия реакторного излучения, температуры и среды [1].

Учитывая, что контроль температуры, давления или состояния топливных сборок при хранении не предусмотрены, единственным инструментом для оценки состояния топливных сборок остается проведение модельных исследований с облученными материалами, и экстраполяция экспериментальных данных на последующие условия хранения ТВС [2]. Данные результаты будут востребованы как для корректного прогнозирования поведения топливных сборок при длительном сухом хранении, так и для разрабатываемых проектов, связанных с надёжностью конструкционных материалов, работающих в условиях реакторного излучения.

Объект исследования и методика испытаний

Образцы для испытаний были вырезаны из пластины стали 12X18H10T размерами 50×20×2 мм, в свою очередь вырезанной из штатных ОТВС на участке «0 мм» от ЦАЗ. За время эксплуатации образцы получили повреждающие дозы в интервале от 12 сна до 59 сна. Подробные характеристики выбранных образцов стали приведены в таблице 1.

Для проведения испытаний в условиях длительного и постоянного воздействия температуры и механической нагрузки на материалы различных ОТВС РУ БН-350 были изготовлены специальные «образцы – лопатки».

Методика изготовления данных образцов включала два основных этапа:

1-й этап – разделка фрагментов, вырезанных из грани чехла различных типов ОТВС БН-350, на прямоугольные заготовки для образцов (рисунок 1-а);

2-й этап – изготовление образцов из полученных прямоугольных заготовок (рисунок 1-б).

Наименование изделия, материал	Чехол Н-214	Чехол ЦЦ-15Т	Чехол ЦЦ-19		
Наработка, эфф. сутки	3696,7 291,8		370,9		
Координаты относительно ЦАЗ, размеры, мм	«0 мм», 50×20×2				
φ _t , 10 ²³ см⁻² (макс. доза, сна)	0,7 (~12)	1,731 (~48)	1,944 (~59)		
Мощность реактора, МВт	750	650	680		
Т _{вх} – Т _{вых} , °С	290-450				
Макс. скорость набора дозы, 10⁻⁵ сна/с	0,038	1,91	1,84		

Таблица 1. Характеристики отобранных образцов ОТВС РУ БН-350

Разделка фрагментов грани чехла различных типов ОТВС БН-350 на прямоугольные заготовки осуществлялась с помощью проволочно-вырезного электроэрозионного станка типа 4531. Изготовление образцов из заготовок осуществлялось методом электроэрозионной прошивки, с помощью специально изготовленной оснастки, на станке типа 4531.

После каждого этапа работ вырезанные заготовки подвергались механической шлифовке и полировке на станке *Forcipol 1V* с применением водяного охлаждения. Из каждого чехла ОТВС изготавливалось по четыре образца, преимущественно из центральной части, то есть наибольший съем материала при шлифовке осуществлялся из периферийной части. Типичное изображение образца из материала сборки H-214 после этапов разделки и прошивки электроэрозионным методом представлено на рисунке 1.



а) заготовка после разделки и финишной обработки



 б) готовый образец после электроэрозионной прошивки



 в) схема «образцов - лопаток» для испытаний с основными геометрическими параметрами

Рисунок 1. Изображение образца на различных этапах его изготовления

Кратковременные механические испытания образцов на одноосное растяжение при комнатной температуре проводились при помощи универсальной испытательной машины *INSTRON 5966*. Испытания в условиях длительного и постоянного воздействия температуры и механической нагрузки при одноосном растяжении проводились на испытательной машине «КОРИНА», разработанной на базе Филиала «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, которая позволяет проводить испытания, максимально приближенные к условиям длительного сухого хранения ОЯТ. Данная установка позволяет поддерживать в ходе эксперимента постоянную скорость деформации или постоянную нагрузку на образец. Условия проведения испытаний: среда – «воздух», температура 400 °С (изотермический процесс), длительность 300 ч.

Перед началом испытаний образец устанавливался в захваты. Зафиксированные захваты помещались в высокотемпературную камеру. После достижения температуры испытаний (время достижения не более 10 мин.) образец нагружали до установленного значения и выдерживали при постоянной растягивающей нагрузке в течение заданного времени или до полного разрушения образца.

Исследования характера излома образцов материала чехла ОТВС после испытаний выполнялись на сканирующем электронном микроскопе *TESCAN VEGA3* в режиме вторичных и отраженных электронов с применением системы энергодисперсионного микроанализа.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Перед проведением изотермических испытаний образцов материала чехла ОТВС, подвергавшихся различным дозам облучения, необходимо было определить нагрузку на образец для каждого типа материала чехла ОТВС. Значение нагрузки на образец определялось из условия 0,9 $\sigma_{0,2}$ (условный предел текучести). Для определения условного предела текучести были проведены механические испытания образцов на одноосное растяжение при комнатной температуре на универсальной испытательной машине INSTRON 5966 co скоростью перемещения 2,5 мм/мин. Исходные данные для определения σ_{0.2}, полученные экспериментальным путем, приведены в таблице 2.

Наименование образца	Деформация при растяжении, %	Условный предел текучести σ _{0,2} , Н/мм ²	Максимальное напряжение σ _в , МПа	
Чехол ЦЦ-19	24,8	850,97	1311,3	
Чехол ЦЦ-15Т	20,1	780,8	1102,5	
Чехол Н-214	14,9	929,8	1059,7	

$1 u 0 \pi u u u 2. \Pi c \pi 0 0 \pi 0 e 0 u \pi 0 e 0 \pi 0 u c e \pi u \pi u c p v s r$	Таблииа	2.	Исходные	данные	для	расчета	нагрузк
--	---------	----	----------	--------	-----	---------	---------

Из таблицы 2 видно, что облучение материалов чехла ОТВС из стали марки 12Х18Н10Т привело к повышению их прочностных характеристик. Это согласуется с представлениями о том, что характеристики прочности и пластичности материалов активной зоны чувствительны по отношению к параметрам облучения (температура, повреждающая доза). Образцы из центральных сборок с большой дозой облучения обладают значительно более высокой пластичностью и пределом прочности (σ_B) по сравнению с образцом экранной сборки. В то же время значение предела текучести ($\sigma_{0,2}$) образца экранной сборки H-214 наибольшее по сравнению с образцами центральной сборки.

В ходе проведения испытаний в условиях длительного и постоянного воздействия температуры и механической нагрузки образец экранной ОТВС H-214 разрушился по достижению 280 ч. Когда уровень приложенного напряжения близок к пределу текучести материала чехла ОТВС, увеличение деформации происходит быстрее и приводит к разрушению образца.



Рисунок 2. Рельеф излома облученного образца из материала чехла ОТВС H-214

Поверхность образца материала чехла ОТВС H-214 до и после длительных испытаний представляет из себя квазистатический характер разрушения с присущими ему характеристиками излома. Изображения поверхности излома аустенитной стали до и после длительных испытаний, полученные с помощью сканирующего электронного микроскопа, представлены на рисунках 2 и 3. Из приведенных на рисунке 2 фрактограмм видно, что в исходном состоянии излом имеет вязкий внутризеренный ячеистый характер. Участки межзеренного разрушения отсутствуют.

Характер излома образца сборки H-214 после испытаний имеет смешанный вид хрупко-вязкого разрушения (рисунок 3), и, можно предположить, что разрушение произошло в результате развития процесса коррозионного растрескивания. Неоднородность поверхности излома свидетельствует о нестабильном развитии хрупко-вязкого разрушения. Ямочный характер разрушения области (а) и (б) свидетельствует о вязком разрушении на этом участке. На изломе образца в области вязкого разрушения после испытаний изменяются размер и форма ямок, то есть наблюдается переход формы ямок из круглой в эллипсоидную.

Область (в) характеризуется тем, что при испытании механизм распространения трещины по ней был в виде внутризеренного скола, для которого характерно образование межзеренных фасеток в виде многоугольников, образующихся при разрушении по одной грани зерна. Доля области хрупкого разрушения в изломе образца составляет примерно 25 %.

Образцы центральных ОТВС ЦЦ-15Т и ЦЦ-19 после испытания длительностью 300 ч при температуре 400 °С не разрушились. На испытанных образцах сборки ЦЦ-15Т и ЦЦ-19 остаточная пластическая деформация не наблюдалась, что вполне ожидаемо, так как регистрируемое удлинение происходит в упругой зоне. Кривая зависимости деформации є от времени t при постоянной нагрузке и температуре для образцов ЦЦ-15Т и ЦЦ-19 представлена на рисунке 4.

Длительные испытания при постоянной нагрузке температуре показали, что на диаграмме И зависимости деформации от времени наблюдаются две основные стадии: участок затухающей ползучести и участок установившейся ползучести. Для начальной стадии характерна высокая скорость ползучести, продолжительность этой стадии для обоих образцов около ~ 50 часов. Вторая стадия стадия установившейся ползучести, для которой характерна постоянная скорость деформации. Наибольший интерес представляет собой стадия установившейся ползучести, т.к. именно она определяет долговременную прочность материала. Значения максимально достижимой деформации и скорости деформации позволят оценить период времени до разрушения материала [3].



Рисунок 3. Рельеф излома облученного образца из материала чехла OTBC H-214 после длительных испытаний на растяжение при комнатной температуре



Рисунок 4. Зависимость деформации от времени испытаний для облученных образцов материала чехла ОТВС (ЦЦ-15Т, ЦЦ-19) центрального типа

После длительных механо-термических испытаний с целью определения изменений в физико-механических свойствах были проведены испытания на растяжение при комнатной температуре до разрушения образцов. Основные данные по прочностным характеристикам образцов после механо-термических испытаний представлены в таблице 3.

Габлица 3.	Прочностные характе	ристики	образцов
посл	е механо-термических	испытан	ий

Наименование образца	Деформация при растяжении, %	Условный предел текучести, Н/мм²	Максимальное напряжение, МПа
Чехол ЦЦ-19	29,4	790,4	1033,9
Чехол ЦЦ-15Т	25,9	653,2	962,7

По результатам испытаний обоих образцов наблюдается уменьшение эффекта радиационного упрочнения, предположительно это обусловлено частичным отжигом радиационных дефектов. Также необходимо отметить увеличение пластичности исследуемых образцов примерно на 5 %, что ожидаемо, так как длительные механо-термические испытания привели к увеличению разницы между пределом прочности и пределом текучести ($\sigma_B - \sigma_{0.2}$).

На рисунке 5 представлены фрактограммы поверхности разрушения образцов ЦЦ-15Т и ЦЦ-19 материала чехла ОТВС БН-350 (увеличение: ×140, ×4000) после испытаний на растяжение при комнатной температуре. На поверхности наблюдаются поперечные борозды, образование которых возможно связано с наличием включений в материале. При больших увеличениях видно, что для поверхности излома характерно вязкое разрушение и наличие ямочного микрорельефа. Очаг разрушения в обоих случаях расположен в центральной зоне. Поверхность разрушения матовая, неровная. В центральной части шейки образца вязкое разрушение характеризуется наличием разносных ямок нормального отрыва, разделенных гребнями с острыми краями, которые образовались в результате слияния микропор (рисунок 5).

При исследовании поверхности излома всех образцов методом СЭМ было обнаружено присутствие большого количества включений (рисунок 6). Проведенный рентгеновский спектральный микроанализ показал, что включения представляют собой, в основном, карбидные и карбонитридные фазы. Данного типа фазы наблюдаются в образцах как в исходном состоянии, так и после длительных механо-термических испытаний. При совместном воздействии длительной температурной выдержки и постоянной нагрузки, количество и размер крупных карбонитридных фаз не изменяются, в то время как количество и размер мелких карбидов на основе хрома в исследованных образцах несколько увеличивается.



б)

Рисунок 5. Макро- и микрорельеф излома образца материала чехла ОТВС ЦЦ-15Т (а) и ЦЦ-19 (б) после испытаний на растяжение



Рисунок 6. Фотография излома, где наблюдается неметаллическое включение образцов из материала чехла ОТВС

Выводы

1. Образцы из центральных сборок (ЦЦ-15Т, ЦЦ-19) с большой дозой облучения обладают значительно более высокой пластичностью и пределом прочности (σ_B) по сравнению с образцами экранной сборки (H-214). В то же время величина предела текучести ($\sigma_{0.2}$) образцов экранной сборки наибольшая по сравнению с образцами центральной сборки. Также экспериментально установлено, что близкое значение уровня приложенного напряжения к пределу текучести образца материала чехла ОТВС приводит к быстрому увеличению деформации и разрушению образца во время длительных испытаний.

2. Фрактографические исследования поверхностей разрушения образцов материала ОТВС после испытаний и в исходном состоянии показали, что на всей поверхности излома образцов наблюдается вязкое разрушение и наличие ямочного микрорельефа. Очаг разрушения во всех случаях расположен в центральной зоне. Структура поверхности разрушения неровная. В центральной части шейки образцов вязкое разрушение характеризуется наличием образовавшихся путем слияния микропор разносных ямок нормального отрыва, разделенных гребнями с острыми краями.

3. На поверхности излома всех образцов до и после испытаний было обнаружено присутствие большого количества карбидных и карбонитридных фаз. Установлено, что при совместном длительном воздействии длительной температуры и постоянной нагрузки количество и размеры крупных карбонитридных фаз не изменяются, в то время как количество и размеры мелких карбидов на основе хрома в исследованных образцах увеличивается.

Литература

- Коянбаев Е.Т., Максимкин О.П., Азимханов А.С., Изучение поведения отработавших топливных сборок ядерных реакторов при их длительном сухом хранении // В кн. «Экспериментальные исследования в области безопасности атомной энергии, ч. 1» – Курчатов, НЯЦ РК. – 2010. – с. 331–348.
- Коянбаев Е.Т., Ситников А.А., Скаков М.К., Бакланов В.В., Яковлев В.И., Прогнозирование изменений структуры и свойств конструкционных материалов реактора БН-350 во время длительного сухого хранения ОЯТ // Ползуновский Вестник No 4 T.2 2016, с. 207–211.
- Голованов В.Н., Неустроев В.С., Повстянко А.В., Шамардин В.К., Изменение механических свойств стали ОХ16Н15МЗБ в температурном интервале радиационного распухания. // Препринт НИИАР 30 (711) 1986 г.
- Кислицин С.Б., Диков А.С., Сатпаев Д.А., Ларионов А.С., Пострадиационные испытания конструкционных сталей материалов чехлов отработавших ТВС реактора БН – 350 // 11-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 23-25 сентября 2015 г., Минск, Беларусь.
- Гурович Б.А., Кулешова Е.А., Мальцев Д.А., Федотова С.В., Фролов А.С., Забусов О.О., Салтыков М.А., Структурные исследования стали 15Х2НМФАА и ее сварных соединений после длительных термических выдержек и облучения при рабочей температуре корпуса реактора // Известие вузов, Ядерная энергетика № 4 июнь – 2012.
- 6. Koji FUKUYA, Morihito NAKANO, Katsuhiko FUJII, Tadahiko TORIMARU, IASCC Susceptibility and Slow Tensile Properties of Highly-irradiated 316 Stainless Steels. // Journal of Nuclear Science and Technology, 41:6, 673-681.
- Воробьев В. Л., Быков П. В., Баянкин В. Я., Влияние скорости набора дозы ионов марганца на изменение механических свойств, морфологии и состава поверхностных слоев углеродистой стали // ФИЗИКА МЕТАЛЛОВ И МЕТАЛЛОВЕДЕНИЕ, 2012, том 113, № 11, с. 1153–1159.

¥ЗАҚ ТЕРМИЯЛЫҚ ҚАРТАЮ ЖАҒДАЙЫНДА БН-350 РЕАКТОРЫНЫҢ ПАЙДАЛАНЫЛҒАН ТВС МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ ФИЗИКАЛЫҚ-МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ӨЗГЕРУІН ЗЕРТТЕУ

Е.А. Кожахметов, Е.Т. Коянбаев, Е.Е. Сапатаев, Р.М. Мухамеджанова, А.Ж. Бельдеубаев

Қазақстан, Курчатов қ., ҚР ҰЯО Атом Энергия Институты

kozhahmetov_e@nnc.kz

Жұмыста температура мен механикалық жүктеменің ұзақ және тұрақты әсер етуі жағдайындағы әртүрлі БН-350 РҚ ПЖБЖ материалының сәулеленген үлгілерін сынау нәтижелері ұсынылған. Бір осьтік созылуға қысқа мерзімді сынақтар жүргізу жолымен температура мен тұрақты жүктемеден 12Х18Н10Т маркалы болаттан жасалған ПЖБЖ материалының үлгілерінің тұрақты беріктілік сипаттамаларының тәуелділігін анықтақталды. ПЖБЖ материалының үлгілерінің сипаттамасы сынаққа дейін және сынақтан кейін зерттелді.

Түйінді сөздер: БН-350 реакторы, жылу бөлгіш жинақ, карбидтер, карбонитридтер, тұтқыр бұзылу, квазистатикалық бұзылу.

STUDYING OF CHANGES IN PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF MATERIALS OF COMPLETED FA OF THE BN-350 REACTOR UNDER CONDITIONS OF LONGER THERMAL AGING

Ye.A. Kozhakhmetov, Ye.T. Koyanbaev, Ye.Ye. Sapataev, R.M. Mukhamedzhanova, A.Zh. Beldeubaev

Institute of Atomic Energy of NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

kozhahmetov_e@nnc.kz

The paper presents results of tests of irradiated samples of material from various SFAs of BN-350 RP under conditions of prolonged and constant exposure to temperature and mechanical load. The dependencies of strength characteristics of SFA material samples made of 12X18H10T steel on temperature and constant load were determined through short-term uniaxial tensile tests. The nature of the fracture of the SFA material samples was investigated before and after the tests.

Keywords: BN-350 reactor, fuel assembly, shell, carbides, carbonitrides, viscous fracture, quasistatic fracture.

УДК 621.039.531

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ РЕАКТОРНОЙ АМПУЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К

¹⁾ Чихрай Е.В., ^{1,2)} Аскербеков С.К., ²⁾ Шаймерденов А.А., ²⁾ Гизатулин Ш.Х., ²⁾ Аханов А.М., ²⁾ Кенжин Е.А., ³⁾ Кабулбек Е.Б.

¹⁾ НИИЭТФ КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан ²⁾ РГП ИЯФ МЭ РК, Алматы, Казахстан ³⁾ КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

В данной статье представлен один из этапов работ по реализации проекта создания установки для длительных испытаний материалов ТЯР на реакторе ВВР-К. В частности, приведены данные теплофизических расчетов облучательной ампулы из нержавеющей стали, содержащей различные материалы бридеров ТЯР: литиевую керамику и свинцово-литиевую эвтектику.

Для расчетов была использована 3-х мерная осесимметричная модель, по которой все элементы находятся на одной оси.

Для моделирования тепломассопереноса использовался мультифизический модуль *Nonisotermal Flow*, интегрирующий в себе субмодули *Heat Transfer in Fluids* и *Laminar Flow* для расчета теплопереноса в металле ампулы и в потоке воздуха, контактирующего с поверхностью ампулы, и для расчета распределения скоростей и давления в потоке, соответственно.

Была оценена динамика нагрева и распределение температурных полей по ампуле на основе чего сделаны выводы о параметрах облучательного эксперимента.

Введение

Использование трития в термоядерных установках, помимо вопросов радиоэкологической безопасности, ставит вопросы его наработки, которые планируется решать с помощью самого термоядерного реактора (ТЯР). Поэтому каждая проектируемая термоядерная энергетическая установка содержит в своей конструкции систему генерации трития, т.н. бридерный бланкет. Почти во всех разрабатываемых бридерных бланкетах в качестве тритий воспроизводящего материала используются материалы, содержащие литий. В результате ядерной реакции ⁶Li с нейтроном будет нарабатываться тритий, который после извлечения из системы генерации (бридерного бланкета) будет поступать в термоядерный реактор в качестве топлива [1–4].

Тематика материаловедческих исследований в области ядерных и термоядерных установок является традиционной для казахстанской науки [5, 6]: на установках Института атомной энергии (ИАЭ) и Института ядерной физики (ИЯФ) в частности, на реакторах ИВГ1.М и ВВР-К были исследованы множество конструкционных и функциональных материалов для будущих ЯР и ТЯР [7–12].

Создание на реакторе ВВР-К установки, которая позволит исследовать процессы газовыделения из материалов ЯР и ТЯР, расширит спектр экспериментальных возможностей реактора.

В настоящей работе представлен очередной этап работ по реализации проекта создания установки для испытаний материалов ТЯР на реакторе BBP-К методом вакуумной экстракции.

Модель

На рисунке 1 приведена расчетная геометрия облучательной ампулы с расположением загрузочной капсулы с образцами на дне. Капсула из нержавеющей стали марки 12X18H10T содержит различные материалы бридеров ТЯР: литиевую керамику (LiSiO₄+25%Li₂TiO₃) или свинцово-литиевую эвтектику (Pb83Li17).

В расчетах полагалось, что тепловыделение в керамике равно 82,3 Вт/см³, в свинцово-литиевой эвтектике – 16,8 Вт/см³, в стали – 4 Вт/см³.

Энерговыделение оценивалось на основе нейтронно-физических расчетов, выполненных с применением компьютерной программы *MCNP* (Monte Carlo N-particle).

В расчетах полагалось, что капсула охлаждается свободным конвекционным потоком воздуха в канале и теплоотдачей излучением, внутренняя часть капсул находится в вакууме. Расчеты проводились для нескольких значений степени черноты стали, температура внешней стенки канала была принята равной 300 К, поток воздуха в канале описывался как ламинарный. Отдельно был проведен расчет при предположении, что ампула находится в воде.

Для расчетов была использована 3-х мерная осесимметричная модель, по которой все элементы находятся на одной оси.

Для моделирования тепломассопереноса использован мультифизический модуль Nonisotermal Flow, интегрирующий в себе субмодули Heat Transfer in Fluids и Laminar Flow для расчета теплопереноса в потоке воздуха, контактирующего с поверхностью капсулы, и для расчета распределение скоростей и давления в потоке, соответственно.

Модуль *Heat Transfer in Fluids interface* моделирует процессы, описывающиеся уравнением:

$$\rho C_P \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_P \boldsymbol{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot \boldsymbol{q} = Q \tag{1}$$

где: ρ – плотность (кг/м³); C_{ρ} – удельная теплоемкость при постоянном давлении (Дж/(кг·К)); T – абсолютная температура (К); u – вектор скорости (м/с) (для твердотельных доменов u=0); q – вектор потока тепла теплопроводности и излучения (Вт/м²); Q – источник тепла (Вт/м³).



Рисунок 1. Расчетная геометрия облучательной ампулы с расположением образцов на дне ампулы

Модуль *Laminar Flow* моделирует ламинарный поток слабо сжимаемого воздуха, который описывается уравнением Стокса:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \boldsymbol{u}) = 0$$

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} + \rho(\boldsymbol{u} \cdot \nabla)\boldsymbol{u} = \nabla \cdot \left[-p\boldsymbol{I} + \mu(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{T}) + \frac{2}{3}\mu(\nabla \cdot \boldsymbol{u})\boldsymbol{I}\right] + \boldsymbol{F} + \rho \cdot \boldsymbol{g}$$

$$\rho \frac{\partial \boldsymbol{u}}{\partial t} - \nabla \cdot \mu(\nabla \boldsymbol{u} + (\nabla \boldsymbol{u})^{T}) + \rho \boldsymbol{u} \cdot \nabla \boldsymbol{u} + \nabla p = 0$$

$$\nabla \cdot \boldsymbol{u} = 0$$
(2)

где: p – давление (Па); F – вектор объемной силы (Н/м³); I – безразмерный тензор неоднородности динамической вязкости; g – вектор ускорения гравитации (м²/с); μ – динамическая вязкость (Па·с).

Одновременно рассчитывались температура, скорость течения и давление воздуха, охлаждающего ампулу. Рассчитана динамика изменения температуры дна капсулы, ее стенки в районе расположения исследуемого образца и в самом образце.

При расчетах керамика представлена как пористая среда, с объемной долей керамики 0,4, что соответствует расчетным литературным данным для засыпки шариками диаметром 0,5 мм.

Расчеты

На рисунке 2 приведены результаты расчета нагрева ампулы без образцов (отключено тепловыделение из керамики).



Рисунок 2. Результаты расчета температуры ампулы без образцов во время облучения

Как видно из рисунка, максимальная температура ампулы составляет не более 573 К (для сухого канала) и не более 373 К (для канала с водой) – что, в целом, определяет нижнюю температуру исследования в реакторных экспериментах с материалами ТЯР.

На рисунках 3 и 4 приведены результаты расчета нагрева ампулы с литиевой керамикой и свинцоволитиевой эвтектикой соответственно.



а) временная зависимость изменения температуры ампулы с керамикой, расположенной в сухом канале





Максимальная температура литиевой керамики в сухом канале оказалась равна ~1300 К и в водном канале ~773 К.

Максимальная температура свинцово-литиевой эвтектики в сухом канале ~723 К и в водном канале ~350 К.









е) поле скоростеи конвективного потока газа в ампул в квазиравновесном состоянии в канале с водой

Рисунок 3. Результаты расчета температурных полей по ампуле с керамикой во время облучения

ТЕПЛОФИЗИЧЕСКИЕ РАСЧЕТЫ РЕАКТОРНОЙ АМПУЛЫ ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ ГАЗОВЫДЕЛЕНИЯ ИЗ ЛИТИЙСОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ЭКСПЕРИМЕНТОВ НА РЕАКТОРЕ ВВР-К









б) временная зависимость изменения температуры ампулы с эвтектикой, расположенной в канале с водой



г) распребеление температуры по импуле в квазиравновесном состоянии в канале с водой



Рисунок 4. Результаты расчета температурных полей по ампуле с эвтектикой во время облучения



а) временная зависимость изменения температуры ампулы с керамикой, расположенной в сухом канале

1300

1200

1100

1000

900

800

700

600

500

400

300

0

Гемпература (К)

 б) распределение температуры по ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале

1.35×10³ ×10³

1.3

1.2

1.1

1

0.9

0.8

0.7

06

0.5

0.4

0.3



в) поле скоростей конвективного потока газа в ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале

Рисунок 5. Результаты расчета температурных полей по ампуле с керамикой (засыпка из шариков диаметром 0,5 мм) во время облучения

Достаточно высокая температура керамики (для всех расчетов) обусловлена большими значениями энерговыделения в ней и относительно низкой теплопроводности.

Был также проведен уточненный теплофизический расчет ампулы с керамикой в сухом канале, в котором керамика описывалась засыпкой из шариков диаметром 0,5 мм (см. рисунок 5), который показал, что максимальная температура керамики имеет почти те же значения, что и в расчете при представлении керамики в виде пористой среды.

Дополнительно был проведен расчет для ампулы с расположением керамики как показано на рисунке 6. Результаты расчета представлены на рисунке 7. Максимальная температура керамики составила около 1273 К.



Рисунок 6. Расчетная геометрия облучательной ампулы с расположением образцов по стенкам ампулы.



а) временная зависимость изменения температуры ампулы с керамикой, расположенной в сухом канале





в) поле скоростей конвективного потока газа в ампуле в квазиравновесном состоянии в сухом канале

Рисунок 7. Результаты расчета температурных полей по ампуле с керамикой во время облучения

Заключение

Таким образом, с помощью расчётной модели, были получены временные зависимости динамики нагрева и распределения температурных полей для облучательных ампул из нержавеющей стали, содержащих различные материалы бридеров ТЯР.

По полученным результатам были сделаны следующие выводы:

1. Для всех расчетов оказалось, что время наступления равновесного состояния составляет менее 1500 с.

2. Для сухого канала минимальная температура облучения для жидкометаллических бридерных систем будет меньше 723 К, что хорошо совпадает с задачами исследования поведения этих материалов в бридере ТЯР.

3. Как для сухого канала, так и для канала с водой, минимальная температура исследования литиевой керамики (для всех типов ампул) достаточно высока и требует дополнительных мер по ее снижению.

4. В качестве основных мер по снижению температуры исследования керамики следует рассмотреть следующие изменения в конструкции ампулы:

 а) Снижение энерговыделения в керамике за счет установки экрана по стенкам ампулы (экрана, ослабляющего поток тепловых нейтронов до значений скорости наработки трития в керамике, соответствующего ожидаемым скоростям наработки в бридерах ТЯР);

 б) Увеличение теплопроводности системы внутри ампулы за счет прокладки металлической сетки между пэбблами литиевой керамики.

Полученные результаты могут быть использованы при проектировании ампул для облучательных испытаний материалов бридеров ТЯР на различных исследовательских реакторах.

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования по научным, научно-техническим программам на 2018–2020 годы (номер программы – BR05236400) Министерства образования и науки Республики Казахстан.

Литература

- 1. Terai T., Nagai S., Takahashi Y., Yoneoka T. Mass transfer coefficient of tritium from molten lithium lead alloy (Li17Pb83) to environmentalgas under neutron irradiation // Fus. Eng. Des. 1991. Vol. 17. P. 237-241.
- 2. Alexander V. Fedorov, Lida Magielsen. Analysis of in-pile operation and modeling of tritium transport in lead-lithium irradiation experiments Libretto 4/1, 4/2 and 5 // Fusion Engineering and Design. 2011. Vol. 86. 2370–2373.
- 3. Suzuki, J. Yagi, M. Nagura, D. Komiyama, T. Terai. Tritium release from PbLi natural convection loop under neutron irradiation // Fusion Science and Technology, -2012, 62:1, -P. 295-299, DOI: 10.13182/FST12-A14150.
- Hollenberg G., Kurasawa T., The time Dependence of In-Situ Tritium Release from Lithium Oxide and Lithium Aluminate (VOM-22H Experiment) // J. Nucl. Mater. –1986.– Vol. 141–143, – P. 265 – 268.
- Tazhibayeva, I.L. Material Science Activities for Fusion Reactors in Kazakhstan / I.L. Tazhibaeva, T.V. Kulsartov, E.A. Kenzhin// Journal of the Nuclear Materials. – 2009. – Vol. 386-388. – pp. 15-18.
- Tazhibayeva et al. Study of properties of tungsten irradiated in hydrogen atmosphere / I. Tazhibayeva, M. Skakov, V. Baklanov, E. Koyanbaev, A. Miniyazov, T. Kulsartov, Y. Ponkratov, Y. Gordienko, and Z. Zaurbekova // Nuclear Fusion, Volume 57, Number 12. https://doi.org/10.1088/1741-4326/aa7911
- Sadvakassova, A.O. Research of Reactor Radiation Influence upon Processes of Hydrogen Isotopes Interaction with Materials of the Fusion Facility/ A.O. Sadvakassova, T.V. Kulsartov, I.L. Tazhibaeva, E.A. Kenzhin// Fusion Science and Technology. – 2011. – Vol. 60. – №1T. – pp. 9-15.
- Kulsartov, T.V. TRITIUM MIGRATION IN THE MATERIALS PROPOSED FOR FUSION REACTORS: Li2TiO3 AND BERYLLIUM / T.V. Kulsartov, Yu.N. Gordienko, I.L. Tazhibayeva, E.A. Kenzhin, N.I. Barsukov, A.O. Sadvakasova, A.V. Kulsartova and Zh.A. Zaurbekova // Journal of the Nuclear Materials.– 2013.– Vol. 442.– P. 740-745.
- Tazhibayeva, V. Baklanov, Yu. Ponkratov, Kh. Abdullin, T. Kulsartov, Yu. Gordienko, Zh. Zaurbekova, I. Lyublinski, A. Vertkov, M. Skakov. Development of technology for fabrication of lithium CPS on basis of carboxylic fabric coated with carbon nanotubes. – Fusion Engineering and Design, Volume 117, April 2017, Pages 168–174.
- Irina Tazhibayeva, Yuriy Ponkratov, Timur Kulsartov, Yuriy Gordienko, Mazhyn Skakov, Zhanna Zaurbekova, Igor Lyublinski, Alexey Vertkov, Giuseppe Mazzitelli. Results of reactor irradiation of liquid lithium saturated with deuterium. – Fusion Engineering and Design, Volume 117, April 2017, Pages 194-198.
- Tazhibayeva, I. Temperature Dependence of Rate Constant of Hydrogen Isotopes Interaction with Lithium Capillary-Porous System under Reactor Irradiation / I. Tazhibayeva, T. Kulsartov, Yu. Gordienko, A. Mukanova, Yu. Ponkratov, N. Barsukov, E. Tulubaev, E. Platacis, E. Kenzhin // Fusion Engineering and Design. – 2013. – Vol. 88, Issues 9–10. – P. 1731-1734.
- Interaction of tritium and helium with lead–lithium eutectic under reactor irradiation / I. Tazhibayeva, T. Kulsartov, N. Barsukov, Y. Gordienko, Y. Ponkratov, Z. Zaurbekova, E. Tulubayev, V. Gnyrya, V. Baklanov, E. Kenzhin // Fusion Engineering and Design. – 2014.– Vol. 89, Issues 7–8.– P. 1486-1490.

ВВР-К РЕАКТОРЫНДА ЭКСПЕРИМЕНТТЕР ЖҮРГІЗУ КЕЗІНДЕ ЛИТИЙ БАР МАТЕРИАЛДАРДАН ГАЗ ШЫҒАРЫНДЫЛАРЫН ЗЕРТТЕУ ҮШІН РЕАКТОР АМПУЛЫНЫҢ ТЕРМОФИЗИКАЛЫҚ ЕСЕПТЕУЛЕРІ

¹⁾ Е.В. Чихрай, ^{1,2)} С.К. Аскербеков, ²⁾ А.А. Шаймерденов, ²⁾ Ш.Х. Гизатуллин, ²⁾ А.М. Аханов, ²⁾ Е.А. Кенжин, ³⁾ Е.Б. Кабулбек

ЭТФ ҒЗИ Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан
 ²⁾ ЯФИ РМК, Алматы, Казахстан
 ³⁾ Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ, Алматы, Қазақстан

Бұл мақалада BBP-К реакторында ТЯР материалдарын ұзақ мерзімді сынақтан өткізу үшін объект құру бойынша жобаны іске асыру бойынша жұмыстың кезеңдерінің бірі берілген. Атап айтқанда, ТЯР бридерлерінің әртүрлі материалдары (литий керамикасы және қорғасын-литий эвтектикасы) бар, тот баспайтын болаттан жасалған сәулелендіру ампуласының термофизикалық есептемелері туралы деректер келтірілген.

Есептеулер үшін барлық элементтер бірдей осьте орналасқан 3 өлшемді осьсимметриялық модель пайдаланылды.

Жылу және масса тасымалын модельдеу үшін ампула металлындағы жылуды есептеу және ампула бетімен байланыстағы ауа ағынын есептеп, ағынның жылдамдығын және қысымын бөлуді есептеу үшін жылу алмасуды сұйық және ламинарлы ағындар субмодулдерінде біріктіретін *Nonisothermal Flow* модулін қолданды.

Ампуланың жылыту динамикасы және температура өрістерінің бөлінуі бағаланып, сәулелену экспериментінің параметрлері турасында қорытынды жасалды.

THERMOPHYSICAL CALCULATIONS OF REACTOR AMPOULE FOR STUDYING OF GAS RELEASE FROM LITHIUM-CONTAINING MATERIALS WHEN CONDUCTING EXPERIMENTS ON WWR-K REACTOR

 Ye.V. Chikhray, ^{1,2)} S.K. Askerbekov, ²⁾ A.A. Shaimerdenov, ²⁾ Sh.Kh. Gizatullin, ²⁾ A.M. Ahanov, ²⁾ Ye.A. Kenzhin, ³⁾ E.B. Kabulbek

¹⁾ IETP of al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan
 ²⁾ INP of Ministry of Energy of RK, Almaty, Kazakhstan
 ³⁾ Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

This article presents one of the stages to create a facility for long-term testing of fusion materials at the WWR-K reactor. Particularly, data are presented on thermophysical calculations of an irradiating ampoule made of stainless steel containing various materials of fusion breeders: lithium ceramics, lead-lithium eutectic.

The 3-dimensional axisymmetric model was used for calculations, according to which all elements are on the same axis. To simulate heat and mass transfer, we used the multiphysical module *Nonisothermal Flow*, which integrates the Heat Transfer in Fluids and Laminar Flow submodules for calculating the heat transfer in the ampoule metal and in the air flow in contact with the ampoule surface, and for calculating the velocity and pressure distribution in the flow, respectively. The dynamics of heating and the distribution of temperature fields in the ampoule were evaluated on the basis of which

conclusions were made about parameters of the irradiation experiment.

УДК 621.039.6, 533.9.08

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ ПО ПОЛУЧЕНИЮ ПЛАЗМЕННОГО РАЗРЯДА НА ТОКАМАКЕ КТМ

Чектыбаев Б.Ж., ¹⁾ Садыков А.Д., ²⁾ Батырбеков Э.Г.,
 ¹⁾ Скаков М.К., ¹⁾ Кашикбаев Е.А., ¹⁾ Жаксыбаева А.А.

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан ²⁾ РГП «Национальный ядерный центр Республики Казахстан», Курчатов, Казахстан

В статье описаны основные результаты экспериментальных работ по получению плазменного разряда на токамаке КТМ, проведенных в 2018 году. Приведены результаты расчетов сценария начальной предпробойной конфигурации магнитного поля в токамаке КТМ, полученные с помощью расчетного кода *Plasmaless Tokscen*, и результаты измерения параметров разряда по подобранному сценарию с помощью диагностического комплекса КТМ. В ходе экспериментов на токамаке КТМ использовался полный набор штатных источников питания электромагнитной системы КТМ. Однако, источники питания обмоток центрального соленоида и тороидального магнитного поля были задействованы только на половину их проектной мощности, в связи с незавершенностью пусконаладочных работ в полном объеме.

Введение

В рамках работ по развитию будущей термоядерной энергетики и в поддержку проекта ИТЭР в Республике Казахстан создается материаловедческий токамак КТМ [1]. Запуск подобных установок и выход их на номинальные проектные параметры требует проведения научно-исследовательской работы (НИР) по настройке сценария разряда и режимов работы отдельных подсистем, таких как система управления источниками питания, система управления плазмой и др. Проведение подобной НИР требует достаточно длительного времени (несколько лет) от момента получения первой плазмы, осуществления физического пуска, до момента выхода на номинальные параметры. Проект токамака КТМ предусматривает получение плазмы диверторной конфигурации с током 750 кА, средней плотностью электронов <ne>=5·10¹⁹ м⁻³, средней температурой электронов <Te>>=1 кэВ с длительностью разряда 5 секунд и использованием дополнительного высокочастотного нагрева плазмы.

Выход установки на номинальные параметры проводится в несколько этапов. Сначала проводятся работы по получению плазмы в омическом режиме с круглым сечением, далее по мере повышения параметров плазмы переходят от круглого сечения к плазме с вытянутым сечением и, затем, к плазме с диверторной конфигурацией. После достижения максимальных параметров плазменного шнура в омическом режиме переходят к использованию дополнительных методов нагрева плазмы.

На начальном этапе работы установки решается ряд проблем по реализации сценария плазменного разряда. К ним относятся: создание условий, необходимых для обеспечения пробоя, получение самого пробоя, роста тока и удержание плазменного шнура.

Также на данном этапе уточняются параметры электромагнитной системы установки, отрабатываются и настраиваются системы электропитания и управления для реализации задаваемых диаграмм токового сценария разряда.

В рамках НИР было проведено исследование процесса формирования плазменного шнура токамака КТМ и выполнены следующие работы:

 оптимизация токового сценария в полоидальных катушках для создания начальной предпробойной конфигурации магнитных полей в вакуумной камере КТМ;

 эксперименты по уточнению модели электромагнитной системы (ЭМС) токамака КТМ;

 настройка режимов работы источников питания (ИП) при их совместной работе;

 эксперименты по получению плазменного разряда и исследованию процесса формирования плазменного шнура круглого сечения.

Во время проведения экспериментов параметры плазменного шнура определялись с помощью магнитных и физических диагностик токамака КТМ.

При проведении НИР приобретен уникальный опыт экспериментальных работ на современной высокотехнологичной научно-исследовательской установке для получения высокотемпературной плазмы. Полученные данные и достигнутые параметры плазменного разряда позволят перейти к следующему этапу получения плазменного разряда на повышенных параметрах и, в дальнейшем, к экспериментам по достижению проектных значений плазменного разряда токамака КТМ.

В данной статье описаны результаты работ по оптимизации сценария в полоидальных катушках для создания начальной предпробойной конфигурации магнитных полей в вакуумной камере КТМ и по получению плазменного разряда и исследованию процесса формирования плазменного шнура, с учетом ограничений на мощность источников питания ЭМС КТМ в половину номинала.

Оптимизация токового сценария в полоидальных катушках для создания начальной предпробойной конфигурации магнитных полей в вакуумной камере КТМ

Под формированием плазменного шнура понимается получение лавинного пробоя, в результате чего и происходит образование плазмы в объеме вакуумной камеры. Для организации пробоя необходимо соблюсти несколько условий [2]: 1) создание области с минимумом магнитного полоидального поля в вакуумной камере, так называемого нуль поля, и поддержание его в течение заданного времени; 2) создание вихревого электрического поля (напряжения на обходе); 3) наличие продольного тороидального магнитного поля. Первые два условия взаимосвязаны, так значение напряжения на обходе, в основном, задается производной тока в центральном соленоиде (CS), который, в свою очередь, магнитно связан с полоидальными обмотками (PF). Таким образом, изменение тока в центральном соленоиде влияет на токи в полоидальных обмотках. С другой стороны, с помощью токов в полоидальных обмотках достигается компенсация вертикального рассеянного магнитного поля от CS и от токов, наведенных в проводящих элементах вакуумной камеры. Как видно, расчет токового сценария начальной предпробойной конфигурации является многопараметрической задачей.

Третьим условием является наличие тороидального магнитное поля, необходимого для удержания заряженных частиц. Значение тороидального магнитного поля влияет на длительность стадии пробоя. Следует отметить, что для разных газов условия достижения пробоя могут сильно отличаться. Так, например, на аргоне достичь пробоя намного легче, чем на водороде. В связи с этим на многих токамаках первые эксперименты начинают с использованием рабочего газа аргона, что позволяет отработать режимы и опробовать совместную работу всех систем необходимых для получения плазменного разряда.

На данном этапе работ был проведен расчет токового сценария разряда с формированием необходимых условий для организации пробоя на токамаке КТМ. Была проведена серия экспериментов, целью которых была разработка оптимального сценария с формированием нуля магнитного поля на внутреннем обводе вакуумной камеры КТМ с длительностью его удержания не менее 10 мс и максимально возможным напряжением на обходе для организации лавинного пробоя.

На рисунке 1 показаны диаграммы токов с наилучшим оптимизированным токовым сценарием в обмотках ЭМС КТМ, позволяющим получать и удерживать ноль полоидального магнитного поля на внутреннем обводе вакуумной камеры в течение 30 мс. Также на рисунке 1 показаны диаграммы напряжений необходимые для достижения необходимых токов в обмотках ЭМС КТМ. При этом достигалось максимальное значение напряжения на обходе с учетом имеющихся ограничений и возможностей источников питания на момент проведения экспериментов.



Рисунок 1. Задаваемые токи и напряжение в обмотках токамака КТМ при их совместной работе

Стартом разряда по получению плазмы считается время 0, указанное на рисунке 1, с последующим спадом (выводом) тока по заданной кривой. Перед разрядом осуществляется заведение токов в обмотки с заданной динамикой в течение 400 мс с последующим удержанием тока на заданном значении (полке) в течение 73 мс. Удержание тока на полке осуществляется с целью снижения наведенных токов на вакуумной камере до нуля. Это обеспечивает наилучшие условия для формирования последующей нулевой магнитной конфигурации на стадии разряда. Длительность диаграммы непосредственно на стадии ожидаемого пробоя и формирования плазмы составляет 50 мс.

На рисунке 2 приведена расчетная конфигурация магнитного поля внутри вакуумной камеры КТМ на стадии ожидаемого пробоя и формирования плазмы.



Рисунок 2. Расчетная магнитная конфигурация внутри вакуумной камеры токамака КТМ

Расчет проведен с использованием кода Plasmaless Tokscen [3]. Как видно из рисунка 2, имеется квазиустойчивая конфигурация нуль поля. Нуль поля формируется ближе к внутреннему обводу и постепенно смещается к центру ВК и далее уходит к внешнему обводу вниз. С точки зрения получения пробоя оптимальным вариантом было бы удержание конфигурации нуль поля в заданном месте, без смещения и изменения формы. Это создает наилучшие условия для пробоя рабочего газа. Однако, в силу конструктивных особенностей ВК и наличия массивных токопроводящих элементов, таких как диверторный стол, фланцы вакуумной камеры и других элементов, а также несимметричной конструкции, усложняется и без того сложный расчет подобного токового сценария, что требует длительного времени, а, возможно, и использования специального оптимизационного расчетного кода, например TRANSMAK [4].

На рисунке 3 показаны кривые напряжения на внутреннем цилиндре ВК КТМ, измеренные с помощью датчиков напряжения обхода DNO_1, DNO_2,

DNO_12, расположенных на разных отметках по оси Z: -0,085 м, -0,565 м, 0,695 м, соответственно.



Рисунок 3. Напряжение на внутреннем обходе токамака КТМ

Напряжение на обходе в момент времени планируемого пробоя составляет около 5 В.

Таким образом, по результатам проведенных расчетов и экспериментов были достигнуты условия для проведения экспериментов по получению и измерению параметров плазмы на токамаке КТМ.

Эксперименты по получению плазменного разряда

После проведенных расчетов и выбора оптимального токового сценария были проведены эксперименты по получению плазменного разряда. Для исследования плазменного разряда применены следующие диагностики: электромагнитные датчики, пироэлектрический болометр, AXUV-монитор, быстродействующая видеокамера с частотой регистрации 500 кадр/с, бессбойный монитор среднехордовой плотности (БМСП), перестраиваемый импульсный рефлектометр (ПИР).

Во время проведения экспериментов тороидальное магнитное поле достигало 0,5 Тл, что соответствует половине номинального значения поля при токе в тороидальной обмотке, равном 30 кА. В качестве рабочей среды использовался газ – аргон. Использование аргона было обусловлено невозможностью достижения пробоя при данных условиях на водороде. При проведении экспериментов был получен чисто омический пробой рабочего газа аргон без использования дополнительных методов предыонизации. При этом длительность разряда составила 40– 50 мс с током плазмы 5-6 кА. На рисунке 4 показана измеренная кривая тока плазмы.



Рисунок 4. Ток плазмы

На рисунке 5 приведены видеокадры формирования плазменного шнура.



Рисунок 5. Видеокадры формирования плазменного разряда



Рисунок 6. Данные с AXUV монитора





Рисунок 8. Данные с диагностики ПИР

Как видно из рисунка 5, плазменный шнур формируется на внутреннем обводе вакуумной камеры. На двенадцатой миллисекунде происходит ионизация рабочего газа под действием вихревого электрического поля (рисунок 5-а), после чего происходит быстрая объемная ионизация газа (лавинный пробой) с ростом тока плазмы. В первые 10 мс после пробоя наблюдается яркое свечение газа за счет его интенсивной ионизации с последующей рекомбинацией и рост тока плазмы, после чего, вследствие спада тока, наблюдается уменьшение свечения газа и постепенный уход плазменного шнура вниз и к внешнему обводу.

На рисунках 6–8 показаны сигналы с диагностик: AXUV монитор, бессбойный монитор среднехордовой плотности плазмы (БМСП) и перестраиваемый импульсный рефлектометр (ПИР), соответственно.

Данные с диагностики AXUV монитор хорошо коррелируются по времени с током плазмы. Данные с СВЧ диагностик (рисунки 7, 8) также свидетельствуют о наличии плазмы. Следует отметить, что диагностика ПИР работала в режиме рефрактометра из-за относительно небольшой плотности плазмы. Разница в длительности сигналов с диагностик ПИР и БМСП связана с их разной чувствительностью, вследствие работы на разных частотах 30 ГГц и 130 ГГц, соответственно. При этом, как показал анализ данных, максимальная электронная плотность плазмы не превышала 2·10¹⁹ м⁻³.

Диагностические данные на рисунках 4–8 хорошо коррелируются по времени и подтверждают наличие плазменного шнура.

Заключение

В 2018 году на токамаке КТМ была проведена оптимизация и настройка начальной предпробойной фазы сценария плазменного разряда. На основе полученных сценариев предпробойной фазы проведены эксперименты по получению плазменного разряда и измерение его параметров. По результатам экспериментов был получен плазменный разряд токамака КТМ с круглым сечением плазменного шнура в режиме омического нагрева. В качестве рабочего газа использовался аргон. Величина тока плазмы составила 6 кА с длительностью разряда около 40–50 мс. Пробой газа был получен без использования дополнительных способов предыонизации.

Полученные результаты работ будут использоваться для проведения дальнейших экспериментов по получению плазмы и повышению ее параметров.

Благодарность

Работа выполнена в рамках тем НТП КТМ: «Исследование процесса формирования плазменного шнура токамака КТМ в режиме омического нагрева», «Определение параметров плазмы с использованием физических диагностик и расчетных методов».

Авторы выражают благодарность за помощь в проведении работ персоналу токамака КТМ – технологическому отделу, отделу автоматизации экспериментов и отделу термоядерных исследований.

Литература

- I. L. Tazhibayeva, et al., "KTM Experimental Complex Project Status", Fusion Science and Technology, vol.47, April 2005, p. 746–750.
- 2 Беляков, В.А. ТОКАМАК: начальная стадия разряда / В.А. Беляков, А.А. Кавин, С.А. Лепихов, А.Б. Минеев, А.Д. Овсянников // СПб.: Издательство «Лань». 2014. 180 с.
- 3 Расчетный код моделирования динамики магнитных полей с учетом наведенных вихревых токов в установках типа токамак / А.Д. Садыков, М.К. Скаков, Г.В. Шаповалов, М.С. Садыкова // Вестник НЯЦ РК. 2015. № 3. С. 55–58.
- 4 M. Lobanova, L. P. Makarovaa, A. B. Mineeva, V. I. Vasilieva. Plasma initiation stage analysis in tokamaks with TRANSMAK code. Plasma Devices and Operations. Volume 11, Issue 3, 2003.

ҚТМ ТОКАМАҒЫНДАҒЫ ПЛАЗМАЛЫҚ РАЗРЯД АЛУ БОЙЫНША ЭКСПЕРИМЕНТТІК НӘТИЖЕЛЕРІ

¹⁾ Б.Ж. Чектыбаев, ¹⁾ А.Д. Садыков, ²⁾ Э.Г. Батырбеков, ¹⁾ М.К. Скаков, ¹⁾ Е.А. Кашикбаев, ¹⁾ А.А. Жаксыбаева

¹⁾ КР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан ²⁾ «Қазақстан Республикасының Ұлттық ядролық орталығы» РМК, Курчатов, Қазақстан

Мақалада 2018 жылы өткізілген ҚТМ токамағындағы плазмалық разрядты алу бойынша тәжірибелік жұмыстардың негізгі нәтижелері сипатталған. *Plasmaless Tokscen* есептік кодының көмегімен алынған ҚТМ токамактағы магнит өрісінің бастапқы сыналды конфигурациясының сценариін есептеу нәтижелері және ҚТМ диагностикалық кешенінің көмегімен таңдалған сценарий бойынша разряд параметрлерін өлшеу нәтижелері келтірілген. Эксперимент барысында ҚТМ токамағында электромагниттік жүйесінің штаттық тоқ көздерінің толық жиынтығы қолданылды. Алайда, индуктормен тороидалды магнит өрісінің орамаларын тоқ көзіне іске қосу барысында, жұмыстар толық көлемде расталмауына байланысты жобалық қуаттың жартысына ғана іске қосылды.

RESULTS OF PLASMA DISCHARGE OBTAINING EXPERIMENTS AT KTM TOKAMAK

B.Zh. Chektybayev, ¹⁾ A.D. Sadykov, ²⁾ E.G. Batyrbekov,
 ¹⁾ M.K. Skakov, ¹⁾ E.A. Kashikbayev, ¹⁾ A.A. Zhaksybayeva

¹⁾ Branch "Institute of Atomic Energy" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan ²⁾ RSE "National Nuclear Center of the Republic of Kazakhstan", Kurchatov, Kazakhstan

Main experimental work results of obtaining plasma discharge at KTM tokamak are outlined in the paper. Results of initial prebreakdown magnetic field configuration scenario calculations by *Plasmaless Tokscen* numerical code and results of measuring parameters of selected scenario by diagnostic set of KTM are shown. All KTM electromagnetic system power supplies have been used during experiments on KTM tokamak. However, power supplies of central solenoid and toroidal magnetic field coils have been used only on its half project power, because of incompleteness of commissioning works.

УДК 533.6.011.8

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОИЗОЛЯЦИОННЫХ СВОЙСТВ КОРПУСА ПРИЕМА РАСПЛАВА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ УСТАНОВКИ ЛАВА-Б

Бекмулдин М.К., Гановичев Д.А., Акаев А.С.

Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В статье приведены экспериментальные результаты, полученные в ходе проведения исследования теплоизоляционных свойств корпуса устройства приема расплава установки ЛАВА-Б. Определены значения тепловых потерь через стенку корпуса УПР. Выполнен расчет термического сопротивления корпуса УПР.

Введение

На экспериментальной установке ЛАВА-Б, созданной в ИАЭ НЯЦ РК, проводятся исследования процессов, сопровождающих тяжелую аварию легководного энергетического реактора. Установка позволяет плавить до 60 кг прототипной смеси материалов активной зоны LWR методом индукционной плавки в «горячем тигле» с последующим сливом расплава в экспериментальную секцию.

Экспериментальная установка (рисунок 1) включает в себя два основных функциональных блока: электроплавильную печь (ЭПП) для подготовки расплава прототипного кориума и устройство приема расплава (УПР), в котором размещается экспериментальная секция для моделирования исследуемых процессов [1].



ЭПП (электрическая плавильная печь);
 УПР (устройство приема расплава)

Рисунок 1. Установка ЛАВА-Б

В рамках работ было выполнено несколько исследовательских программ:

 Эксперименты по исследованию взаимодействия топлива с теплоносителем (серия FCI);

– Эксперименты по исследованию взаимодействия топлива с остаточной водой внутри корпуса реактора (серия LHI);

 Исследования взаимодействия расплава активной зоны с бетоном (MCCI);

 Экспериментальное изучение нестационарных процессов при удержании кориума в корпусе реактора при имитации остаточного тепловыделения (проект INVECOR);

 Экспериментальное исследование взаимодействия кориума и жаростойких материалов (проект CORMIT);

Экспериментальные исследования по получению модельного застывшего кориума, аналогичного кориуму, образовавшемуся в результате аварии на АЭС Фукусима-1 (проект Fukushima Debris).

Длительное использование теплоизоляционных материалов приводит к деградации теплоизолирующих свойств. В связи с этим возникла необходимость актуализации теплоизоляционных свойств корпуса устройства приема расплава установки ЛАВА-Б. Таким образом, цель данной работы заключалась в проведении экспериментальных и расчетных исследований, направленных на определение термического сопротивления стенки корпуса УПР.

Определение тепловых потерь через стенку корпуса УПР

Перед проведением методического эксперимента по определению тепловых потерь на корпусе УПР было установлено 7 групп (по 3 в каждой группе) хромель-копелевых термопар. Расположение термопар приведено на рисунке 2. Схема установки термопар одной группы на стенке корпуса УПР приведена на рисунке 3.

Принадлежность термопар, установленных на корпусе УПР (наружная и внутренняя поверхность УПР, тепловой экран) приведена в таблице 1.



 стенка корпуса УПР; 2 - теплоизоляция стенки УПР; 3 - тепловой экран; 4 - термопары, устанавливаемые на стенке УПР; 5 - термопары, устанавливаемые по вертикальной оси УПР

Рисунок 2. Схема размещения термопар в УПР

Таблица 1. Расположение термопар на корпусе УПР

Номер группы	Наружная поверхность УПР	Внутренняя поверхность УПР	Внутренняя поверхность теплового экрана
1	M.T.9	MDT.71	MDT.72
2	M.T.10	MDT.21	MDT.22
3	M.T.12	MDT.31	MDT.32
4	M.T.19	MDT.41	MDT.42
5	M.T.20	MDT.61	MDT.62
6	M.T.21	MDT.81	MDT.82
7	M.T.22	MDT.113	MDT.111



 стенка корпуса УПР; 2 - теплоизоляция стенки УПР; 3 - тепловой экран; 4 - термопары, устанавливаемые на стенке УПР

Рисунок 3. Схема установки термопар одной группы на стенке корпуса УПР

Перед началом эксперимента давление в полости УПР было снижено до 0,02 МПа. После вакуумирования в УПР был подан водяной пар (температура 130 °C; степень сухости 0,27; средний расход пара 57,8 г/с). Подача пара в УПР продолжалась в течение 52 минут. Максимальное значение давления в УПР в ходе проведенного эксперимента составило 0,22 МПа [2].

По полученным данным были построены графики изменения температуры стенки УПР и давления среды в УПР. На рисунке 4 приведен график изменения показаний одной из групп термопар и давления в УПР в ходе проведённого эксперимента.



Рисунок 4. Изменение температуры стенки УПР и давления среды в УПР от времени



Рисунок 5. Диаграммы изменения теплового потока (qi) через стенку корпуса УПР

На рисунке 5 приведены рассчитанные значения теплового потока через стенку УПР, определенные по формуле:

$$q = \frac{T_2 - T_1}{\frac{\delta_{\text{корп}}}{\lambda_{\text{корп}}} + \frac{\delta_{\text{теплоиз}}}{\lambda_{\text{теплоиз}}} + \frac{\delta_{\text{теп.экр}}}{\lambda_{\text{теп.экр}}}}$$

где T_2 – температура внутренней поверхности теплового экрана, К; T_1 – температура наружной поверхности корпуса УПР, К; $\delta_{корп}$ – толщина корпуса, $\delta_{корn}$ = 0,03 м; $\lambda_{корn}$ – теплопроводность корпуса, $\lambda_{корn}$ = 16 Вт/(м·К); $\delta_{теплоиз}$ – толщина теплоизоляции, $\delta_{теплоиз}$ = 0,02 м; $\lambda_{теплоиз}$ – теплопроводность теплоизоляции, $\lambda_{теплоиз}$ = 0,05 Вт/(м·К); $\delta_{теп.экр}$ – толщина теплового экрана, $\delta_{теп.экр}$ = 0,03 м; $\lambda_{теп.экр}$ = 16 Вт/(м·К).

На графике, показанном на рисунке 5, индексу теплового потока i ($i=1\div7$) соответствует номер группы термоэлектрических преобразователей (таблица 1). Максимальное значение усредненного теплового потока (q_{avr}), как видно из приведенного графика, составило 180 Вт/м², что соответствует новой теплоизоляции, теплопроводность которой составляет 0,05 Вт/(м·К) [3].

С целью определения фактических значений тепловых утечек через стенку УПР был выполнен расчет тепловых потерь по изменению энтальпии пара.

На рисунке 6 точка 1 (время 14:43:30) соответствует моменту прекращения подачи пара. Точка 2 (время 14:48:00) соответствует моменту возобновления подачи пара. Значения давления в заданное время: точка 1 – давление 2,24 атм, точка 2 – давление 1,64 атм. Снижение давления среды в УПР после прекращения подачи пара обусловлено теплопередачей запасенного в паре тепла корпусу УПР и утечками тепла от корпуса УПР в окружающую среду. Зная давление пара, определяется его плотность [4] и масса:

$$m_i = \rho_i \times V$$
,

где m_i – масса пара в УПР в *i*-ый момент времени (рисунок 6), кг; V – объем устройства приема расплава, $V = 5,664 \text{ m}^3$.

Зная массу пара и удельное теплосодержание, определяется количество тепла, запасенное паром после прекращения подачи пара (точка 1) и непосредственно перед повторной подачей пара (точка 2):

$$Q_i = i_i \times m_i,$$

где *i_i* – энтальпия пара в *i*-ый момент времени, Дж/кг. В таблице 2 приведены теплофизические параме-

тры пара [4] в указанные моменты времени.

Таблица 2. Теплофизические параметры среды в УПР

Точка	Время	Абсолютное давление, атм.	Плотность пара, кг/м³	Энтальпия пара (полная энергия), кДж/кг	Macca пара¹, кг	Количество тепла пара, кДж
1	14:43:30	2,24	1,256	2711,57	7,09	19226,69
2	14:48:00	1,64	0,937	2697,22	5,28	14267,12

1) объем внутренней полости УПР составляет 5,664 м³.



Рисунок 6. Временная зависимость давления пара в УПР и средней температуры внешней поверхности УПР

Таким образом, после прекращения подачи пара количество тепла, запасенное в паре, изменяется на 4959,57 кДж:

 $Q_s = Q_1 - Q_2 = 19226,69 - 14267,12 = 4959,57$ кДж.

Теряемое паром тепло Q_s затрачивается на прогрев корпуса УПР, при этом корпус УПР передает часть тепла в окружающую среду:

$$Q_s = Q + Q_{mr}$$
 ,

где Q – утечки тепла в окружающую среду, Дж; Q_{mr} – тепло, затрачиваемое на нагрев корпуса УПР, Дж.

Из рисунка 6 видно, что при снижении давления пара температура стенки УПР увеличивается на 1 °С.

Количество тепла, необходимого для прогрева корпуса УПР на 1 °C, равно $Q_{mr} = 3003$ кДж (масса УПР 6500 кг, теплоемкость материала корпуса УПР равна 462 Дж/(кг×°C)).

Следовательно, количество тепла, передаваемого в окружающую среду, составит

$$Q = Q_s - Q_{mr} = 1956,6$$
 кДж.

Таким образом, мощность утечки тепла равна

$$N = \frac{Q}{\tau} = \frac{1956575}{270} = 7246 \text{ Br}$$

Учитывая, что площадь внешней поверхности корпуса УПР составляет 15 м², плотность теплового потока от внешней поверхности корпуса УПР в окружающую среду равна q = 483 Вт/м², что превышает среднее значение тепловых потерь, полученных экспериментальным путем и рассчитанных при теплопроводности теплоизоляции $\lambda = 0,05$ Вт/м×°С, $q_{avr} = 180$ Вт/м² [5].

Термическое сопротивление стенки УПР в точке 1 равно:

$$R_1 = \frac{T_{in1} - T_{out1}}{q} = \frac{115, 2 - 44, 9}{483} = 0,1455 \text{ (m}^2 \times ^\circ \text{C)/BT},$$

где T_{in} – температура внутренней поверхности корпуса УПР (рисунок 7), °С; T_{out} – температура внешней поверхности корпуса УПР (рисунок 6), °С.

Термическое сопротивление стенки УПР в точке 2 равно:

$$R_2 = \frac{T_{in2} - T_{out2}}{q} = \frac{102,6-45,9}{483} = 0,1174 \text{ (m}^2 \times ^\circ \text{C)/BT}.$$

Среднее значение термического сопротивления стенки УПР составляет $0,1315 (M^{2\times \circ}C)/BT$.

Учитывая расчетное значение термического сопротивления стенки корпуса УПР определено, что теплопроводность теплоизоляции составляет $\lambda = 0,15 \text{ Br/(M}\times^{\circ}\text{C}).$



Рисунок 7. Временная зависимость давления пара в УПР и средней температуры оболочки УПР

Выводы

В результате выполненной работы определено:

– плотность теплового потока через стенку корпуса УПР, рассчитанная при теплопроводности теплоизоляции $\lambda = 0.05 \text{ Br/(M} \times ^{\circ}\text{C})$, составила $q_{avr} = 180 \text{ Br/m}^2$;

– плотность теплового потока через стенку корпуса УПР, рассчитанная по изменению энтальпии пара, составила q = 483 Вт/м²; среднее значение термического сопротивления стенки корпуса УПР составляет 0,1315 (м²×°С)/Вт;

– расчетное значение теплопроводности теплоизоляции корпуса УПР составило $\lambda = 0.15$ Вт/(м×°С).

Полученные результаты могут быть использованы для определения тепловых потерь через корпус устройства приема расплава при проведении экспериментальных работ на установке ЛАВА-Б.

ЛИТЕРАТУРА

- Скаков М.К., Васильев Ю.С., Дерявко И.И. и др., Институт атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан – 60 лет. – под общ. ред. Э.Г. Батырбекова и М.К. Скакова. – Кокшетау: КФ «Кокшетау», 2018, стр. 139–141.
- 2. Протокол эксперимента VT-02 на установке ЛАВА-Б, № 13-240-02/15 вн., 04.01.2019.
- 3. И. А. Гусарова, Высокотемпературный теплоизоляционный материал на основе керамических волокон. Космическая наука и технология, Т. 23, № 2, 2017, стр. 27.
- 4. Михеев М.А., Михеева И.М. Основы теплопередачи. М., Энергия, 1977, 336 с. 5. Б.В. Щетанов, Ю.А. Ивахненко, В.Г. Бабашов, Теплозащитные материалы. Всероссийский институт авиационных материалов, август 2009.

ЛАВА-Б ЭКСПЕРИМЕНТТІК ҚОНДЫРҒЫСЫНЫҢ БАЛҚЫМАСЫН ҚАБЫЛДАУ КОРПУСЫНЫҢ ЖЫЛУ ӨТКІЗБЕЙТІН ҚАСИЕТТЕРІН ЗЕРТТЕУ

М.К. Бекмулдин, Д.А. Гановичев, А.С. Акаев

Қазақстан, Курчатов, ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы

Мақалада ЛАВА-Б қондырғысының балқыманы қабылдау құрылғысы корпусының жылуды оқшаулау қасиеттеріне зерттеу жүргізу барысында алынған эксперименттік нәтижелер келтірілді. БСҚ корпусының қабырғасы арқылы жылу шығындарының мағыналары анықталды. БСҚ корпусының термиялық кедергісінің есебі орындалды.

INVESTIGATION OF THERMAL-INSULATING PROPERTIES OF A MELT RECEIVER'S CASING OF THE LAVA-B EXPERIMENTAL FACILITY

M.K. Bekmuldin, D.A. Ganovichev, A.S. Akayev

Institute of Atomic Energy Branch RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

The paper provides experimental results obtained during studying of heat resistant properties of casing of melt receiver of the LAVA-B facility. Values of heat losses through the wall of MR casing were determined. A heat resistance of MR casing has been calculated.
УДК 621.039.531

ИЗМЕНЕНИЕ ФАЗОВОГО СОСТАВА И ПРОЧНОСТНЫХ СВОЙСТВ АУСТЕНИТНОЙ СТАЛИ 12Х18Н10Т В РЕЗУЛЬТАТЕ ДЕФОРМАЦИИ И ПОСТДЕФОРМАЦИОННЫХ ОТЖИГОВ

^{1,2)} Цай К.В.,^{1,3)} Рофман О.В.,^{1,2)} Отставнов М.А.

¹⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
³⁾ НИТУ «МИСИС», Москва, Россия

Обсуждаются результаты экспериментов по изучению изменений фазового состава и механических свойств аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T, необлученной и облученной нейтронами, подвергнутой низкотемпературной деформации и постдеформационному отжигу в интервале температур 300–800 °C. Исследованы особенности образования и накопления мартенситной α'-фазы при деформации и отжиге. Рассмотрена зависимость величины микротвердости стали от содержания α'-фазы.

Введение

Под действием внешних нагрузок в метастабильных аустенитных сталях в процессе формирования деформационной микроструктуры образуется новая α'-фаза (мартенсит деформации) более прочная по сравнению с ү-аустенитной матрицей, обладающая остаточным магнетизмом. Количество α'-фазы зависит от многих условий, наиболее значимые из которых - элементный состав стали, температура деформации, вид деформации (растяжение, сжатие), облучение высокоэнергетическими частицами [1-3]. Плотность мартенсита в легированных сталях (~7,6-7,7 г/см³) меньше, чем плотность аустенита (7,9 г/см³, 12Х18Н10Т). В связи с увеличением объема стали при мартенситном превращении в ней возникают внутренние напряжения вблизи мартенситных включений. Мартенситная α'-фаза метастабильна, ее содержание можно легко контролировать термообработкой. Отжиг (~1/2-1 час) при повышенных (800 °C) температурах инициирует обратный $\alpha' \rightarrow \gamma$ фазовый переход в материале вплоть до полного исчезновения α'-фазы. При этом структура и механические свойства термически восстановленного аустенита отличается от первоначальных. Оба вышеуказанных процесса могут влиять на эксплуатационные характеристики стальных конструкций. Это обусловливает актуальность изучения закономерностей процессов образования и отжига мартенситной α'-фазы в аустенитных сталях.

Цель настоящей работы: Изучить влияние пластической деформации при низких температурах на фазово-структурное состояние образцов стали 12X18H10T, необлученных и облученных нейтронами в реакторе BBP-К, а также выявить коррелированные изменения прочностных и магнитных свойств деформированной стали в ходе термической обработки. Для этого в стальных образцах растяжением при низких температурах индуцировали значительное количество мартенсита деформации. Затем провели отжиг образцов в широком интервале температур, что дало возможность детально изучить поведение стали при термическом воздействии.

Материал и методы исследований

Материалом исследования в работе являлась хромоникелевая аустенитная нержавеющая сталь 12X18H10T с химическим составом: Fe – основа; Ni - 10.66; Cr - 17.00; C - 0.12; Mn - 1.67; P - 0.032; S < 0,013; Si - 0,34. Для экспериментов изготавливали плоские образцы в форме двойной лопатки с размерами рабочей части 3 мм × 10 мм и толщиной 300 мкм. Для устранения возможных ферритных и карбидных включений проводилась предварительная аустенизация образцов при 1050 °С (30 мин) с закалкой в воду. Часть термообработанных образцов облучали нейтронами в активной зоне исследовательского реактора ВВР-К при температуре ~80 °С до флюенса 1,3×10²⁰ н/см². Перед механическими испытаниями на поверхность каждого образца специальным маркером было нанесено 9-11 полосок-меток для экстензометрических измерений.

Необлученные и облученные стальные образцы деформировали пошаговым одноосным растяжением на установке Инстрон-1195 со скоростью 0,5 мм/мин при $T_{\mu cn} = 20 \ ^{\circ}C$ и $-100 \ ^{\circ}C$ [4]. В ходе деформирования периодически образец разгружали для измерений его линейных размеров - ширины и толщины, чтобы определить площадь поперечного сечения. Это позволило получить, помимо инженерных диаграмм растяжения « $\sigma - \epsilon$ », диаграммы « $\sigma_i - \epsilon_i$ » в «истинных» координатах. Содержание ферромагнитной α'-фазы М_f (в фер. %) и ее распределение по образцу определяли с помощью феррозонда Ферстера MP-30 в разных точках образца, в том числе на участке вблизи развивающейся «шейки», где M_f достигало максимальных значений. Микротвердость H_u и ее распределение по образцу измеряли после деформации с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузке на индентор 50 г.

Изохронные отжиги деформированных образцов осуществляли в трубчатой печи, в вакууме 10⁻³ торр,

в интервале температур 300–500 °С с шагом 25 °С, а также в интервале 500–800 °С с шагом 50 и 100 °С. Длительность каждого отжига составляла 30 минут. Измерение M_f и H_{μ} по длине образцов проводилось после каждого отжига. С помощью просвечивающей электронной микроскопии (микроскоп JEM-2100, U = 200 кВ) характеризовали изменения в микроструктуре в результате деформации и постдеформационного отжига. С этой целью из образцов выбивали диски диаметром 3 мм, которые подвергали шлифовке, полировке и струйной электрополировке при комнатной температуре в электролите следующего состава: 20 % HClO₄ + 80 % C₂H₅OH.

Полученные результаты и их обсуждение

Результаты механических испытаний и магнитометрических измерений

На рисунках 1 и 2 представлены полученные диаграммы растяжения и кривые накопления мартенситной фазы $M_f(\varepsilon)$ для образцов стали 12X18H10T, необлученных и облученных нейтронами до $1,3 \times 10^{20}$ н/см². Из диаграмм определены характеристики прочности, пластичности, критические параметры начала образования α' -фазы, а также максимальное количество мартенсита в стальных образцах на момент их разрушения (см. таблицу).

В случае растяжения при 20 °С (рисунок 1-а) облучение нейтронами вызывает упрочнение материала (рост $\sigma_{0.2}$), уменьшение пластичности и запускает локализационные процессы в объеме материала при более низких ε по сравнению с необлученной сталью. С понижением температуры испытаний до -100 °С (рисунок 1-б) в значительной степени возрастают прочностные характеристики деформируемой стали, практически без потери пластичности. Наиболее сильно нейтронное облучение влияет на предел текучести, который повышается почти в 3 раза по сравнению с σ_{02} исходного материала.



Рисунок 2. Кривые накопления α'-фазы в образцах стали 12X18H10T при растяжении



Инженерные и «истинные» диаграммы растяжения для необлученной стали при $T_{\text{исп}} = 20 \text{ °C}$ (кривые 1, 1') и –100 °C (кривые 3, 3') и для стали, облученной нейтронами до 1,3×10²⁰ н/см² при $T_{\text{исп}} = 20 \text{ °C}$ (2, 2') и –100 °C (4, 4').

Рисунок 1. Диаграммы растяжения образцов стали 12X18H10T

Понижение температуры испытаний до -100 °C приводит к уменьшению $\varepsilon^{\rm kp}$ – критической деформации начала образования α' -фазы, на порядок. При этом критические напряжения лишь ненамного превышают σ_{02} для всех рассмотренных образцов, т.е. условия для образования мартенсита в стали достигаются практически без дополнительного деформационного упрочнения.

Характеристики	Необл.	1,3×10 ²⁰ н/см ²	Необл.	1,3×10 ²⁰ н/см ²
T _{ucn} , °C	20	20	-100	-100
Полная деформация б, отн.ед.	0,6	0,46	0,54	0,55
Равномерная деформация, є _р , отн.ед.	0,6	0,4	0,48	0,5
Предел текучести о _{0.2} , МПа	240	530	300	870
Условный предел прочности ов, МПа	770	680	1090	1080
Напряжение разрушения, о _к , МПа	770	673	950	990
Истинный предел прочности σ_{Bi} , МПа	1005	960	1340	1610
Истинное напряжение разрушения, σ_{Ri} МПа	1005	985	*	1650
Критическая деформация образования α' -фазы $\epsilon^{\mbox{\tiny KP}} \epsilon^{\mbox{\tiny KP}}_{Mf}$	0,17	0,08	0,02	0,01
Условное критическое напряжение $\sigma^{\mbox{\tiny KP}}$, МПа	560	610	440	890
Истинное критическое напряжение $\sigma_{i}^{\text{кр}}$, МПа	615	692	450	900
Максимальное количество α'-фазы, фер. %	3,1	4,9	13,4	10,8
Н _μ до деформации, кг/мм²	160**	230**		
Макс.микротвердость после деформации, кг/мм ²	308	-	360	369
<Н _µ > по образцу после деформации, кг/мм ²	303	-	346	348

Габлица.	Механические и магнитные характеристики	образцов	стали	12X18H10T,
	деформированных при низких темп	ературах		

* – Отсутствие данных по ок означает, что разрушения образца нет на участке, для которого была построена диаграмма растяжения в истинных координатах.

** – Микротвердость измерена до деформации при 20 °С.



а – необлученная сталь, ε = 0,3, двойникованный α'-мартенсит; б, в – сталь, облученная до 1,3×10²⁰н/см², ε = 0,35, темные кристаллиты – α'-мартенсит.

Рисунок 3. Мартенсит деформации в образцах стали 12X18H10T при Tucn = -100 °C

В исходной стали при -100 °С критическое напряжение начала мартенситного превращения понижается по сравнению с испытаниями при 20 °С, тогда как в облученных образцах, напротив, возрастает. В результате интенсивность выделения мартенсита в облученной стали существенно ниже по сравнению с необлученной. Данный вывод хорошо согласуется с результатами работ [5, 6].

Как следует из рисунка 2, при понижении $T_{\text{исп}}$ интенсивность мартенситных $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращений возрастает. Нейтронное облучение также существенно влияет на вид кривых $M_f(\varepsilon)$. Если при 20 °C в облученной стали мартенсит деформации выделяется интенсивнее, чем в необлученной, то при –100 °C ситуация изменяется и наибольшее количество α' -фазы образуется в необлученной образце, по сравнению с облученным. Последнее свидетельствует о затруднении процесса фазового превращения в облученной стали при отрицательной температуре испытаний.

Морфология мартенсита в стали 12X18H10T после деформации при -100 °C представлена на рисунке 3. В необлученной стали α' -фаза имеет вид протяженных пластин двойников толщиной до 0,2 мкм (рисунок 3-а). В облученной стали, мартенсит выделяется в аустенитном зерне в виде мелких линзовидных образований толщиной ~20–40 нм высокой плотности (рисунок 3-б), которые «собираются» в протяженные ламели (рисунок 3-в). Росту мартенситной фракции, по-видимому, препятствует повышенный уровень внутренних напряжений в аустените, обусловленный как первичным радиационным упрочнением, так и деформационной микроструктурой, формируемой в облученной стали при растяжении. Несмотря на то, что в облученной стали мартенсита образуется в 1,5 раза меньше, чем в исходной, их прочностные характеристики (σ_B, H_µ) сравнимы.

Результаты отжигов деформированных стальных образцов

Диаграммы изменения содержания α' -фазы M_f и микротвердости H_{μ} в деформированных образцах в зависимости от температуры отжига ($T_{\text{отж}}$) приведены на рисунке 4. Кривые $M_{f\,i}$ ($T_{\text{отж}}$) и $H_{\mu\,i}$ ($T_{\text{отж}}$) (где i = 1...9/11) показывают эволюцию содержания мартенсита и упрочнение (разупрочнение) стали в разных точках на образцах с температурой отжига.



а, б – исходная сталь, T_{исп} = -100 °C; в, г – сталь, облученная до 1,3×10²⁰ н/см², T_{исп} = -100 °C; д, е – исходная сталь, T_{исп} = 20 °C; а, в, д – содержание α'-фазы в деформированных образцах после отжигов; б, г, е – микротвердость этих образцов.

Рисунок 4. Изменение фазового состава и микротвердости деформированной стали 12X18H10T с ростом температуры изохронных отжигов

Отжиг «снимает» часть внутренних напряжений в микроструктуре, тормозящих $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение, вследствие чего возможен дальнейший рост мартенситных кристаллов. На всех отметках по длине образцов после отжигов при 350-500 °С имел место прирост количества α'-фазы (~5-10 %), по сравнению с исходным до отжига. Максимальные значения M_f отмечены после отжигов при 450-475 °С. Эффект постдеформационного отжигового упрочнения (прирост H_u) фиксировался после отжигов в интервале температур 300-600 °С. Максимальный прирост Н_и (460-505 кг/мм²) для образцов, деформированных при -100 °C, наблюдался при 475 °C. При этом микротвердость возрастала в ~1,4 раза по сравнению с деформированными образцами до отжига. Несмотря на количественные различия в содержании α'-фазы в облученном и необлученном образцах на 30-40 %, их микротвердости близки по величине и имеют похожие зависимости Н_µ(Тотж).

Микроструктура мартенситного включения в стали после отжига при 450 °С приведена на рисунке 5. Видна тонкая структура аустенита, в котором продолжается формирование мартенситных включений. На электронограмме присутствуют рефлексы и тяжи, принадлежащие ГПУ ε -фазы, на снимке микроструктуры видны тонкие полосы дефектов упаковки, на пересечении которых формируются новые мелкие выделения α' -фазы. Заметим, что в массивном мартенсите, сформированном в стали после деформации, такой фазы не наблюдалось.

Отжиговое упрочнение в деформированных образцах исчезает после термообработки при 700 °С, но при этом микротвердость материала все еще намного превышает H_{μ} стали до деформации (см. таблицу). При 650 °С доля α' -фазы в образцах уменьшается более чем в 9 раз, поэтому можно говорить о переходе большей части мартенсита в аустенит в ходе обратного $\alpha' \rightarrow \gamma$ превращения, как и в работах [6–8]. Остаточное упрочнение стали 12Х18Н10Т может быть связано с внутренней структурой новых мелких аустенитных зерен.



Рисунок 5. Мартенсит деформации в стали 12X18H10T, после растяжения при –100 °C и отжига при 450 °C (30 мин)



Рисунок 6. Микротвердость стали 12X18H10T в зависимости от содержания мартенситной α'-фазы в деформированных образцах после термического воздействия

На рисунке 6 приведены зависимости Н_µ от количества упрочняющей α'-фазы в стальных образцах, необлученном и облученном нейтронами, на отметках с максимальными значениями M_f и H_µ. Левая часть диаграммы построена на интервале M_f = 2-15 фер. %. Здесь значения Н_f увеличиваются с ростом содержания фазы M_f, т.е. имеет место отжиговое упрочнение. При этом участки образца, расположенные вблизи «шейки», демонстрируют близкую к линейной зависимость H_{μ} от $M_{f}.$ Для образцов с $T_{\text{исп}} = -100 \text{ °C}$ тангенс угла наклона $H_{\mu}(M_f)$ больше в случае облученной стали, по сравнению с необлученной. Таким образом, в силу особенностей микроструктуры, облученная деформированная сталь упрочняется интенсивнее при меньшем приросте фазы по сравнению с исходной сталью. То же самое наблюдается и для исходной стали, деформированной при 20 °С. Кроме того, наличие на графиках эффекта приращения Н_µ без изменения М_f свидетельствует о том, что упрочнение стали при отжиге может быть обусловлено также и другими структурными механизмами – двойникованием, формированием дислокационных стенок и ячеек, фрагментацией и разориентацией субструктурных элементов. В микроструктурах, где образование α'-фазы затруднено, такие механизмы упрочнения могут вносить равнозначный вклад с мартенситным упрочнением.

В правой части диаграммы (рисунок 6) по оси абсцисс отложены значения M_f в порядке убывания, от 15 фер. % до 0. Значения Н_µ уменьшаются одновременно с убыванием M_f в ходе обратного $\alpha' \rightarrow \gamma$ мартенситного превращения. Здесь стоит отметить разную интенсивность разупрочнения стали на интервале отжигов 500-550 °C для облученного и необлученного образцов (T_{исп} = -100 °C). Интенсивность снятия упрочнения, $M = \Delta H_{\mu} / (\Delta M_f \Delta T)$, для необлученной стали составляет 5,1 кг/мм²/(фер. % °С), тогда как для облученной – выше, $И = 8,3 \text{ кг/мм}^2/(\text{фер. }\% \text{ °C}).$ Анализ показал, что максимум отжигового разупрочнения стали лежит в интервале температур 600-650 °С. При температурах 650-800 °С разупрочнение стали происходит не только из-за сокращения количества остаточной α'-фазы в объеме образцов, но, главным образом, за счет рекристаллизационных процессов и формирования новой, более совершенной зеренной структуры.

Заключение

В результате проведения экспериментов по одноосному растяжению образцов необлученной и облученной нейтронами нержавеющей стали 12X18H10T при низких температурах и последующим изохронным отжигам деформированных образцов установлено следующее:

 Понижение температуры деформации до -100 °C приводит к росту прочностных характеристик стали практически без потери пластичности. При этом наиболее значимый вклад в деформационное упрочнение вносит образование и рост α'-мартенситной фазы.

– Критические напряжения начала $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения при –100 °С ненамного превышают предел текучести стали. При этом интенсивность выделения мартенсита в облученной стали существенно ниже, чем в необлученной. При 20 °С, напротив, облученная сталь более склонна к $\gamma \rightarrow \alpha'$ переходу под внешней нагрузкой.

– В образцах с высоким содержанием α' -фазы, после деформации при –100 °С и отжига, наблюдалось значительное отжиговое упрочнение при относительно слабом приросте содержания α' - фазы. Температурный интервал эффекта отжигового упрочнения для стали 12X18H10T составляет 300–600 °С, а его интенсивность практически не зависит от предварительного облучения. Прирост α' -фазы наблюдался при температурах отжига 300–500 °С. Максимум отжигового упрочнения соответствовал максимальному содержанию α' -фазы в образцах после отжига при 475 °С.

– Повышенные температуры отжига (650– 800 °C) инициировали процессы обратного $\alpha' \rightarrow \gamma$ превращения, сопровождающиеся резким уменьшением содержания α' -фазы и прочностных свойств стали. Максимальная скорость отжигового разупрочнения стали, независимо от предыстории, отвечает интервалу температур 600–650 °C. Интенсивность разупрочнения выше в облученной стали, по сравнению с необлученной.

Полученные результаты углубляют понимание природы физических процессов в облученных нейтронами аустенитных сталях в условиях низкотемпературной деформации и последующего термического воздействия. Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории радиационного материаловедения РГП ИЯФ Рубану С.В. и Щербининой Н.В. за помощь в проведении радиационных экспериментов. Работа выполнена при финансовой поддержке гранта №АР05130527 Программы грантового финансирования МОН РК.

Литература

- 1. Максимкин, О.П. Прямые и обратные мартенситные превращения в реакторных сталях, облученных нейтронами и заряженными частицами / О.П. Максимкин // Вестник НЯЦ. 2015. вып. 3. С. 113–123.
- Максимкин, О.П. Влияние реакторного облучения на закономерности мартенситного γ→α' превращения в стали 12X18H10T при деформации / О.П. Максимкин, Д.Т. Бердалиев // Вестник НЯЦ. – 2009. – вып. 3. – С.167–172.
- Цай, К.В. Влияние облучения и деформации на фазовые превращения в реакторных хромоникелевых сталях / К.В. Цай, О.В. Рофман, С.В. Рубан, О.П. Максимкин, Ф.А. Гарнер // Вестник НЯЦ. – 2016. – вып. 1. – С. 66–72.

- Рыбин, С.В. Создание испытательных низко– и высокотемпературной камер и их применение для изучения деформационно-пластического поведения облученных материалов / С.В. Рыбин, О.П. Максимкин, М.Н. Гусев // Вестник НЯЦ РК. – вып. 2. – 2010. – С. 75–80.
- 5. Максимкин, О.П. Влияние нейтронного облучения и отрицательных температур растяжения на механические и магнитные характеристики аустенитной реакторной стали X18H9, аустенизированной при температурах 900 °C и 1050 °C / О.П. Максимкин, С.В. Рубан // Вестник НЯЦ РК. 2017. вып. 1. С. 5–8.
- Максимкин, О.П. Изменения электросопротивления и намагниченности необлученной и облученной нейтронами стали X18H9 в процессах деформации и отжигов / О.П. Максимкин, Е.Е. Нұрғали // Вестник НЯЦ. – 2018. – вып. 1. – С. 61–68.
- Рахашев, Б.К. Исследование обратного мартенситного α'→γ превращения в облученных высокоэнергетическими частицами, деформированных нержавеющих сталях 12Х18Н10Т и 08Х16Н11М3 / Б.К. Рахашев // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. – г. Алматы. – 2010.
- Максимкин, О.П. Некоторые особенности обратного мартенситного α'→γ превращения в стали 12Х18Н10Т, облученной до высоких повреждающих доз в быстром реакторе БН-350/ О.П. Максимкин, М.С. Мережко, С.В. Рубан // Вестник НЯЦ РК. 2011. вып. 2. С. 109–114.

ДЕФОРМАЦИЯ ЖӘНЕ ДЕФОРМАЦИЯДАН КЕЙІНГІ КҮЙДІРУЛЕР НӘТИЖЕСІНДЕ 12Х18Н10Т АУСТЕНИТТІК БОЛАТТЫҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫ МЕН БЕРІКТІК ҚАСИЕТТЕРІНІҢ ӨЗГЕРІСТЕРІ

^{1,2)} К.В. Цай,^{1,3)} О.В. Рофман,^{1,2)} М.А. Отставнов

Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан
«МБжҚИ» ҰЗТУ, Мәскеу, Ресей

Сәулелендірілмеген және нейтрондармен сәулелендірілген, 300–800 °С температуралар ауқымында төмен температуралы деформация және деформациядан кейінгі күйдіруге ұшыраған 12Х18Н10Т аустениттік тоттанбайтын болаттың фазалық құрамы мен механикалық қасиеттерінің өзгеруі бойынша эксперименттік нәтижелер талқылануда. Деформация және күйдіру арқылы мартенситті α' -фазаның пайда болуы мен өсу ерекшеліктері зерттелді. Болаттың микроқаттылық шамасының α' -фазаның мөлшерінен тәуелділігі қарастырылды.

CHANGES IN PHASE COMPOSITION AND STRENGTH PROPERTIES OF 12Cr18Ni10Ti AUSTENITIC STEEL AS A RESULT OF DEFORMATION AND POST-DEFORMATION ANNEALING

1,2) K.V. Tsai, 1,3) O.V. Rofman, 1,2) M.A. Otstavnov

Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
"MISIS" NUST, Moscow, Russia

The results of experiments studying the peculiarities of changes in both phase composition and mechanical properties of austenitic 12X18H10T stainless steel, unirradiated and irradiated with neutrons, subjected to low-temperature deformation and post-deformation annealings in the temperature range 300–800 °C are discussed. The features of the formation and growth of the martensitic-phase during deformation and annealing are investigated. The dependence of the α' -phase content on microhardness of austenitic steel is considered.

ОТРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОГО РАЗДЕЛЕНИЯ ТОПЛИВНОГО ЭЛЕМЕНТА ВТГР

¹⁾ Дюсамбаев Д.С., ¹⁾ Гизатулин Ш.Х., ¹⁾ Шаймерденов А.А., ¹⁾ Сильнягин П.П., ¹⁾ Аханов А.М., ¹⁾ Буртебаев Н.Т., ²⁾ Уета Ш.

¹⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ²⁾ Japan Atomic Energy Agency, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki, Japan

Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР) на две трети состоит из графита. Графит является замедлителем и отражателем нейтронов, а также основным конструкционным материалом активной зоны, что позволяет эксплуатировать реактор при высоких температурах. Графит был выбран из-за его хороших ядерно-физических и теплофизических свойств. Ядерное топливо представляет собой сферические микротвэлы, которые спрессованы в графитовом топливном элементе, из которых далее собираются ТВС. В Институте ядерной физики Республики Казахстан проводятся работы по квалификации облученного топлива ВТГР. Для исследования свойств облученного топлива ВТГР необходимо извлечь микротвэлы из графитовой матрицы. В работе приведены результаты экспериментов по электрохимическому разделению графита и необлученного топлива ВТГР.

Ключевые слова: электрохимическое разделение, топливный элемент, ВТГР, ВВР-К.

Введение

Ядерные установки (ЯУ) имеют потенциальную опасность для населения и окружающей среды, как и любая другая установка, поэтому главной задачей разработчиков ЯУ является обеспечение их безопасной эксплуатации.



Рисунок 1. Блок-схема исследования облученных топливных элементов

Высокотемпературный газоохлаждаемый реактор (ВТГР) – это один из самых безопасных реакторов, в котором практически полностью исключена такая тяжелая авария, как плавление активной зоны. Важным аспектом также является экономичность реактора. Одним из способов улучшения экономичности является увеличение выгорания топлива с обязательным обеспечением целостности его оболочек, а, значит, и ядерной безопасности.

В РГП «Институт ядерной физики» Республики Казахстан (ИЯФ) совместно с Агентством по атомной энергии Японии проводятся работы по квалификации трехструктурного изотропного топлива реактора ВТГР [1, 2]. Этапы работ приведены на диаграмме (см. рисунок 1).

После извлечения из капсулы облученных топливных элементов (компактов) был проведен их визуальный осмотр с проверкой на изменение размеров (усадка). Следующий шаг – извлечение микротвэлов из графитовой матрицы. Для этой операции был выбран электрохимический метод разделения. Суть метода заключается в пропускании электрического тока через графитовую матрицу с целью ее разрушения.

Методы

Электрохимический метод основан на пропускании постоянного тока через вещество. Для его реализации было разработано специальное устройство, которое позволяет работать с исследуемым радиоактивным веществом дистанционно в «горячих» камерах (см. рисунок 2). В основу конструкции этого устройства была взята модель, которая использовалась на материаловедческом реакторе JMTR в Японии [3– 5]. Устройство было доработано и адаптировано для «горячей» камеры реактора BBP-К.

Устройство, предназначенное для отделения микротвэлов от графитовой матрицы и выщелачивания урана из микротвэлов с поврежденными оболочками, представляет собой стакан из жаропрочного стекла с герметичной крышкой из фторопласта. Стакан заполняется азотной кислотой, которая используется для выщелачивания, и устройство устанавливается на электрическую плиту. Топливный элемент размещается в нейлоновое сито и загружается в стакан. Сито предназначено для исключения короткого замыкания между электродами. Снаружи топливного элемента устанавливается платиновый катод, а в центральное отверстие элемента устанавливается анод. Напряжение на платиновые электроды подавалось от лабораторного стабилизатора TEC-13. Контроль температуры проводится с помощью кислотно-стойкой термопары (платинородиевая). Температура азотной кислоты регулировалась с помощью электрического трансформатора. Для предотвращения выбросов радиоактивных паров кислоты из устройства на его крышке был установлен холодильник Аллина.

В экспериментах отрабатывались разные режимы электрохимического разделения: изменялись температура азотной кислоты, ток, подаваемый на анод и катод, а также длительность электрической диссоциации.

На первом этапе проводились эксперименты с образцами, изготовленными из реакторного графита марки АРВ. Образец полностью воспроизводил внешние размеры топливного элемента.

На втором этапе эксперименты проводились с необлученными топливными элементами.



1 - «холодильник»; 2 – крышка; 3 – прокладка; 4 - стеклянный сосуд; 5 – анод; 6 – катод; 7 - изолирующий экран; 8 - топливный элемент; 9 - платинородиевая термопара; 10 - электрическая плита

Рисунок 2. Устройство для электрохимического разделения топливного элемента

Результаты и их обсуждения

Отработка технологии электрохимического разделения выполнена с имитаторами элементов, изготовленными из реакторного графита, и с необлученными топливными элементами реактора ВТГР

С графитовым имитатором электрическая диссоциация проведена в азотной кислоте с концентрацией 36 % и плотностью 1,22 г/см³ (плотность кислоты измерялась с помощью ареометра при температуре 20 °C).

Первый эксперимент был проведен без нагрева кислоты. Температура кислоты была равна 18 °C. Напряжение между анодом и катодом составляло 3 В, а ток – 4 А. Внешний вид образца через час диссоциации показан на рисунке 3-б. Через два часа – на рисунке 3-в.



Рисунок 3. Первый эксперимент: (а) исходный образец; (б) образец через 60 мин диссоциации; (в) образец через 120 мин диссоциации

Во втором эксперименте азотную кислоту нагрели до 105 °С и при том же режиме провели диссоциацию. На электроды было подано напряжение 3 В и ток 3 А. Ток сразу начал увеличиваться, достигнув 4 А за 5 минут, в то время как стабилизатор TEC-13 автоматически переключился в режим стабилизации тока, поддерживая ток на уровне 4 А до конца эксперимента. После одного часа диссоциации образец почти полностью разрушился – см. рисунок 4-б.



Рисунок 4. Второй эксперимент: (а) исходный образец; (б) образец через 60 мин диссоциации

В третьем эксперименте с необлученным топливным элементом реактора ВТГР азотную кислоту нагрели до 103 °С. На электроды был подан ток 4 А. Вначале напряжение на электродах составляло 3,3 В. Через 6 минут напряжение снижается до 2,3 В, тогда как через 20 минут оно увеличивается до 3,25 В, а ток остается на уровне 4 А. Процесс электрической диссоциации длился 63 минуты.

При выключенном напряжении анод был извлечен из устройства для проверки состояния топливного элемента. На аноде не было элемента, то есть, электрическая диссоциация была полностью завершена. Далее было проведено кислотное выщелачивание образовавшихся микротвэлов в течение 23 часов при 95 °C.

После выщелачивания была проведена фильтрация раствора через сито с размером ячейки 0,7×0,7 мм. В результате все частицы топлива и некоторое количество порошка графита остались на сите. Полученную смесь промыли струей обессоленной воды для очистки от графитового порошка. Внешний вид частиц топлива, подвергшихся воздействию этих операций, показан на рисунке 5. Из рисунка видно, что небольшая часть топливного образца не подвергалась диссоциации, оставаясь в виде двух фрагментов. Фрагменты содержат 12–15 частиц топлива. Прилипший графит наблюдается на поверхности некоторых частиц топлива.

Третий эксперимент выявил некоторые недостатки в конструкции устройства. Например, после электрической диссоциации и кислотного выщелачивания часть частиц топлива осталась в сетчатом сите, и их было невозможно извлечь с помощью манипулятора. Другим недостатком был плохой контроль центровки анода и топливного элемента в катоде.

Вследствие чего сетчатый экран был заменен, и было сделано дополнительное устройство для центрирования анода. Затем было проведен четвертый эксперимент.

В четвертом эксперименте с необлученным топливным элементом азотную кислоту нагрели до 86 °С. Для достижения полной диссоциации элемента было принято решение снизить ток между электродами до 2 А и увеличить время диссоциации. На начальном этапе испытания напряжение на электроде составляло 2,0 В. Через 20 минут напряжение начало постепенно падать, достигнув 1,5 В через 45 минут. Затем напряжение начало расти, достигнув 2,0 В за 94 минуты при неизменном токе в 2 А. После этого напряжение оставалось неизменным. Процесс электрической диссоциации длился 212 минут.

Напряжение и ток на электродах в зависимости от времени показаны на рисунке 6. Анализ рисунка 6 показал, что уменьшение напряжение на электродах связано с началом разрушения топливного элемента, и оно обратно восстанавливается после полного разрушения топливного элемента.



Рисунок 5. Итоги третьего эксперимента



Рисунок 6. Четвертый эксперимент. Напряжение и ток на электродах как функции времени

После выключения напряжения анод был извлечен для проверки состояния топливного элемента. На аноде не было элемента, то есть, электрическая диссоциация завершена полностью (см. рисунки 7 и 8). Затем кислотное выщелачивание проводили при 90–92 °С в течение 24 часов. В дальнейшем были проведены процедуры, аналогичные эксперименту 3. Оставшиеся фрагменты элемента содержат от 5 до 8 микротвэлов.



Рисунок 7. Фрагменты топливного элемента после четвертого эксперимента

В итоге из одного элемента были выделены около 500–600 микротвэлов.

Заключение

Разработанное устройство доказало свою работоспособность. Операторы «горячих» камер отработали свои навыки работы с данным устройством.

В результате экспериментов был выбран оптимальный режим электрохимического разделения топливного элемента. Время диссоциации будет составлять 180 минут, а напряжение и ток, подаваемые на электрод, будут составлять, соответственно, 2 В и 2 А.





Рисунок 8. Необлученный топливный элемент и выделенные из него микротвэлы

В дальнейшем запланированы разделение и выщелачивание высокоактивных облученных топливных элементов ВТГР.

Благодарности

Авторы выражают огромную благодарность экспериментальной группе, участвовавшей в проведении данных работ.

- Ueta S. Irradiation test and post irradiation examination of the high burnup HTGR fuel / Shohei Ueta, Jun Aihara, Asset Shaimerdenov, Daulet Dyussambayev, Shamil Gizatulin, Petr Chakrov, Nariaki Sakaba // Proceeding of 8th International Topical Meeting on High Temperature Reactor Technology, November 6–10, 2016 Las Vegas, NV, USA. – pp. 246–252. – 2016.
- Shaimerdenov A.A. Investigation of irradiated propertied of extended burnup TRISO fuel / A.A. Shaimerdenov, Sh.Kh. Gizatulin, Ye.Kenzhin, D.S. Dyussambayev, S. Ueta, T. Shibata // Proceeding of International Conference on High Temperature Reactor Technology, October 8–10, 2018, Warsaw, Poland. – 2018.
- Saito S. Design of High Temperature Engineering Test Reactor (HTTR) / Shinzo Saito, Toshiyuki Tanaka, Yukio Sudo et al. // JAERI-1332. Japan Atomic Energy Research Institute, Japan (1994). – pp. 1–247. – 1994.
- Sawa K. Investigation of irradiation behavior of SiC-coated fuel particle at extended burnup / K. Sawa, T. Tobita // Nucl. Technol. 142 (2003). – pp. 250–259. – 2003.
- Ueta S. Preliminary Test Results for Post Irradiation Examination on the HTTR Fuel / S. Ueta, M. Umeda, K. Sawa, S. Sozawa, M. Shimizu, Y. Ishigaki, H. Obata // J. Nucl. Sci. Technol. 44 (2007). – pp. 1081–1088. – 2007.

ЖТГР-ДЫҢ ОТЫН ЭЛЕМЕНТІНІҢ ЭЛЕКТРОХИМИЯЛЫҚ ЖОЛМЕН БӨЛУДІҢ ТЕХНОЛОГИЯСЫН ДАМЫТУ

¹⁾ Д.С. Дюсамбаев, ¹⁾ Ш.Х. Гизатулин, ¹⁾ А.А. Шаймерденов, ¹⁾ П.П. Сильнягин, ¹⁾ А.М. Аханов, ¹⁾ Н.Т. Буртебаев, ²⁾ Ш. Уета

¹⁾ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан ²⁾Жапония Атом Энергиясы агенттігі, Оарай ауылы, Хигасиибараки ауданы, Ибараки префектурасы, Жапония

Жоғары температуралы газбен салқындатылатын реактордың үштен екісі (ЖТГР) графиттен тұрады. Графит нейтрондардың баяулатқышы және шағылдырғышы, сондай-ақ белсенді аймақтың негізгі құрылымдық материалы болып табылады, сондықтан реакторды жоғары температурада пайдалануға мүмкіндік береді. Графит оның жақсы физикалық-ядролық және термофизикалық қасиеттері үшін таңдап алынды. Ядролық отын сфералық микро жылу шығаратын элемент, ол графит жинағына кіреді, одан кейін отын жинамалары жиналады. Қазақстан Республикасының Ядролық физика институты ЖТГР-дың сәулелендірілген отынның сапасын бағалаудың процесі бойынша жұмыс жүргізеді. Сәулелендірілген ЖТГР отынның қасиеттерін зерттеу үшін графит матрицасынан микро жылу шығаратын элементті алу керек. Бұл жұмыста графит пен сәулелендірілмеген отынның ЖТГР электрохимиялық бөлінуіндегі эксперименттердің нәтижелері келтірілген.

Түйінді сөздер: электрохимиялық бөліну, отын элементі, ЖТГР,ССР-К.

DEVELOPMENT OF TECHNOLOGY OF ELECTROCHEMICAL SEPARATION OF FUEL ELEMENT OF HTGR

¹⁾ D.S. Dyussambayev, ¹⁾ Sh.Kh. Gizatulin, ¹⁾ A.A. Shaimerdenov, ¹⁾ P.P. Silnyagin, ¹⁾ A.M. Akhanov, ¹⁾ N. Burtevayev, ²⁾ Sh. Ueta

¹⁾ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan ²⁾ Japan Atomic Energy Agency, Oarai-machi, Higashiibaraki-gun, Ibaraki, Japan

High-temperature gas-cooled reactor (HTGR) by two-thirds consists of graphite. Graphite is a moderator and reflector of neutrons, as well as the main structural material of the active zone, which allows operating the reactor at high temperatures Graphite is moderator and neutron reflector, and the main structural material of the core, allowing the reactor to operate at high temperatures. Nuclear fuel is a spherical microfuel, which are compressed into a graphite compact, from which fuel assemblies are then assembled. The Institute of Nuclear Physics of the Republic of Kazakhstan is working on the qualification of irradiated fuel HTGR. To study the properties of the irradiated fuel HTGR, it is necessary to extract microfuel from the graphite matrix. The paper presents the results of experiments on the electrochemical separation of graphite and unirradiated fuel HTGR.

Keywords: electrochemical separation, fuel element, HTGR, WWR-K.

УДК 661.879.1:547.994

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СОДЕРЖАНИЯ УРАНА В МОЧЕ МЕТОДОМ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИИ С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННОЙ ПЛАЗМОЙ

Кириллова Т.Г., Дюсембаева М.Т., Мухамедияров Н.Ж.

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Разработана методическая схема определения содержания урана в моче человека методом квадрупольной массспектрометрии с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-спектрометра *Agilent 7700x (Agilent Technologies)*. Показана возможность прямого измерения содержания урана в образцах мочи, разбавленных раствором 3% азотной кислоты, без проведения автоклавного разложения.

Полученная градуировочная зависимость для определения урана в диапазоне концентраций 0,1–10 мкг/л характеризуется коэффициентом корреляции 0,9998 и значениями относительного стандартного отклонения 4-9 %. Предел определения метода составил 30 нг/л. Дана оценка влияния спектральных и матричных помех на результаты измерения. Определена возможность применения калибровки с подбором матрицы для снижения матричного эффекта при определении урана в моче.

Ключевые слова: уран, моча, ИСП–МС, разбавление, автоклавное разложение, метод добавок, матричный эффект.

Введение

Определение содержания урана в моче проводят для оценки его вклада в дозовую нагрузку внутреннего облучения людей, так как известны закономерности, описывающие зависимость скорости выделения нуклида с мочой от его содержания в организме [1].

При дозиметрическом контроле персонала используют радиометрический метод измерения активности урана после радиохимического выделения из проб мочи, лазерно-люминесцентный метод. Все эти методы трудоемки, пределы погрешности определения составляют 30–50 % [2, 3].

Решением данной задачи является применение метода масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (ИСП–МС) с использованием малого количества исследуемого материала для измерения, отличающегося высокой чувствительностью, точностью и низкими пределами обнаружения. Тем не менее, основным ограничением метода являются матричные помехи – спектральные и неспектральные.

Причинами спектральных помех в масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой могут являться: изобарные наложения, наложение сигналов двухзарядных и полиатомных ионов. При анализе водных растворов в плазме наиболее распространены полиатомные ионы, содержащие атом кислорода – оксиды (MeO⁺, ArO⁺), аргиды (Ar₂⁺, MeAr⁺) и их вариации с включением других атомов [4].

При определении изотопа ²³⁸U в моче возможны полиатомные интерференции от ионов органической матрицы ¹⁹⁸HgAr⁺, ¹⁹⁰OsO₃⁺, ²⁰⁶PbO₂⁺, ²⁰⁶PbS⁺ и др. Для осмия наиболее характерно образование оксидов OsO₄ и OsO₂ [5].

Матричный эффект выражается в подавлении сигнала ионов определяемого элемента и зависит от концентрации и атомной массы определяемого и матричных элементов. При проведении элементного анализа проб мочи методом ИСП–МС возможно появление систематической погрешности, обусловленной неучтенным матричным влиянием, так как моча является сложным биологическим объектом, который содержит органические и неорганические компоненты [6]. Основным способом снижения матричного влияния является прямое разбавление биологических проб, чаще всего пробы подвергают 10-кратному разбавлению [7].

Трудности определения элементов в биологических объектах, связанные с высоким матричным эффектом, требуют дополнительного оборудования и материалов для длительной процедуры подготовки образцов к анализу (микроволновое разложение с кислотами, хроматографическое разделение на ионообменных смолах и т.д.) [8, 9], что неприемлемо для ежедневных рутинных анализов.

Цель настоящей работы состояла в разработке максимально простой и эффективной методической схемы масс-спектрометрического определения содержания урана в моче человека при проведении массовых анализов. Для этого необходимо было выбрать оптимальный способ пробоподготовки, оценить влияние матричных помех на результаты измерений и исследовать возможность их устранения.

1. Экспериментальная часть

1.1. Аппаратура и реактивы

Измерения проводили на квадрупольном массспектрометре Agilent 7700x (Agilent Technologies) в соответствии с оптимизированными параметрами прибора [10]:

мощность, подводимая к плазме: 1550 Вт;

расход распыляющего газа (аргон): 1,07–1,09 л/мин;

 тип сканирования: сканирование пика (3 точки);

- режим детектирования: dual;
- число сканирований на измерение: 100;
- число реплик: 3;
- задержка перед чтением: 20 с;
- время измерения: 1 с;
- время промывки: 40 с.

Для автоматической настройки параметров работы масс-спектрометра *Agilent* 7700x использовали стандартный раствор 1 мкг/л Се, Со, Li, Mg, Tl, Y в 2 % HNO₃.

Градуировочные растворы с содержанием урана 0; 0,1; 0,5; 1; 2; 5 и 10 мкг/л готовили разбавлением многоэлементного стандарта IV–ICPMS–71A F2– MEB419012 (*Agilent*) с аттестованным значением содержания элементов $(10,0 \pm 0,1)$ мкг/мл.

В работе применяли реактивы: концентрированная азотная кислота (HNO₃ ос. ч); ГСО урана 7115– 94 с содержанием урана 300 мг/л, ГСО ионов свинца (1 г/л).

Для приготовления всех растворов использовали получаемую на установке «Водолей» деионизованную воду с удельной проводимостью не более 0,15 мкСм/см.

1.2. Объекты исследования

В качестве исследуемых образцов использовали суточные пробы мочи добровольцев. Для корректного сравнения результатов анализа в пробах предварительно было определено содержание урана, которое находилось в диапазоне от 0,04 до 0,40 мкг/л.

Для исследования матричных спектральных и неспектральных помех была приготовлена биоматрица мочи с учетом данных по химическому составу мочи взрослого здорового человека [11]. Содержание органической составляющей – мочевины (CH₄N₂O) и неорганических компонентов суточной мочи здорового человека и искусственной биоматрицы приведено в таблице 1.

1.3. Подготовка проб

В настоящей работе было применено 2 способа подготовки проб мочи к анализу: разбавление пробы азотной кислотой и автоклавное разложение с азотной кислотой.

Разбавление. Аликвоту образца объёмом 1 мл помещали в мерный полипропиленовый тубус и доводили объем до 10 мл 3 % HNO₃.

Автоклавное разложение. Аликвоту образца объёмом 1 мл помещали во фторопластовый вкладыш автоклава, добавляли 1 мл 7М HNO₃. Автоклав помещали в сушильный шкаф, разогретый до 160 °С, выдерживали 2,5 часа. Охлажденную пробу количественно переносили в мерный полипропиленовый тубус, обмывая стенки вкладыша деионизованной водой, доводили объем до 10 мл. Концентрация фона полученного раствора $\approx 3 \%$ HNO₃, разбавление пробы составило 10 раз.

1.4. Сравнение результатов анализа проб, подготовленных разными способами

Для сравнения результатов определения урана в образцах, подготовленных к анализу разными способами, и для контроля правильности измерений применяли метод стандартных добавок. Рекомендуют вводить такую добавку, которая приводит к надежно фиксируемому увеличению аналитического сигнала. В исследуемые пробы вводили аттестованную добавку ГСО урана (Сдвнес) из расчета 10 мкг/л на разбавленный раствор. Величина добавки (10 мкг/л) приблизительно в 70 раз выше среднего исходного содержания урана в исследуемых пробах (0,14 мкг/л).

Измеренное содержание добавки урана ($C_{Дизм}$) определяли, как разность измеренного содержания урана в пробе с добавкой урана ($C_{ИЗM}$) и содержания урана в исходной исследуемой пробе ($C_{ИСХ}$):

1.5. Оценка спектральных помех при определении содержания урана

Оценку вклада спектральных помех в правильность результатов определения проводили методом добавок с помощью растворов, моделирующих состав анализируемых образцов. В настоящей работе для выявления возможных спектральных помех от присутствия ионов свинца при определении урана было проведено измерение интенсивности сигнала урана в растворах свинца, приготовленных на основе 3 % HNO₃ и искусственной биоматрицы. Содержание добавки свинца составило 200, 400, 600, 800 и 1000 мкг/л.

1.6. Оценка матричных помех при определении содержания урана в моче

Для определения оптимальной степени разбавления проб было измерено содержание урана в растворе синтетической биоматрицы мочи с добавкой 10 мкг/л урана, разбавленном 3 % HNO₃ в 2, 5, 10, 20, 50 и 100 раз.

Для оценки матричных помех была определена относительная погрешность измерения добавки урана (1 мкг/л) в растворах неорганических компонентов матрицы (смесь солей), органической составляющей (карбамид) и искусственной биоматрицы (смесь солей + карбамид), приготовленных в соответствии с данными таблицы 1.

Таблица 1. Состав биоматрицы мочи, г/л

Содержание	Na⁺	K⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cŀ	PO4 ³⁻	SO4 ²⁻	NH₄⁺	CH ₄ N ₂ O
Биоматрица человека [18]	2,0–3,5	1,3–2,3	0,1–0,2	0,04–0,1	3,3–7,3	1,3–4,5	1,2–2,4	0,4–0,9	13,3–23,3
Искусственная биоматрица	2,4	1,8	0,1	0,1	5,5	-	0,4	0,6	18

Чтобы установить, в какой степени содержание основных компонентов матрицы мочи влияет на определение урана, была измерена концентрация внесенной добавки урана (1 мкг/л) в растворах натрия (0–4 г/л) и карбамида (0–25 г/л).

Для установления степени влияния матрицы мочи при определении урана в диапазоне 0–10 мкг/л было измерено содержание добавки урана 0,1; 0,5; 1 и 10 мкг/л в «условно чистой» пробе мочи здорового добровольца двумя методами: с калибровкой градуировочными растворами, приготовленными разбавлением 3 % HNO₃, и калибровкой с подбором матрицы. В качестве матрицы использовался 0,6 % водный раствор NaCl с содержанием ионов Na 2,4 г/л и ионов Cl 3,6 г/л, разбавленный в 10 раз 3 % HNO₃.

2. Результаты и обсуждение

I

2.1. Оценка чувствительности метода

Полученная градуировочная зависимость для определения урана характеризуется коэффициентом корреляции 0,9998, значения относительного стандартного отклонения составили 4–9 %, предел обнаружения урана – 9 нг/л, предел определения урана – 30 нг/л.

Приборный предел обнаружения (ПО) определяли как концентрацию, которой соответствует интенсивность аналитического сигнала, в три раза превышающая стандартное отклонение фонового сигнала (σ_{φ}) [12]:

$$10 = 3\sigma_{\Phi}C_{\rm cr}/I_{\rm cr}, \qquad (2)$$

где: σ_{ϕ} – стандартное отклонение фонового сигнала (3 % HNO₃), имп/с; С_{ст} – концентрация стандартного образца ГСО урана, нг/л; *I*_{ст} – интенсивность сигнала стандартного образца ГСО урана, имп/с.

Предел определения (Попр) для количественного метода анализа рассчитывали как 10 σ_ф – критерий:

$$I_{O\Pi P} = 10\sigma_{\phi} C_{cT} / I_{cT}.$$
(3)

2.2. Результаты анализа проб, подготовленных разными способами

В таблицах 2, 3 приведены результаты измерения содержания урана методом добавок в пробах мочи, подготовленных разными способами, с учетом исходного содержания урана в исследуемых пробах.

Результаты определения добавки урана (С_{Дизм}) в разбавленных и разложенных пробах хорошо согласуются. Значения относительной погрешности результатов измерения образцов, подготовленных разбавлением, находятся в интервале от -3,8% до -9,1%. Относительная погрешность результатов при измерении разложенных образцов составляет от -2,2% до -8,1%. Систематическое занижение результатов измерения концентрации введенной добавки (в среднем 6,5%) можно объяснить влиянием матрицы.

Таким образом, установлено, что образцы мочи можно анализировать без минерализации.

Таблица 2.	Содержание урана	в моче	после разбавления
	3 % HNO3.	мкг/л	

Nº	Внесено Измерено урана урана		Расчётные данные		
пробы	Сдвнес	Сизм	Сисх	Сдизм	Относительная погрешность, %
1	10	9,73	0,34	9,39	-6,1
2	10	9,59	0,20	9,39	-6,1
3	10	9,40	0,12	9,28	-7,2
4	10	9,61	0,11	9,50	-5,0
5	10	9,39	0,30	9,09	-9,1
6	10	9,72	0,10	9,62	-3,8
7	10	9,21	0,06	9,15	-8,5
8	10	9,24	0,06	9,19	-8,1
9	10	9,44	0,09	9,35	-6,5
10	10	9,54	0,04	9,50	-5,0
Среднее	10	9,49	0,14	9,35	-6,5

Таблица 3. Содержание урана в моче после автоклавного разложения, мкг/л

N≌	Внесено урана	Изме ура	рено ана	Pac	чётные данные
пробы	Сдвнес	Сизм	Сисх	Сдизм	Относительная погрешность, %
1	10	9,76	0,40	9,36	-6,5
2	10	10,00	0,22	9,78	-2,2
3	10	9,39	0,11	9,28	-7,2
4	10	9,30	0,14	9,16	-8,4
5	10	9,54	0,35	9,19	-8,1
6	10	9,41	0,09	9,32	-6,8
7	10	9,39	0,08	9,31	-6,9
8	10	9,50	0,08	9,42	-5,8
9	10	9,39	0,11	9,28	-7,2
10	10	9,44	0,05	9,39	-6,1
Среднее	10	9,51	0,16	9,35	-6,5

2.3. Спектральные помехи при определении содержания урана

Результаты измерений интенсивности сигнала урана (U, имп/с) в растворах 3 % HNO₃ (3 % HNO₃) и в растворах искусственной биоматрицы (Матрица) с добавкой свинца (Pb, мкг/л) представлены на рисунке 1, число измерений n = 3.



Рисунок 1. Влияние свинца на определение урана

Из графика видно, что интенсивность сигнала урана в растворах азотной кислоты и искусственной биоматрицы мочи не зависит от концентрации внесённой добавки свинца и не превышает 1300 имп/с. То есть вклад возможной помехи от присутствия свинца ниже уровня сигнала, соответствующего пределу определения урана (2200 имп/с).

2.4. Матричные помехи при определении содержания урана в моче

На рисунке 2 приведена зависимость относительного отклонения измеренного содержания добавки урана (Сизм.) в растворе синтетической биоматрицы мочи от степени разбавления, число измерений n = 3. Добавка урана (Сдоб.) 10 мкг/л, кратность разбавления 3 % раствором HNO₃ составила 2, 5, 10, 20, 50 и 100.



Рисунок 2. Влияние степени разбавления на определение концентрации урана

Как видно из графика, относительная погрешность измерения урана уменьшается с увеличением кратности разбавления за счёт ослабления матричного влияния. При разбавлении в 100 и 50 раз относительное отклонение измеренной концентрации от значения внесённой добавки менее 1 %. При факторе разбавления 20, 10, 5 и 2 матричное занижение составило 1,6 %, 6,6 %, 10,5 % и 15,4 % соответственно.

Для реальных проб мочи выбрана кратность разбавления 10, так как при большей степени разбавления определяемые значения содержания урана могут оказаться ниже предела определения метода.

Результаты анализа модельных растворов, разбавленных в 10 раз 3 % HNO₃, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Определение содержания урана в модельных растворах, n = 3

Модельные растворы	Карбамид	Смесь солей	Биоматрица
Относительная погрешность, %	-(0,4±0,1)	-(9,7±1,8)	-(7,3±2,5)

Как видно из таблицы, относительная погрешность измерения урана в солевой составляющей биоматрицы достигает 10 %, а присутствие карбамида оказывает менее значительное воздействие на подавление сигналов при анализе. Относительное отклонение измеренного содержания добавки урана (Сизм.) от концентрации внесенной добавки урана (Сдоб.) в растворах карбамида и натрия, разбавленных в 10 раз 3 % HNO₃, представлено на рисунках 3 и 4, число измерений n = 3.

Концентрация внесенной добавки урана 1 мкг/л.



Рисунок 3. Влияние концентрации карбамида на определение урана в моче



Рисунок 4. Влияние концентрации натрия на определение урана в моче

Из приведенных графиков видно, что содержание карбамида незначительно влияет на определение урана, лишь при концентрации 25 г/л значение результата снижается на 3 %, что указывает на отсутствие необходимости автоклавной минерализации для разложения органической составляющей матрицы исследуемых проб.

В растворах с концентрацией натрия 1, 2, 3 и 4 г/л матричное занижение составило 5, 8, 15 и 21 % соответственно, то есть с увеличением содержания натрия в растворе относительная погрешность определения урана увеличивается, что подтверждает применимость дополнительного разбавления для снижения матричного эффекта. Однако это неприемлемо при исследовании проб с небольшим содержанием урана.

В таблице 5 представлены результаты измерения и среднее значение относительного отклонения от концентрации добавки урана для методов с калибровкой без подбора матрицы (1 метод) и калибровкой с матрицей (2 метод).

Как видно из таблицы, при определении урана с калибровкой без подбора матрицы систематическое

занижение результатов при измерении концентрации добавки урана в диапазоне 0–10 мкг/л составило в среднем 7 %, то есть, разбавление пробы в 10 раз не позволяет полностью устранить помехи от присутствующих неорганических компонентов матрицы. В этом случае при расчете концентрации урана необходимо вводить поправочный коэффициент 1,07.

Внесено урана,	Измерено	урана, мкг/л	Относительное отклонение от С _{доб} , %		
мкг/л	1 метод	2 метод	1 метод	2 метод	
0,1	0,093±0,006	0,103±0,005	-7,0	3,0	
0,5	0,468±0,030	0,487±0,015	-6,4	-2,6	
1	0,922±0,053	0,977±0,046	-7,8	-2,3	
10	9,340±0,551	10,170±0,600	-6,6	1,7	
Среднее			-7,0	-0,1	

Таблица 5. Результаты измерения содержания урана в моче, n = 3

Определение концентрации добавки урана при калибровке с основным компонентом искусственной матрицы (NaCl) позволило исключить систематическую ошибку и показало относительную погрешность измерения от -2,6% до 3% (в среднем 0,1%).

Таким образом, для того, чтобы уменьшить матричное влияние при определении урана в моче необходимо проводить калибровку прибора с подбором матрицы, то есть для приготовления градуировочных образцов использовать водный раствор NaCl (6 г/л), разбавленный в 10 раз 3 % HNO₃.

Выводы

Разработана простая методическая схема определения содержания урана в моче человека, заключающаяся в прямом масс-спектрометрическом измерении урана в пробах, разбавленных 3 % раствором азотной кислоты в 10 раз. Возможность такого определения подтверждена сравнением результатов измерения содержания урана в пробах мочи, подготовленных различными способами: разбавлением и автоклавным разложением.

Предел определения урана в моче методом МС–ИСП составил 30 нг/л.

Установлено отсутствие спектральных наложений от ионов свинца при определении содержания урана.

Исследованы и количественно оценены вклады солевой и органической составляющих биоматрицы в погрешность измерения урана. Установлено, что присутствие солей оказывает наибольшее воздействие на подавление сигналов при анализе.

Для снижения матричного влияния при определении урана в моче необходимо проводить калибровку прибора с подбором матрицы, в качестве которой для приготовления градуировочных образцов используется 0,6 % раствор NaCl, разбавленный в 10 раз 3 % HNO₃.

Литература

- 1. Jackson S., Dolphin G.W. The estimation of internal radiation dose from metabolic and urinary excretion data for a number of important radionuclides // Ibid. 1966. V. 12, N 4. P. 481–500.
- Регламент 2.6.1.05 2003 Дозиметрический контроль внутреннего облучения персонала предприятий ОАО «ТВЭЛ» М.: Департамент безопасности и чрезвычайных ситуаций Минатома России, 2005. 39 с.
- 3. Методы радиохимического анализа. Женева: ВОЗ, 1967. 155 с.
- 4. Пупышев А.А., Эпова Е.Н. Спектральные помехи полиатомных ионов в методе масс спектрометрии с индуктивно связанной плазмой // Аналитика и контроль. 2001. Т.5. №4. С. 335–369.
- 5. Рабинович В.А., Хавин З.Я. «Краткий химический справочник» Л.: Химия, 1977 стр. 89.
- Иваненко Н.Б., Наволоцкий Д.В., Иваненко А.А., Соловьев Н.Д., Блаженникова И.В. Определение урана в моче методом масс – спектрометрии высокого разрешения с индуктивно – связанной плазмой // www.medline.ru, Токсикология, т. 12, 2012. С. 871–880.
- 7. Осипов К.Б. Исследование и устранение неспектральных помех при анализе биологических жидкостей и лекарственных средств методом масс спектрометрии с индуктивно связанной плазмой: дис. канд. хим. наук М., 2015. 153 с.
- Kurosaki H., Sexton S.M., Gonzalez B. D. Use of chromatographic pre-concentration for routine uranium bioassay analysis by ICP–MS // J Radioanal Nucl Chem. 2013. 298:1017–1022.
- Arnason J.G., Pellegria N., Parsons P.J. Determination of uranium isotope ratios in human urine by sector field inductively coupled plasma mass spectrometry for use in occupational and biomonitoring studies // J. Anal. At. Spectrom., 2013, 28, 1410– 1419.
- 10. Agilent 7700 Series ICP MS. Hardware Maintenance Manual. Agilent Technologies, 2012. 156 p.
- 11. Чеснокова С.А., Шастун С.А., Агаджанян Н.А. Атлас по нормальной физиологии, 2007. 496 с.
- 12. Inductively coupled plasma mass spectrometry handbook / Ed. S. M. Nelms. CRC Press: Boca Raton, 2005. 485 p.

ИНДУКТИВТІ-БАЙЛАНЫСҚАН ПЛАЗМАЛЫ МАСС-СПЕКТРОМЕТРИЯ ӘДІСІМЕН НЕСЕПТЕГІ УРАННЫҢ ҚҰРАМЫН АНЫҚТАУ

Т.Г. Кириллова, М.Т. Дюсембаева, Н.Ж. Мұхамедияров

ҚР ҰЯО Радиациялық қауіпсіздік және экология институты, Курчатов, Қазақстан

Agilent 7700х (Agilent Technologies) масс-спектрометрін пайдалана отырып индуктивті-байланысқан плазмалы квадруполды масс-спектрометрия әдісімен адамның несебіндегі уранның құрамын анықтаудың әдістемелік сұлбасы әзірленді. Автоклавты ыдыратуды өткізбестен азотты қышқылдың 3 % ерітіндісі қосылған несептің үлгілеріндегі уранның құрамын тура өлшеу мүмкіндігі көрсетілді.

Алынған градуирлеуші байланыстылық 0,1–10 мкг/л шоғырлану диапазонындағы уранды анықтау үшін 0,9998 түзеткіш коэффициентімен және қатысты түрдегі 4–9 % стандарттық ауытқу мәндерімен сипатталады. Әдісті анықтау шегі 30 нг/л құрады. Спектралды және матрицалық кедергілердің өлшеу нәтижелеріне әсер етуіне бағалау жасалды. Несептегі уранды анықтау барысында матрицалық әсерді төмендету үшін калибрлеуді қолдану мүмкіндігі анықталды.

Кілт сөздер: уран, несеп, ИСП–МС, араластыру, автоклавты ыдырату, қоспалар әдісі, матрицалық әсер.

DETERMINING CONCENTRATION OF URANIUM USING INDUCTIVELY COUPLED PLASMA MASS-SPECTROMETRY

T.G. Kirillova, M.T. Dyusembayeva, N.Zh. Mukhamediyarov

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" of the RSE "NNC RK", Kurchatov, Kazakhstan

A methodological scheme was developed for determining uranium content in human urine using *Agilent 7700x (Agilent Technologies)* mass-spectrometer and quadrupolar inductively-coupled plasma mass-spectrometry method. The paper demonstrates possibility to measure uranium concentration directly in urine samples diluted with 3% nitric acid solution without autoclave decomposition.

Obtained calibrating dependency for determining uranium within the concentration range of $0.1-10 \mu g/l$ is characterized by the correlation factor of 0,9998 and relative standard deviation of 4–9 %. Determination limit of the method is 30 ng/l. Assessment was made for spectral and matrix interferences with the results of measurements. Possibility of using calibration with selection of matrix to reduce matrix impact when determining uranium content in the urine was determined.

Keywords: uranium, urine, ICP-MS, dilution, autoclave decomposition, standard addition method, matrix effect.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭМИССИИ ЛЕГКИХ ЗАРЯЖЕННЫХ ЧАСТИЦ В РЕАКЦИЯХ, ИНИЦИИРУЕМЫХ ПРОТОНАМИ С ЭНЕРГИЕЙ 30 МэВ НА ЯДРЕ ⁵⁸Ni

^{1,2)} Жолдыбаев Т.К., ^{1,3)} Мукан Ж., ¹⁾ Садыков Б.М., ^{1,2)} Насурлла М., ¹⁾ Дуйсебаев Б.А.,
⁴⁾ Садуев Н.О., ²⁾ Дуйсенбаева А.Ж., ²⁾ Жумадилов И., ³⁾ Байбекова Н.

 ¹⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан
²⁾ Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан
³⁾ Евразийский Национальный Университет им. Гумилева, Астана, Казахстан
⁴⁾ Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа, Казахский Национальный Университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Работа связана с изучением инклюзивных спектров вторичных протонов, возникающих при взаимодействии протонов с энергией 30,0 МэВ с ядром ⁵⁸Ni. Получены дважды-дифференциальные и интегральные сечения реакций (p, xp) с дальнейшим определением полного парциального сечения. Анализ экспериментальных спектров выполнен на основе модифицированной версии экситонной модели предравновесного распада в рамках расчетной программы *PRECO-2006*. Определены вклады равновесного, предравновесного и прямого механизмов в формирование интегрального сечения. Результаты эксперимента могут быть использованы при разработке новых подходов в теории ядерных реакций, а также при разработке безопасных и безотходных гибридных атомных электростанций.

Введение

В теории ядерных реакций рассматривались, в основном, два предельных подхода – механизм образования составного ядра и прямых ядерных реакций. Однако исследования последних десятилетий привели к веским аргументам в пользу реализации специфических процессов, реализуемых в реакциях до образования составного ядра в классическом его понимании, в объяснении которых традиционные представления о механизмах реакций оказались не состоятельными. В реакциях, инициируемых ү-квантами, нуклонами и более сложными частицами вплоть до тяжелых ионов, вклад компоненты сечения, расположенный на энергетической шкале непосредственно за характерным максвелловским распределением, связанным с эмиссией частиц из равновесного состояния, оказался значительным, а в ряде процессов определяющим в формировании полного сечения (рисунок 1).

Развитие концепции механизма предравновесного распада ядер является актуальной задачей теории ядерных реакций и непосредственно связано с получением отсутствующих к настоящему времени прецизионных экспериментальных данных по дифференциальным, дважды дифференциальным и интегральным сечениям в реакциях с различными типами частиц во входном канале. Роль новых ядерно-физических экспериментов является ключевой как в фундаментальных, так и в прикладных исследованиях, связанных, в частности, с разработкой электро-ядерных установок (Accelerator Driven System, ADS) для ядерной трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов атомной промышленности и производства энергии [2]. Физический сценарий подобной системы предусматривает экспериментальные данные по ключевым параметрам взаимодействия нуклидов

и нуклонов – сечениям, энергетическим спектрам и угловым распределениям продуктов реакций, которые могут выступать в качестве агентов инициирующих реакции с испусканием нейтронов, необходимых для работы ADS [3]. В этом аспекте наиболее актуальным остаются определение величины сечений в области энергии протонов вблизи 30 МэВ. При этой энергии открыто много каналов реакций, а полное сечение реакций для исследуемых ядер достигает своего максимума (рисунок 2).



Рисунок 1. Сечения вылета протонов в зависимости от энергии возбуждения (экспериментальные данные из работы [1])



Рисунок 2. Зависимость экспериментальных полных сечений реакций (экспериментальные данные взяты из [4-7]) от энергии налетающих протонов для трех массовых областей

Основная часть

Измерения сечений ядерных реакций ⁵⁸Ni (p, xp) были выполнены на изохронном циклотроне У-150М ИЯФ [8]. Исследовались инклюзивные энергетические спектры и угловые распределения протонов из реакций (р, хр) при энергиях налетающих протонов 30 МэВ. Камера рассеяния установлена на расстоянии 23,9 м от выхода пучка циклотрона. Максимальная угловая неопределенность системы коллиматоров, расположенной непосредственно перед камерой рассеяния, обеспечивала линейные размеры пучка на мишени ~3 мм. Юстировка камеры рассеяния относительно оси ионопровода осуществлялась оптическими методами. Спектрометр частиц располагался на вращающейся крышке камеры рассеяния под углом 10° к плоскости реакции и мог быть установлен относительно оси пучка под углами $\theta_{\mathcal{IC}} = 10^{\circ} \div 170^{\circ}$ с точностью 0,1°. Для определения числа частиц, падающих на мишень, применялась система цилиндр Фарадея – интегратор тока. Основные характеристики условий эксперимента представлены в таблице 1.

Таблица 1. Основные характеристики условий эксперимента

Телескоп	Толі дете	Толщина детектора		Реакция	Углы регистрации,	
Δ <u>Ε</u> -Ε	∆ <i>Е</i> , мкм	<i>Е</i> , мкм	мкср		Δθ=15	
Si-CsI(TI)	100	25000	26,2±0,3	⁵⁸ Ni (p, xp)	30°÷135°	

В качестве исследуемого ядра-мишени был выбран ⁵⁸Ni как кандидат конструкционного элемента любых современных ядерных установок. Характеристики мишени приведены в таблице 2. Толщина мишени контролировалась по потерям энергии α -частиц от тройного α -источника ^{241,243} Am + ²⁴⁴Cm.

Таблица 2. Характеристика мишени

Материал	Толщина, мг/см²	Обогащение, %
⁵⁸ Ni	3,3	98

При взаимодействии протонов с ядрами мишени открыто много каналов реакций и регистрацию интересующих нас продуктов реакций приходится вести в условиях большого фона других конкурирующих процессов. Для выделения нужного сорта частиц использовался метод регистрации двух параметров детектируемой частицы: удельной ионизации (dE/dx) и полной энергии (*E*). Блок-схема электроники ΔE -E – методики приведена на рисунке 3.

Систематические ошибки сечений обусловлены, главным образом, погрешностями в определении толщины мишени (< 5 %), калибровки интегратора тока (1 %) и телесного угла спектрометра (1,3 %). Энергия пучка ускоренных частиц измерялась с точностью 1,2 %. Величина отношения числа отсчетов монитора к интегратору сохранялась постоянной в пределах 1 %. Полная систематическая ошибка не превышала 8 %.



Amp. #1, #2 – спектроскопический усилитель; SCA #1, #2 – одноканальный анализатор; Coinc. #1 – схема совпадений; Counter #1 – пересчетная схема; ADC #1, #2 – амплитудно-цифровой преобразователь (АЦП)

Рисунок 3. Блок-схема электроники ДЕ-Е методики

Статистическая ошибка, величина которой зависела от типа и энергии регистрируемых частиц, изменялась для протонов от 1 % в низкоэнергетической до 10 % в высокоэнергетической областях энергий.

Для калибровки Е-детектора кинетическая энергия частицы, соответствующая номеру канала X, определялась по известным состояниям остаточных ядер (мишени ¹²C, CH₂). Вычитая из нее потерю энергии частицы в мишени и ΔE -детекторе, находилось значение энергии, поглощенной *E*-детектором. Такая функция, связывающая номер канала в линейных спектрах с энергией поглощенной в *E*-детекторе, называется опорной калибровкой. Зная ее, и восстановив по данной остаточной энергии потери в ΔE -детекторе, можно получить энергию частицы перед попаданием в телескоп детекторов. Затем, прибавив к последней потери в мишени, находим энергию частицы, покинувшей ядро.

После интегрирования по углу дважды-дифференциальных сечений было получено интегральное сечение рассматриваемой реакции. На рисунках 4 и 5 представлены дважды-дифференциальные и интегральные спектры реакций ⁵⁸Ni (p, xp). Определенное из них парциальное сечение реакции приведено в таблице 3.



Рисунок 4. Экспериментальные дважды-дифференциальные сечения реакций (р, хр) на ядре ⁵⁸Ni

Анализ экспериментальных результатов реакций (p, xp) на ядре ⁵⁸Ni выполнен в рамках экситонной модели распада ядер, которая по своей сути является статистическим подходом, описывающим переход возбужденного ядра в равновесное состояние. Она широко используется при интерпретации многих экспериментальных результатов. Одним из достоинств модели является то, что кинетические уравнения, на которых она основана, описывают весь процесс релаксации возбужденной ядерной системы, начиная от простейших квазичастичных конфигураций и заканчивая установлением статистического равновесия. Это, в частности, позволяет по-новому взглянуть на ставший уже традиционным механизм испускания частиц из составного ядра. Разработанные быстрые методы решения кинетических уравнений открыли возможность изучения многочастичной эмиссии частиц. Модель описывает одновременно энергетические спектры не только нуклонов, но и сложных частиц, а современные ее версии включают также описание и угловых распределений.

Первый вариант экситонной модели был предложен Griffin J.J. [9]. Ядро в ней трактуется как система фермионов со слабым двухчастичным остаточным взаимодействием, а возбужденные состояния классифицируются числом квазичастиц (экситонов) n=p+h, где p – число частиц выше энергии Ферми ε_F , h – число дырок ниже ε_F . Реакция протекает от исходной стадии с числом экситонов n₀ через промежуточные в направлении увеличения числа экситонов до значения \overline{n} , характеризующего состояние составного ядра, при котором в системе достигается статистическое равновесие. При этом на каждой её стадии существует возможность эмиссии частиц в конечные открытые каналы реакции.





Рисунок 5. Интегральные сечения реакций (р, хр) на ядре ⁵⁸Ni

Таблица 3. Экспериментальные парциальные сечения реакций (р, хр) на ядре ⁵⁸Ni

Реакция	Энергетический диапазон, МэВ	σ, (мб)
⁵⁸ Ni (p, xp)	5–30	712±10

В рамках этой модели принимается, что ядро имеет набор эквидистантных одночастичных состояний, а состояния ядра в целом характеризуются числом частиц p (выше уровня Ферми) и дырок h (ниже уровня Ферми). Взаимодействие, в результате которого ядро переходит из одного состояния в другое, считается двухчастичным и достаточно слабым, чтобы можно было применить теорию возмущений при вычислении вероятностей переходов. Энергия системы сохраняется. В двухкомпонентной модели протонные и нейтронные степени свободы учитываются раздельно.

Теоретический анализ экспериментальных результатов был выполнен в рамках модифицированной версии экситонной модели. При анализе экспериментальных данных исследуемых реакций использовалась написанная на языке Фортран программа PRECO-2006 [10]. Во всех расчетах (программа *PRECO-2006*) в качестве исходной бралась $(p_{\pi}, h_{\pi}, p_{\nu}, h_{\nu}) = (1, 0, 0, 0)$ частично-дырочная конфигурация. Нормировочный коэффициент Kg принимался равным 15 МэВ. При параметризации квадрата матричных элементов использовались значения нормировочных констант: $K_{\pi\pi}$: $K_{\pi\nu}$: $K_{\nu\nu}$ =2200:900:900 МэВ². Эти значения параметров являются рекомендованными в программе PRECO-2006. При определении использовались параметры оптического по- $\sigma_{_{a,pre}}$

тенциала Becchetti-Greenlees [11] для протонов.

На рисунке 5 приведено сравнение теоретических и экспериментальных данных по интегральным сечениям реакций (p, xp) на ядре ⁵⁸Ni. Получено удовлетворительное согласие экспериментальных и расчетных значений в области энергий, соответствующих предравновесному механизму. Из сравнения интегральных спектров следует, что основной вклад в жесткую часть интегрального сечения реакций (p, xp)

на всех исследуемых ядрах обусловлен предравновесным механизмом. Вклад одноступенчатых механизмов в реакции (p, xp) незначителен. Испарительная (низкоэнергетическая) часть сечения в рамках используемой версии экситонной модели коррелирует с результатами расчетов в рамках формализма распада составного ядра Вайскопфа.

Заключение

Впервые измерены экспериментальные дваждыдифференциальные и интегральные спектры протонов в широком диапазоне энергий и углов из реакций, инициированных протонами с энергией 30 МэВ на ядре ⁵⁸Ni. Определены экспериментальные парциальные сечения исследованной реакции. Выполнен теоретический расчет экспериментальных инклюзивных спектров указанных реакций в рамках экситонной модели предравновесного распада. Сечения в реакциях (р, хр) на исследованных ядрах при энергии протонов 30 МэВ в высокоэнергетической области преимущественно формируются механизмом предравновесного распада, а в низкоэнергетической – механизмом распада из составного ядра. Вклад одноступенчатых прямых процессов является незначительным. Полученные экспериментальные результаты восполняют базу ядерных данных по сечениям реакций и могут быть использованы при конструировании безопасных и безотходных гибридных ядерноэнергетических установок.

Работа выполнена в рамках программно-целевого финансирования научных, научно-технических программ МОН РК, грант BR05236494.

Литература

- 1. Bertrad F.E. and Peelle R.W. Complete hydrogen and helium particle spectra from 30 to 60 MeV proton bombardment of nuclei with A=12 to 129 and comparison with the intranuclear cascade model // Phys. Rev. -1973. -N 3. -P. 1045–1064.
- 2. Риволь Ж.-П. Электроядерная установка для уничтожения ядерных отходов // УФН. − 2003. Т. 173, Вып. 7. С. 747– 755.
- Герасимов А.С., Киселев Г.В. Научно-технические проблемы создания электроядерных установок для трансмутации долгоживущих радиоактивных отходов и одновременного производства энергии (российский опыт) // ЭЧАЯ. – 2001. – Вып. 1, №32. – С. 143–188.
- McGill W.F., Carlson R.F., Short T.H., Cameron J.M., Richardson J., Slaus I., van Oers W.T.H., Verba J.W., Margaziotis D.J., Doherty P. Measurements of the proton total reaction cross section for light nuclei between 20 and 48 MeV // Phys. Rev. – 1974. – Vol. C10, № 6. – P. 2237–2246.
- Menet J.J.H., Gross E.E., Malanify J.J., Zucker A. Total-reaction-cross-section measurements for 30–60 MeV protons and imaginary optical potencial // Phys. Rev. – 1971. – Vol. C4, № 4. – P. 1114–1129.
- Wilkins B.D., Igo G. 10-MeV Proton Reaction Cross Sections for Several Elements // Phys. Rev. 1963. Vol. 129. P. 2198– 2206.
- Dicello J.F., Igo G.J., Roush M.L. Proton Total Reaction Cross Sections for 22 Isotopes of Ti, Fe, Ni, Cu, Zn, Zr, and Sn at 14.5 MeV // Phys.Rev. – 1967. – Vol.157. – P.1001-1015.
- 8. Арзуманов А.А., Неменов Л.М., Анисимов О.И. и др. Изохронный циклотрон с регулируемой энергией ионов // Изв. АН КазССР, сер. физ.-мат. 1973. № 4. С.6-15.
- 9. Griffin J.J. Statistical model of intermediate structure // Phys.Rev. Lett. 1966. Vol. 17. P. 478-481.
- Kalbach C., PRECO-2006: Program for Calculating Pre-equilibrium and Direct Reaction Double Differential Cross-Sections // LA-10248-MS, February 2006.
- Becchetti F. D., Greenlees G.W. Nucleon-nucleus optical-model parameters, A340, E<50 MeV // Phys. Rev.- 1969. C 182. P.1190–1209.

⁵⁸Ni ЯДРОСЫНДА ЭНЕРГИЯСЫ 30 МэВ ПРОТОНДАР ӘСЕРІНЕН БОЛАТЫН РЕАКЦИЯЛАРДАҒЫ ЗАРЯДТАЛҒАН ЖЕҢІЛ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЭМИССИЯСЫН ЗЕРТТЕУ

^{1,2)} Т.К. Жолдыбаев, ^{1,3)} Ж. Мукан, ¹⁾ Б.М. Садыков, ^{1,2)} М. Насурлла, ¹⁾ Б.А. Дуйсебаев, ⁴⁾ Н.О. Садуев, ²⁾ А.Ж. Дуйсенбаева, ²⁾ И. Жумадилов, ³⁾ Н. Байбекова

 Ядролық физика институты, Алматы, Казақстан
әл-Фараби ат. Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Казақстан
Гумилев ат. Еуразия Ұлттық Университеті, Нұр-Сұлтан, Казақстан
Ашық түрдегі Ұлттық Нанотехнологиялық зертхана, әл-Фараби ат. Казақ Ұлттық Университеті, Алматы, Казақстан

Жұмыс энергиясы 30 МэВ протондардың ⁵⁸Ni ядросымен әсерлесуінде пайда болатын екінші протондардың инклюзивті спектрлерін зерттеумен байланысты. (р, хр) реакциясының екінші ретті дифференциалдық және интегралдық қималары толық парциалды қиманы ары қарайғы анықтаумен алынды. Тәжірибелік спектрлерді талдау *PRECO-2006* есептеуіш бағдарламасы аясында тепе-теңдік алдындағы ыдыраудың экситонды моделінің өзгертілген нұсқасы негізінде жасалынды. Тепе-теңдік, тепе-теңдік алдындағы және тура механизмдердің интегралды қиманы құрудағы үлестері анықталды. Эксперимент нәтижелері ядролық реакциялар теориясын әзірлеуде, сондай-ақ қауіпсіз әрі қалдықсыз гибридті атом электрстанцияларын әзірлеуде қолданылуы мүмкін.

INVESTIGATION OF THE EMISSION OF LIGHT CHARGED PARTICLES IN REACTIONS INITIATED BY PROTONS WITH 30 MeV ENERGY AT ⁵⁸Ni NUCLEUS

^{1,2)} T.K. Zholdybayev, ^{1,3)} Zh. Mukan, ¹⁾ B.M. Sadykov, ^{1,2)} M. Nassurlla, ¹⁾ B.A. Duysebayev, ⁴⁾ N.O. Saduyev, ²⁾ A.Zh. Duysenbayeva, ²⁾ I. Zhumadilov, ³⁾ N. Baybekova

 ¹⁾ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
²⁾ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan
³⁾ Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan
⁴⁾ National Nanotechnology Laboratory of Open Type, al Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

The work related to the study of the inclusive spectra of secondary protons produced in the interaction of protons with energies of 30.0 MeV with the nucleus ⁵⁸Ni. Double-differential and integral cross sections of (p, xp) reaction have been received with further determination of their total partial cross sections. The analysis of the experimental spectra is based on a modified version of the exciton model of pre-equilibrium decay in the frame of code *PRECO-2006*. The contributions of compound, preequilibrium and direct mechanisms to the formation of the integral cross section are calculated. The experimental results can be used in developing new approaches in theory of nuclear reactions, as well as the design of safe and non-waste hybrid nuclear power plants.

УДК 669.293'6'71:539.23:537.312.62

РЕНТГЕНОСТРУКТУРНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОКРЫТИЙ СИСТЕМЫ ГАФНИЙ-УГЛЕРОД

¹⁾ Тулеушев Ю.Ж., ¹⁾ Жаканбаев Е.А., ¹⁾ Суслов Е.Е., ²⁾ Сарсенбаева К.Б., ²⁾ Оракова М.С.

¹⁾ Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан ²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы. Казахстан

Отработана технология соосаждения покрытий из гафния и углерода с различной концентрацией углерода. При выполнении исследований методом магнетронного осаждения сформированы покрытия гафний-углерод в диапазоне концентраций от 59,8 до 11,2 ат. % углерода. Проведено исследование фазового состава полученных покрытий методом рентгеноструктурного анализа. Определен фазовый состав покрытий в зависимости от концентрации углерода в гафнии.

Введение

В настоящее время развитие аэрокосмической отрасли и потребность во все более высокотемпературных турбинах обусловили поиск новых материалов с высокой температурой плавления [1–5]. В 2015 году появилась работа [6], в которой используя расчеты электронной структуры, проведено исследование системы Hf-Ta-C, которая включает в себя соединения, имеющие самые высокие точки плавления из известных на сегодняшний день. В этой работе были выделены основные химические факторы, которые способствуют высокой температуре плавления. На основании этих факторов был предложен класс материалов, которые могут обладать еще более высокими температурами плавления, а с помощью эффективных расчетов молекулярной динамики определен состав максимизации точки плавления. Было получено, что покрытие из карбида-нитрида гафния с составом 53 ат. % Hf, 27 ат. % С и 20 ат. % N должно обладать температурой плавления около 4500 К.

Применение таких покрытий в турбиностроении позволит повысить рабочую температуру и, тем самым, к.п.д. при выработке электроэнергии [7–8]. Использование покрытий из карбонитрида гафния в космической технике для защиты поверхности ракетного сопла от прогара может позволить поднять температуру и скорость истечения рабочих газов из сопла и, тем самым, увеличить массу поднимаемых на орбиту грузов. Кроме того, покрытия со сверхвысокой температурой плавления необходимы для защиты поверхности гиперзвуковых летательных аппаратов [9].

Образцы и методика эксперимента

В экспериментах использованы йодофазный гафний с содержанием 99,98 мас. % основного элемента и очищенный графит, из которых изготовлены мишени магнетрона диаметром 40 и толщиной 4 мм. При магнетронном распылении в качестве плазмообразующего газа использован аргон, подвергшийся очистке на геттере – распыленном титане.

Методика формирования образцов покрытий заключалась в магнетронном распылении гафния и углерода и их совместном осаждении в виде короткопериодных субслоев толщиной менее 1 нм на перемещающиеся относительно потоков плазмы необогреваемые подложки из поликора (поликристаллического корунда α-Al₂O_{3),} монокристаллического кремния, полированной фольги из нержавеющей стали 12Х18Н10Т и стекла до суммарной толщины пленки 1÷1,5 мкм. Скорость перемещения – $5 \cdot 10^{-2}$ м/с. Напыление осуществляли одновременно с двух оппозитно расположенных магнетронов, пространство между которыми разделено устройством для перемещения подложек. Температура покрытия в процессе формирования не превышала 100 °С. Отжиг образцов проводили в высокотемпературной вакуумной электропечи при давлении 1.10⁻² Па.

Составом покрытия управляли путем изменения соотношения мощностей, подаваемых на распыляющие гафний и графит магнетроны. Состав определяли весовым методом по количеству распыленного и осажденного каждого из элементов во время формирования покрытия. Толщину пленки определяли методом резерфордовского обратного рассеяния протонов на тандемном ускорителе УКП-2-1.

Рентгеноструктурные исследования выполнены на дифрактометре *D8 Advance* фирмы *Bruker* с медным излучением $\lambda_{k\alpha} = 0,154051$ нм с графитовым монохроматором. Значение параметра решетки вычислено как среднее при использовании всех дифракционных линий от данной фазы.

Результаты и их обсуждение

Проведено рентгеноструктурное исследование мишени для определения исходной структуры гафния, по его результатам мишень имеет гексагональную решетку гафния с параметрами а=3,19635 Å и с=5,05107 Å, которая практически совпадает с табличным параметром решетки гафния в соответствии с карточкой СОD №1539076 (рисунок 1).



Рисунок 1. Дифрактограмма мишени гафния

Мощность при распылении выбирается в зависимости от типа распыляемой мишени, но в виду технологических характеристик магнетронного устройства максимальная мощность распыления гафния в среде аргона или аргон-азотной смеси заметно выше, чем у углерода. В связи с этим перед нами стояла задача определения границ распыления гафния по минимальной и средней мощности, при которых будет происходить распыление мишени. Время распыления гафния определялось по требуемой толщине покрытия, и при этом учитывалась низкая скорость распыления углерода. Поэтому необходимости определения максимальной мощности, подаваемой на магнетрон в случае распыления гафния, не было.

В результате нами была определена средняя мощность распыления гафния, которая по выносу вещества соответствовала бы выносу углерода при максимальной возможной мощности. В результате максимально возможная мощность магнетрона с гафнием, при которой будет происходить равноценное по выносу распыление с углеродом, составила 40 Вт.

Для выполнения исследований приготовлены образцы покрытий гафний-углерод в диапазоне концентраций от 59,8 до 5,3 ат. % углерода. В качестве материала подложек использовались поликор и стекло, рентгеноструктурные исследования выполнены на подложках из стекла, ввиду того что оно является рентген аморфным материалом что значительно упрощает идентификацию дифрактограмм.

При формировании покрытия гафний-углерод с концентрацией углерода 59,8 ат. % мощность, подаваемая на магнетрон с гафниевой мишенью, составляла 10 Вт, а на магнетрон с углеродной мишенью 50 Вт.

Толщина единичного слоя металла, сформированного за один оборот барабана, составила для гафния 0,16 нм, а для углерода – 0,09 нм, при этом общая толщина покрытия составила 148 нм. Структурный состав покрытия представлен кубической фазой карбида гафния (согласно карточке №1539502 базы данных COD – Crystallography Open Database) с параметром решетки a=0,4637 нм (рисунок 2-а).

При мощности 12,2 Вт, подаваемой на магнетрон, заряженный гафнием, и мощности 50 Вт на углероде, концентрация углерода в покрытии составила 53,3 ат. % углерода. Толщина единичного слоя гафния составила 0,25 нм, а толщина субслоя углерода составила 0,11 нм, при общей толщине покрытия 331 нм. По результатам рентгеноструктурного анализа (рисунок 2-b) покрытие также представлено кубической фазой карбида гафния с параметром решетки а=0,4633 нм, однако наблюдается рост текстуры покрытия в кристаллографическом направлении (111). При формировании системы гафний-углерод при мощности в канале гафния 15,1 Вт и в канале углерода 50 Вт, было получено покрытие с концентрацией углерода 45,1 ат. %. При этом толщина единичного слоя гафния составила 0,29 нм и единичного углерода 0,09 нм, а общая толщина покрытия составила 344 нм. Рентгеноструктурные исследования образца (рисунок 2-с) показали, что в покрытии образуется кубическая фаза карбида гафния, с параметром решетки *а*=0,4626 нм с более ярко выраженным направлением текстуры (111) и меньшим параметром решетки, по сравнению с покрытием с концентрацией 53,3 ат. %.

При формировании системы гафний-углерод при мощности в канале гафния 18,1 Вт и в канале углерода 50 Вт, было получено покрытие с концентрацией углерода 43,2 ат. %. При этом толщина единичного слоя гафния составила 0,47 нм и единичного субслоя углерода 0,11 нм, а общая толщина покрытия составила 432 нм. По результатам рентгеноструктурных исследований образца (рисунок 2-*d*) выявлено, что в покрытии образуется кубическая фаза карбида гафния, с параметром решетки *a*=0,4623 нм с практически полным преобладанием текстуры в кристаллографическом направлении (111), по сравнению с покрытиями с более высокой концентрацией углерода.



Рисунок 2. Дифрактограммы покрытий Hf-C

На рисунке 2 (f) представлена дифрактограмма покрытия карбида гафния с концентрацией 38,4 ат. % углерода, параметр решетки кубического карбида гафния составил 0,4616 нм. При формировании данного покрытия мощность в каналах гафния и углерода составляла соответственно 22,5 и 50 Вт. Измерение толщины покрытия показало, что она равна 441 нм, при этом толщина единичного слоя гафния составила 0,54 нм. и углерода 0,1 нм.

При формировании системы гафний-углерод при мощности в канале гафния 28,5 Вт и в канале углерода 50 Вт, было получено покрытие с концентрацией углерода 35 ат. %. При этом толщина единичного слоя гафния составила 0,65 нм и единичного углерода 0,1 нм, а общая толщина покрытия составила 441 нм. Рентгеноструктурные исследования образца (рисунок 2-g) показали, что в покрытии образуется кубическая фаза карбида гафния, с параметром решетки *a*=0,4588 нм с более ярко выраженным направлением текстуры (111) и меньшим параметром решетки, по сравнению с покрытием с концентрацией 53,3 ат. %.

Для дальнейшего уменьшения концентрации углерода в покрытии было решено наряду с увеличением мощности в канале гафния, было решено снизить мощность в канале углерода до 32,1 Вт, поскольку дальнейшее увеличение мощности в канале гафния при неизменном значении в канале углерода приведет к существенному увеличению толщины покрытия.

В соответствии с этим в покрытии, сформированном при мощности в канале гафния 75,1 Вт, мощность в канале углерода составила 32,1 Вт, при этом толщина субслоев гафния и углерода составила соответственно 1,69 нм и 0,07 нм, а общая толщина покрытия составила 1,5 мкм. В результате рентгеноструктурных исследований установлено что покрытие с концентрацией 16,2 ат. % представлено гексагональной фазой гафния с параметрами решетки, *a*=0,3166 нм, *c*=0,5262 нм (рисунок 2-*h*). Осаждение гафния и углерода при мощностях 75,1 Вт и 12,8 Вт соответственно, показало, что покрытие формируется чередованием субслоев: гафния – толщиной 1,67 нм и слоя углерода 0,03 нм, при этом общая толщина покрытия составила 1,2 мкм. Проведенный фазовый анализ полученного соединения гафния и углерода, с концентрацией углерода 11,2 ат. %, показал (рисунок 2-к), что покрытие представлено гексагональной фазой гафния с параметрами решетки, *а*=0,3206 нм, *с*=0,5072 нм.



Рисунок 3. Дифрактограмма покрытия Hf-C с концентрацией углерода 20,2 ат. %

Поскольку при проведении исследований по получению покрытий системы гафний-углерод с различной концентрацией углерода, при концентрациях углерода от 59,8 до 26,1 ат. % в образцах происходило формирование кубической фазы карбида гафния, а при переходе от концентрации 26,1 до 16,2 ат. % углерода в покрытии было зафиксировано наличие наряду с гексагональной фазой карбида гафния, фазы чистого гафния с гексагональной решеткой. Нами было решено получить покрытие с концентрацией углерода 20 ат. %.

Основываясь на данных по скорости распыления металла с поверхности мишеней гафния и углерода, было проведено напыление покрытия гафний-углерод, при котором мощность в канале гафния составила 54,7 Вт, а в канале углерода 50 Вт. В результате получено покрытие, концентрация которого, по данным весового метода измерений, составила 20,2 ат. % углерода. Рентгеноструктурные исследования (рисунок 3) показали, что покрытие представлено гексагональной фазой гафния с параметрами решетки *a*=0,3208 нм, *c*=0,5063 нм., соответствующей карточке базы данных СОD №1512510.

Заключение

Таким образом можно сделать вывод, что в системе гафний-углерод, сформированной методом магнетронного осаждения, при концентрациях от 59,8 до 26,1 ат. % углерода в покрытии происходит формирование кубической фазы карбида гафния, с уменьшением параметра решетки. При концентрации 16,2 ат. % углерода, наряду с кубической фазой карбида гафния в покрытии начинает выделятся гафний с гексагональной структурой. При дальнейшем уменьшении концентрации углерода в покрытии гексагональная фаза гафния становится преобладающей.

Работа выполнена при финансовой поддержке грантов МОН РК AR05130933 и AR05130967.

ЛИТЕРАТУРА

- 1. Padture N. P., Gell M., and Jordan E. H., Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications // Science 296, 280 (2002).
- 2. Perepezko J. H., The hotter the engine, the better // Science 326, 1068 (2009).
- 3. Lu K., The future of metals // Science 328, 319 (2010).
- 4. Liu G., Zhang G. J., Jiang F., Ding X. D., Sun Y. J., Sun J., Ma E. Nanostructured high-strength molybdenum alloys with unprecedented tensile ductility // Nat. Mater. 12, 344 (2013).
- Wuchina E., Opila E., Opeka M., Fahrenholtz W., Talmy I. UHTCs: Ultra-high temperature ceramic materials for extreme environment applications // Electrochem. Soc. Interface 16, 30 (2007).
- 6. Hong Q.-J. Prediction of the material with highest known melting point from ab initio molecular dynamics calculations // Physical Review B 92, 020104(R) (2015).
- Marino K. A., Hinnemann B. Carter E. A. Atomic-scale insight and design principles for turbine engine thermal barrier coatings from theory // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS), April 5, 2011, vol. 108, №.14, P. 5480–5487.
- 8. Padture N.P, Gell M, Jordan E.H. Thermal barrier coatings for gas-turbine engine applications. // Science (2002) 296: 280-284.
- 9. Nieto A., Kuma A., Lahiri D., Zhang Ch., Seal S., Agarwal A. Oxidation behavior of graphene nanoplatelet reinforced tantalum carbide composites in high temperature plasma flow // Carbon, 67 (2014), 398–408.

ГАФНИЙ-КӨМІРТЕГІ ЖҮЙЕСІНІҢ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ РЕНТГЕНҚҰРЫЛЫМДЫҚ ТАЛДАУЛАРЫ

¹⁾ Ю.Ж. Тулеушев, ¹⁾ Е.А. Жаканбаев, ¹⁾ Е.Е. Суслов, ²⁾ К.Б. Сарсенбаева, ²⁾ М.С. Оракова

¹⁾ ҚР ЭМ ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан ²⁾ Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Гафнийден көміртегінің концентрациясы әр түрлі болатын жабындарды тұндыру технологиясы жасалды. Магнетронды тұндыру әдісі арқылы зерттеулер жүргізу барысында көміртегінің концентрациясы 59,8 ден 11,2 ат. %-ға дейінгі аралықта болатын гафний-көміртегі жабындары қалыптастырылды. Алынған жабындардың фазалық құрамдарына рентгенқұрылымдық талдау жасалды. Гафнийдегі көміртегі концентрациясына тәуелділігіне қарай жабындардың фазалық құрамдары анықталды.

X-RAY DIFFRACTION STUDIES OF COATINGS OF THE HAFNIUM-CARBON SYSTEM

¹⁾ Y.Z. Tuleushev, ¹⁾ E.A. Zhakanbaev, ¹⁾ E.E Suslov., ²⁾ K.B. Sarsenbayeva, ²⁾ M.S. Orakova

¹⁾ Institute of Nuclear Physics Ministry of Energy RK, Almaty, Kazakhstan ²⁾ Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

The technology of co-precipitation of hafnium and carbon coatings with different concentrations of carbon has been developed. When performing research by the method of magnetron deposition, hafnium-carbon coatings are formed in the concentration range from 59.8 to 11.2 at. % Carbon. The study of the phase composition of the coatings obtained by the method of x-ray analysis. The phase composition of the coatings was determined depending on the concentration of carbon in hafnium.

УДК 621.039.587

ИЗМЕНЕНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ОБЛУЧЕННЫХ НЕЙТРОНАМИ И ЭЛЕКТРОНАМИ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ В ПРОЦЕССАХ МЕХАНИКО-ТЕРМИЧЕСКОЙ РЕЛАКСАЦИИ ВНУТРЕННИХ УПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ

^{1,2)} Максимкин О.П., ¹⁾ Мережко М.С., ¹⁾ Отставнов М.А.

¹⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан ²⁾ НИИЯУ «МИФИ», Москва, Россия

Исследовано влияние облучения нейтронами или электронами, а также температурного воздействия на процессы релаксации напряжений в аустенитных хромоникелевых сталях. Обнаружен эффект роста содержания ферромагнитной фазы в облученных образцах, деформированных при криогенных температурах и отожженных в области температуры 400 °C.

Введение

Ранее было установлено, что при проведении механических испытаний, в ходе разгрузки образца из метастабильной нержавеющей аустенитной стали 12X18H10T, деформированного путем растяжения до момента образования в нем шейки, регистрируется возрастание намагниченности стали [1]. Это, вероятнее всего, связано с увеличением количества ферромагнитной α -фазы (M_f), образующейся в результате мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода в процессе низкотемпературной деформации. Наряду с тем эффект изменения магнитных свойств наблюдался при отжиге в районе температур 400–450 °С облученных или/и деформированных стальных образцов во всех случаях, когда отжигали:

сталь 12Х18Н10Т, предварительно деформированную растяжением при низких (от -100 до -146 °C) температурах [2] или облученную нейтронами, а затем деформированную при отрицательных температурах (-20, -60 °C) [3];

 сталь 12Х18Н10Т, облученную нейтронами до высоких флюенсов, а затем деформированную при комнатной температуре [4];

 сталь X16H15M3Б [5], облученную нейтронами до высоких флюенсов, содержащую α-фазу;

– стальные образцы, облученные α-частицами «на прострел» и после имплантации гелия [5].

Эффект прироста M_f наблюдали также в работе [6] после прокатки и отжига хромоникелевых аустенитных сталей, легированных скандием. Установлено, что увеличение количества мартенситной α-фазы сопровождается приростом микротвердости при этих же температурах отжига, а также увеличением значений электросопротивления и тепловыделения, изменением геометрических размеров (дилатометрия) [7, 8].

В настоящей статье предпринята попытка показать, что природа явления прироста намагниченности при термическом и механическом воздействии на пластически деформированные или облученные реакторные стали одинакова и связана, вероятнее всего, с изменением величин внутренних напряжений сжатия.

ИССЛЕДУЕМЫЕ МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ

В качестве объектов изучения были выбраны две аустенитные хромоникелевые коррозионностойкие стали типа 18-9 и 18-10, несколько различающиеся величиной энергии дефекта упаковки, химический состав которых приведен в таблице 1.

Таблица	1.	Химический	состав	исследуемых	сталей
		(вес %)		

Элемент Материал	Fe	Ni	Cr	С	Ti	Mn	Прочие
X18H9T	основа	8–9	18,00	0,12	0,5	<2	P – 0,035; S – 0,02; Si – 0,8
12X18H10T	основа	10,7	17,00	0,12	0,5	1,67	P – 0,03; S – 0,013; Si – 0,34

Эксперименты проводили с использованием образцов двух типоразмеров: цилиндрического (\emptyset 1,7×10 мм) и плоского (0,35×3,5×10 мм), подвергнутых аустенизирующим термообработкам 1050 °C 30 мин и 1150 °C 4 ч., соответственно.

Термообработанные образцы облучали в активной зоне ядерного реактора ВВР-К при температуре < 80 °C флюенсом нейтронов 1,3 $\cdot 10^{19}$ н/см² и стационарным потоком электронов с энергией 4 МэВ в ускорителе ЭЛУ-4 до флюенса 5·10¹⁸ эл/см². Кроме того в экспериментах использовали стальные (12Х18Н10Т) образцы, вырезанные из стенок чехлов отработавших тепловыделяющих сборок реактора на быстрых нейтронах БН-350, облученных до 50 сна. Необлученные и облученные образцы подвергали механическим испытаниям «на растяжение» при комнатной температуре со скоростью деформирования 0,5 мм/мин. Количество образующейся ферромагнитной фазы в деформированных и высокооблученных образцах определяли с помощью феррозонда Feritscope MP30. Изохронные и изотермические отжиги стальных образцов проводили в электрической печи СУОЛ-044 2М2.



Рисунок 1. Диаграммы растяжения (3, 4) и кривые изменения количества ферромагнитной фазы, измеренные под нагрузкой (1) и в разгруженном состоянии (2) образца

Экспериментальные результаты

С целью изучения влияния упругих напряжений на намагниченность аустенитной стали, склонной к $\gamma \rightarrow \alpha$ превращениям при деформации, исследовали изменения магнитных свойств цилиндрических образцов стали 12Х18Н10Т, необлученных, деформируемых при 20 °С. Показания феррозонда регистрировали для нагруженного и разгруженного состояний образца, через каждые 5 % деформаций. Инженерную диаграмму растяжения (рисунок 1, кривая 3) перестраивали в «истинную» (кривая 4) с учетом величин локальных деформаций, определенных с применением методики цифровой экстензометрии [9].

Из рисунка 1 следует, что после разгрузки деформированного образца количество ферромагнитной фазы в нем возрастает на величину $\Delta M_{\rm fi}$. С ростом степени деформирования стали значения $\Delta M_{\rm fi}$ увеличиваются. Этот эффект хорошо заметен на графике зависимости $\Delta M_{\rm f}$ от величины «истинного» напряжения (рисунок 2) особенно на стадии развития шейки.



Рисунок 2. Зависимость величины прироста ферромагнитной фазы при разгрузке от «истинной» величины действующего напряжения

Экспериментально установлено, что рост намагниченности при разгрузке происходит неоднородно по всей деформированной длине образца. Больше всего прирост M_f заметен в шейке и ее окрестностях шириной ~3000 мкм; с эффектом роста M_f связано увеличение твердости стали именно в области шейки (рисунок 3).



Рисунок 3. Распределение ферромагнитной фазы (-=-) и микротвердости (-•-) по длине деформированного образца стали 12X18H10T

Аналогичный эффект прироста количества ферромагнитной α -фазы (ΔM_f) наблюдали также при разгрузке предварительно пластически деформированных растяжением образцов метастабильной аустенитной стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами. Показано, что величина ΔM_f зависит от степени деформации ϵ и, соответственно, от действующих напряжений σ . На рисунке 4 представлены результаты экспериментов по изучению влияния внешних напряжений на ΔM_f для необлученных и облученных нейтронами ($3 \cdot 10^{19}$ н/см²) деформируемых стальных образцов.



необлученный образец стали 12Х18Н10Т;
образец, облученный нейтронами до флюенса 1,3·10¹⁹ н/см².

Рисунок 4. Кривые накопления мартенситной α-фазы в деформируемых растяжением при 20 °C стальных образцах, построенные в координатах: (а) количество мартенситной фазы – «истинные» напряжения; (б) количество мартенситной фазы – «истинные» локальные деформации

Получены следующие значения критических значений напряжений ($\sigma_{\kappa p}$) и «истинных» деформаций ($\varepsilon_{\kappa p}$), при которых начиналось образование мартенситной α -фазы в деформируемых образцах: $\sigma_{\kappa p}$ =800 МПа, $\varepsilon_{\kappa p}$ =20 % для необлученной (1050 °C, 30 мин) стали, $\sigma_{\kappa p}$ =860 МПа, $\varepsilon_{\kappa p}$ =15 % для стали 12Х18Н10Т, облученной нейтронами. В этих экспериментах после каждого растяжения до определенной степени деформации (напряжения) образец разгружали и фиксировали количество ферромагнитной α -фазы в области шейки под нагрузкой и без нагрузки. Результаты приведены на рисунке 5.

Анализ полученных данных показал, в частности, что экспериментальные кривые ($\Delta M_f = f(\sigma)$) для обоих случаев (необлученная и облученная сталь) имеют максимумы при напряжении $\sigma = 1030$ МПа, которое согласно литературным данным [10], соответствует образованию стационарной шейки в холоднодеформируемых аустенитных хромоникелевых сталях.

Наряду с тем обнаружен эффект возрастания намагниченности (содержания α-фазы) и микротвердости Н_µ при отжиге в интервале температур 400– 550 °C облученных нейтронами и деформированных стальных образцов (см. рисунок 6 и таблицу 2).



1 – необлученный образец; 2 – облученный до флюенса 1,3·10¹⁹ н/см².



Самый большой прирост микротвердости после отжига (470 °C) отмечен в стали X18H10T, деформированной при -100 °C, причем эффект упрочнения в необлученном материале больше, чем в облученном. Самый маленький прирост твердости после отжигов наблюдали в необлученной стали, деформированной при 20 °C. Такое же незначительное повышение твердости отмечено в стали 12X18H9, облученной нейтронами флюенсом 8,8·10¹⁸ н/см², деформированной при -100 °C.

Что касается ферромагнитной α -фазы, то наибольший относительный прирост M_f при отжиге наблюдался для случая растяжения стали 12X18H10T, облученной (1,9·10²⁰ н/см²) и деформированной при –100 °C.

Сопоставляя результаты отжиговых изменений твердости и намагниченности можно предположить, что вероятно, эффект дополнительного упрочнения связан с изменением напряженного состояния и образованием в γ-решетке дополнительного количества более твердой α-фазы.



б)

Рисунок 6. Эффект относительного прироста микротвердости (а) и магнитной фазы (б) при отжиге стали 12X18H10T, облученной нейтронами [11]

Таблица 2. Увеличение твердости и намагниченности деформированных сталей при отжиге в интервале температур 400–550 ℃

Nº	Сталь, Т _{исл} , состояние	Относительный прирост микротвердости	Относительный прирост М _f
1	Х18Н10 Т _{исп} =−100 °C, необл.	$\frac{502 - 348}{548} = 44\%$	$\frac{14,8-13,4}{13,4} = 10\%$
2	Х18Н10 Т _{исп} =−100 °С, обл., 1,9·10 ²⁰ н/см ²	$\frac{480 - 348}{348} = 38\%$	$\frac{11-9,5}{9,5} = 15\%$
3	Х18Н9 Т _{исп} =−100 °C, обл., 8,8·10 ¹⁸ н/см²	$\frac{450 - 390}{390} = 15\%$	$\frac{12,5-11,8}{11,8} = 5\%$
4	Тисп=20 °С, необл.	$\frac{348 - 300}{300} = 16\%$	0

Из рисунка 6 видно, что больше всего α -фазы при деформации образовалось в необлученной стали, деформированной при отрицательной температуре (–100 °C). Это привело к релаксации внутренних напряжений и поэтому эффект относительного прироста α -фазы, связанный с уменьшением напряжений сжатия, при отжиге оказался небольшим (см. таблицу 2, №1).

Особенности распределения магнитной фазы по длине деформированного образца стали X18H9, облученного электронами.

Экспериментально исследованы эффекты увеличения количества ферромагнитной фазы в образцах стали X18H9, (необлученных и облученных электронами 4 МэВ, $5 \cdot 10^{18}$ эл/см²) деформированных до предела прочности, (v=0,5 мм/мин) а затем полностью разгруженных при комнатной температуре. В этих экспериментах величина радиационного упрочнения составляла 10%, при практически одинаковой пластичности ~60 %.

Обработка кривых распределения α-фазы по длине стальных (X18H9) образцов в нагруженном и разгруженном состояниях показала, что во всех случаях (различная термообработка, облучение) при разгрузке количество ферромагнитной фазы по всей длине деформированного образца больше, чем в нагруженном состоянии (рисунок 7).





№ образца	Состояние стали	Термообработка, °С	Местоположение максимума	∆М։/М₅, отношение максимального количества феррофазы к минимальному
Nº1	необлуч.	1050	Шейка (Ш)	0,3:0,18:0,19
№55	необлуч.	1050	Шейка (Ш)	0,45:0,24 0,56:0,18
Nº16	облуч.	1050	Шейка (Ш)	0,5:0,48:0,3
Nº34	облуч.	1050	П (Ш)	0,4:0,4:0,4
№25	облуч.	1050	П (Ш)	0,43:0,37 0,9:0,37
Nº33	необлуч.	1150	Периферия (П)	0,48:0,43:0,34
Nº66	облуч.	1150	Шейка (Ш)	0,3:0,25

Таблица 3. Величины относительного прироста ферромагнитной фазы (ΔМ_f/M_f) в области шейки (Ш) и на периферии (П) образца стали X18H9, необлученной и облученной электронами.

В то же время относительное повышение намагниченности в некоторых случаях наблюдалось больше в шейке (Ш), тогда как в 4-х других случаях количество ферромагнитной фазы оказалось больше на периферии (П) (т.е. в областях вне шейки, но близких к ней (см. таблицу 3).

Если предположить, что повышение содержания α -фазы в данном участке образца связано с релаксацией напряжения сжатия (σ), то надо думать, что величина σ – больше в шейке (в тех случаях когда $\left(\frac{\Delta M_f}{M_f}\right)$ Ш > $\left(\frac{\Delta M_f}{M_f}\right)$ П). В то же время если напряжения сжатия были больше на периферии, тогда $\left(\frac{\Delta M_f}{M_f}\right)$ П > $\left(\frac{\Delta M_f}{M_f}\right)$ Ш.

Явное различие величин $\left(\frac{\Delta M_f}{M_f}\right)$ Ш и $\left(\frac{\Delta M_f}{M_f}\right)$ П наблюдали при растяжении образцов №1, №55, №25. Таким образом, в некоторых случаях самые большие напряжения сжатия сосредоточены не в центре шейки, а по ее краям. Значит прирост α -фазы в результате релаксации этих напряжений (при отжиге или при разгрузке) будет больше именно для этих участков.

Обсуждение результатов

Полученные результаты можно попытаться объяснить следующим образом. При растяжении образца (σ⁺) в какой-то момент (по достижению напряжения σ_{лок}) в нем начинает образовываться стационарная шейка. Этому моменту соответствует изменение напряженного состояния кристаллической решетки в этом участке: наряду с растягивающими (σ^+) начинают действовать напряжения сжатия (σ⁻). Если остановить растяжение и начать разгружение образца, то будут уменьшаться как напряжения растяжения, так и напряжения сжатия. Поскольку напряжения сжатия препятствуют образованию α-фазы (имеющей больший удельный объем по сравнению с ү-фазой), то их уменьшение приводит к росту М_f и этот рост будет продолжаться до того момента, пока полностью исчезнет составляющая σ⁻. Заметим, что шейка как в необлученном так и в облученном нейтронами образце зарождается при одном и том же напряжении $\sigma_{\text{лок}} \approx$

1030 МПа, но если перестроить кривую « $\Delta M_f = f(\sigma)$ » в « $\Delta M_f = f(\epsilon)$ », то оказывается (см. рисунок 4), что шейка в облученном образце появляется при меньшей деформации, чем в необлученном.

Согласно [12] при электронно-лучевой обработке образца в зоне воздействия пучка происходит интенсивное объемное расширение металла, которому препятствуют более холодные окружающие области, что приводит к развитию сжимающих упругих напряжений в зоне воздействия. Показано, что в осевой зоне воздействия электронного пучка превалируют сжимающие, а на периферийных участках, в зоне термического влияния – растягивающие напряжения.

Таким образом, результаты экспериментов по упругому «мартенситному переходу» можно увязать с результатами экспериментов по изучению локализации деформации.

На основании анализа ранее полученных результатов было высказано предположение, что описанные выше эффекты увеличения количества ферромагнитной α -фазы обусловлены релаксацией напряжений сжатия, аналогично тому, как это происходит при отжиге и изложено, например, в работе [5]. В ней установлено, что при отжиге в районе температуры 400°С холоднодеформированных или облученных нейтронами стальных образцов наблюдаются эффекты возрастания намагниченности (M_f) и микротвердости ($H\mu$), обусловленные увеличением количества мартенситной фазы, образовавшейся в результате фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в процессах холодной деформации или облучения.

В общем случае, одним из основных результатов радиационного и термического воздействий на конструкционные реакторные стали является формирование полей внутренних напряжений и их релаксация, оказывающих значительное влияние на структуру и эксплуатационные свойства материалов. С учетом анизотропии свойств металлических поликристаллитов следует различать внутренние напряжения, действующие в центральной части зерен и в приграничных зонах после различных внешних воздействий. Например, в случае анализа результатов комплексных экспериментов по изучению структурнофазовых изменений в процессе механических испытаний, проведенных при криогенных температурах образцов аустенитной стали, облученной нейтронами, целесообразно рассматривать напряжения, образующиеся отдельно на каждом из ниже следующих 4-х этапов эксперимента.

Этап 1. Аустенизация – предварительная термообработка, включающая в себя нагрев и резкое охлаждение металла. В результате в центре зерна могут возникать и накапливаются напряжения сжатия (σ), в то время как в приграничной области формируются напряжения растяжения (σ ⁺_T).

Этап 2. Облучение нейтронами – образование высокой концентрации вакансий в решетке приводит к возникновению и накоплению напряжений растяжения в центральных частях зерен и сжимающих напряжений в приграничных областях. В зависимости от дозы облучения эти напряжения могут быть меньше или больше, чем образовавшиеся в результате термообработки (аустенизации).

Этап 3. Охлаждение до криогенных температур перед проведением механических испытаний. При охлаждении зерна сжимаются, но из-за анизотропии свойств неодинаковое термическое сжатие приведет к образованию в межзеренных областях напряжений растяжения $\sigma^+_{\rm охл}$.

Этап 4. Растяжение при криогенных температурах еще больше увеличивает напряжения растяжения.

Таким образом, изменяя условия термообработки, облучения и температуры испытания мы можем изменять напряженное состояние поликристалла, влиять на кинетику $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода и параметры деформационного упрочнения и управлять таким образом механическими свойствами (пластичность) а значит работоспособностью облученного материала и конструкций из него.

Литература

- 1. Максимкин, О.П., Цай, К.В. Магнитометрическое исследование особенностей мартенситного γ→α превращения в облученной нейтронами стали 12Х18Н10Т/ О.П. Максимкин, К.В. Цай // Металлы. 2008. №5. С. 39–47.
- Чухлеб, А.Н., Мартынов, В.П. Фазовые γ→α превращения при старении в сталях типа 18-8 предварительно деформированных при отрицательной температуре/ А.Н. Чухлеб, В.П. Мартынов // Физика металлов и металловедение. 1960. т.10. №2. С. 240–244.
- Рубан, С.В., Максимкин, О.П. Изменение физико-механических свойств аустенитной хромоникелевой нержавеющей стали X18H9, облучённой нейтронами и деформируемой при отрицательных температурах / С.В. Рубан, О.П. Максимкин // Вестник НЯЦ РК. – 2015. – Вып 1. – С. 5–9.
- Максимкин, О.П., Мережко, М.С., Рубан, С.В. Некоторые особенности обратного мартенситного превращения в стали 12Х18Н10Т, облученной до высоких повреждающих доз в реакторе БН-350/ О.П. Максимкин, М.С. Мережко, С.В. Рубан // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – №2. – С. 109–112.
- Рахашев, Б.К. Исследование обратного мартенситного α→γ превращения в облученных высокоэнергетическими частицами деформированных нержавеющих сталях 12Х18Н10Т и 08Х16Н11М3: автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. / Б.К. Рахашев. – Алматы: 2010. – 20 с.
- Неклюдов, И.М., Нетесов, В.М. О некоторых возможных путях влияния на фазовый состав, структуру и свойства аустенитных сталей / И.М. Неклюдов, В.М. Нетесов // Вопросы атомной науки и техники серия. Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение 2005. - №5(88). – С. 164–167.
- Максимкин, О.П., Нургали, Е.Е. Изменения электросопротивления и намагниченности необлученной и облученной нейтронами стали Х18Н9 в процессах деформации и отжига/ О.П. Максимкин, Е.Е. Нургали // Вестник НЯЦ РК. – 2018.
 - №1. – С. 61–68.
- Максимкин, О.П., Рахашев, Б.К. Тепловые и магнитные эффекты при отжиге пластически деформированной облученной нейтронами нержавеющей стали 12X18H10T / О.П. Максимкин, Б.К. Рахашев // Известия МОН РК, сер. Физико-математическая. – 2009. – 2(264). – С. 26–30.
- Maksimkin O.P., Gusev M.N., Osipov I.S., Garner F. Application of Digital Marker Extensionetry to determine the true Stress-Strain Behavior of irradiated Metals and alloys / O.P. Maksimkin, M.N. Gusev, I.S. Osipov, F. Garner // Small specimen test Techniques 5-th v. ASTM special Technical Publication v.5, N 4, p. 79-92, W. Conshohocken, 2009.
- 10. Byun T.S., Farrel K. Plastic instability in polycrystalline metals after low temperature irradiation/ T.S. Byun, K. Farrel // Acta Materialia 52(2004)/ pp. 1597–1608.
- Рофман, О.В., Цай, К.В., Максимкин, О.П., Гарнер Ф.А. Влияние облучения и деформации на фазовые превращения в реакторных хромоникелевых сталях / О.В. Рофман, К.В. Цай, О.П. Максимкин // Вестник НЯЦ РК. – 2016. – №1. – С. 66–72.
- 12. Поздняков, В.А., Александрова, Н.М. Поля температур и термоупругих напряжений/ В.А. Поздняков, Н.М. Александрова // Физика и химия обработки материалов. 2004. №5. С. 61–66.

ІШКІ ЭЛАСТИКАЛЫҚ СИПАТТАМАЛАРДЫ МЕХАНИКАЛЫҚ ЖӘНЕ ЕҢ ЖОҒАЛҒАН РЕЛИКСАЦИЯЛАРДЫҢ МАҢҒЫНЫҢ НЕЙТРОНДАРЫ ЖӘНЕ АСТЕНИТИКАЛЫҚ ЖҮРГІЗУ ЭЛЕКТРАЛАРЫНЫҢ МАҢНАТИКАЛЫҚ ҚЫЗМЕТІНІҢ ӨЗГЕРУІ

1,2) О.П. Максимкин, ¹⁾ М.С. Мережко, ¹⁾ М.А. Отставнов

¹⁾ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан ²⁾ «МИФИ» ұлттық ядролық зерттеу университеті, Мәскеу, Ресей

Аустениттік никель-хромдық болаттардағы кернеу релаксациялық процестеріне нейтронды және электронды сәулелену ықпалы және де температуралық әсерлері зерттелінді. Криогенді температураларда деформацияланған және 400 °C температура диапазонында жанған, сәулеленген үлгілердегі ферромагниттік фазаның көлемінің өсу эффектісі анықталды.

CHANGE OF MAGNETIC PROPERTIES OF IRRADIATED NEUTRONS AND ELECTRONS OF AUSTENITIC STEELS IN THE PROCESSES OF MECHANICAL AND TERM RELAXATION OF INTERNAL ELASTIC STRESSES

^{1,2)} O.P. Maksimkin, ¹⁾ M.S. Merejko, ¹⁾ M.A.Otstavnov

¹⁾ Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan ²⁾ National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia

The effect of irradiation with neutrons and electrons, as well as temperature effects on stress relaxation processes in austenitic nickel-chromium steels has been investigated. The effect of an increase in the content of the ferromagnetic phase in irradiated samples deformed at cryogenic temperatures and annealed in the temperature range of 400 °C was found.
КОМПЛЕКСНОЕ ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, МЕХАНИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ И ЭЛЕКТРОННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ЛИНЕЙНЫХ ПОЛИМЕРОВ

¹⁾ Воронова Н.А., ^{1,2)} Купчишин А.И., ¹⁾ Ниязов М.Н., ¹⁾ Кирдяшкин В.И.

¹⁾ Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан ²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Проведены комплексные экспериментальные исследования по влиянию температуры, статической нагрузки и электронного облучения на термомеханические свойства политетрафторэтиленового материала. Полученные данные зависимости ε от t подтверждает наличие фазовых переходов в данной пленке. Облучение существенно влияет на зависимости ε (t) и ε (σ). Политетрафторэтиленовый материал после облучения электронами теряет пластичность, существенно уменьшается деформация (по сравнению с необлученным материалом) на ~170 %, что связано с деструкцией всех цепей. Экспериментальная зависимость ε от σ как для необлученного, так и для облученного материала удовлетворительно описывается в рамках каскадно-вероятностной модели.

Введение

Широкое применение полимерных материалов и композитов на их основе в различных отраслях науки и техники объясняется наличием у них определенного комплекса свойств, которыми не обладает значительная часть традиционных материалов. Одной из важнейших характеристик при этом является сохранение высокой механической прочности при внешних воздействиях [1–5]. Использование полимеров в промышленности способствует выявлению противоречий между ценой и свойствами, так как конкуренция по производству качественной продукции достаточно высокая. После того как механика композитных материалов нашла широкое применение и начала бурное развитие, ее основной целью стала модификация материалов и улучшение их механических свойств. Применение полимеров в жестких промышленных условиях, когда одновременно изменяется как механическая нагрузка, так и температура, предопределяет наличие у них необходимого комплекса термомеханических характеристик [6, 8]. Среди всех полимерных материалов политетрафторэтилен обладает довольно хорошими свойствами. Он имеет высокую точку плавления, а плотно упакованные линейные цепи, придают ему жесткость при повышенных температурах [9, 10].

В данной работе проведены экспериментальные исследования по влиянию температуры, статической нагрузки и электронного облучения на деформацию необлученного и облученного политетрафторэтилена.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ КАМЕРА И МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Для проведения экспериментов по комплексному воздействию температуры, нагрузки и облучения нами была разработана и изготовлена соответствующая экспериментальная установка. Ее схема приведена на рисунке 1. Установка состоит из следующих блоков: стойка, основание, экспериментальная камера, держатели, зажимы, исследуемый образец, термоэлектронный нагреватель (ТЭН), датчик температуры, статистическая нагрузка, датчик измерения длины образца. Нагреватель представляет собой У-образную трубку из нержавеющей стали с малой теплоемкостью, внутри которой расположена проволочная спираль с большим удельным сопротивлением. ТЭН отделен от каркаса теплоизолятором. Для измерения температуры (t) был применен игольчатый-электронный термометр. Для измерения длины образца использован специальный датчик перемещения тела, разработанный фирмой Science Cube.





Рисунок 1. Схема экспериментальной установки

В качестве исследуемого материала был выбран промышленный политетрафторэтилен толщиной 100 мкм. Пленочные образцы нарезались с помощью специального устройства. Длина испытываемого материала составляла 7 см, рабочая часть 5 см (2 см полимерного образца закреплялось в зажимах), ширина 0,5 см. Данная пленка подвергалась одноосному растяжению при постоянной статической нагрузке.

Облучение образцов проводились на линейном ускорителе электронов ЭЛУ-6 с энергией 2 МэВ в воздушной среде. Доза составляла 5 кГр. Пленочные образцы облучались в течение трех минут на расстоянии 40 см. от выходного окна ускорителя. Высота закрепления образцов во время облучения совпадала с центром выходного окна и равнялась 30 см. При проведении работ температура образцов равнялась 23 °C, а относительная влажность – 55 %.

Предварительно с помощью специальных грузов определялась предельная нагрузка, при которой наступает разрыв испытуемого полимера. Для данного эксперимента напряжение составляло 35–38 МПа. Затем рассчитывалось напряжение, составляющее определенную часть от предельного напряжения. Следующим этапом являлась фиксация деформации при комнатной температуре для данной нагрузки. При проведении эксперимента нагрузка не менялась. После закрепления образец помещался в камеру и включался термоэлектронный нагреватель. Далее определялись все необходимые параметры.

Обсуждение результатов

Проведены экспериментальные работы по исследованию зависимости деформации от температуры при различных значениях напряжения: $\sigma_1 = 9$; $\sigma_2 = 11$ и $\sigma_3 = 13$ МПа. Испытания проводились при температурах в интервале 23–120 °C.

В результате проведения ряда экспериментов (см. таблицу), было обнаружено, что фторопласт ведет себя по-разному на разных этапах нагревания. При приложении большого напряжения происходят разрушающие процессы, идущие в нескольких стадиях: І. Выпрямление свободных полимерных цепей (23 °C); II. Выпрямление связанных цепей (23-35 °C); III. Катастрофическое разрушение (35-45 °C); IV. Разрушение цепей с сильными связями (45-120 °C). При приложении нагрузки и комнатной температуры происходит резкое удлинение исследуемых образцов. Причиной такого поведения материала является выпрямление макромолекул, которые представляют собой закрученные комплексы. Далее в интервале 23-35 °С наблюдается небольшое увеличение относительного удлинения, что связано с выпрямлением жестко связанных цепей. В интервале 35-45 °С происходит катастрофическое разрушение слабых цепей, в том числе связанный с наличием фазовых переходов. При t > 40 °С имеется тенденция постепенного выхода деформации на насыщение. Это связано с разрывом жестких, более прочных цепей. Максимальная деформация при t = 85 °C и σ = 13 МПа достигает 450 %.

Далее снималась экспериментальная зависимость ε от σ как для необлученного (кривая 1) так и для облученного (кривая 2) дозой 5 кГр фторопласта (рисунок 2). Из рисунка следует, что с ростом напряжения до σ ~18 МПа деформация сначала медленно увеличивается, а затем резко растет по экспоненциальному закону. Здесь же приведена расчетная кривая, вычисленная в рамках каскадно-вероятностной модели [7] по формуле: $\varepsilon = \exp(\sigma/\sigma_0) - 1$. Таблица. Зависимость деформации необлученного политетрафторэтилена от температуры при разных статических нагрузках $\sigma I = 9$; $\sigma 2 = 11 u \sigma 3 = 13 M\Pi a$



Рисунок 2. Зависимость деформации от напряжения для необлученного (левая и нижняя оси, кривая 1) и облученного (правая и верхняя оси, кривая 2) политетрафторэтиленового материала





Для данного эксперимента у необлученного материала $\sigma_0 = 26$ МПа. Видно удовлетворительное согласие экспериментальных данных с расчетом. Аналогичная зависимость приведена для облученного фторопласта, причем $\sigma_0 = 13$ МПа. После облучения дозой 5 кГр, образцы материала теряют пластичность и

начинают рваться при меньшей деформации, чем до облучения. При этом наблюдается уменьшение относительного удлинения по сравнению с необлученным материалом (рисунок 2), а прочность, при этом, не претерпевает значительных изменений.

Термомеханические кривые облученного фторопласта по сравнению с необлученным, показанные на рисунке 3, существенно отличаются. Ввиду своей радиационной нестойкостьи и происходящей деструкцией, облученный материал рвется при деформации в 9 раз меньшей, чем у необлученных образцов. При подвешивании грузов, которые дают напряжение больше 9 МПа, облученные образцы разрушаются сразу.

Выводы

1. Проведены экспериментальные исследования зависимости деформации ε от температуры t при различных напряжениях $\sigma_1 = 9$ МПа, $\sigma_2 = 11$ МПа, $\sigma_3 = 13$ МПа в политетрафторэтилене. Обнаружено, что в интервале температур 23–30 °C ε изменяется

Литература

- 1. Паншин Ю.А., Малкевич С.Г., Дунаевская Ц.С. Фторопласты. Л.: Химия. 1978, 228 с.
- 2. Фторполимеры. Под ред. Л. Уолла. Пер. с англ. Под ред. И.Л. Кнунянца, В.А.
- 3. Пономаренко. М.: Мир, 1975, 448 с.
- Пикаев А.К. Современная радиационная химия. Твердое тело и полимеры. Прикладные аспекты. М.: Наука, 1987, 448 с.
 Ivchenko V.A. Atomic structure of cascades of atomic displacements in metals and alloys after different types of radiation// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110 012003. 2016. Р. 1–5.
- Surzhikov A.P., Galtseva O.V., Vasendina E.A., Vlasov V.A., Nikolaev E.V. Processing line for industrial radiation-thermal synthesis of doped lithium ferrite powders// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110 012002. – 2016. – P. 1–4.
- Упшенко от сореа папаш тегите powders/ тог сот. series. маterials science and Engineering 110 012002. 2010. Р.
 Радиационная стойкость органических материалов. Справочник. Под ред. В.К. Милинчука, В.И. Тупикова. М.: Энергоатомиздат, 1986, 171 с.
- Kupchishin A. I., Taipova B. G., Kupchishin A. A., Voronova N. A., Kirdyashkin V. I., Fursa T.V. Catastrophic models of materials destruction// IOP Conf. Series: Material Science and Engineering. 110. 012037. – 2016. – P. 1–5.
- Kupchishin A. I., Kupchishin A. A., Voronova N. A., Kirdyashkin V. I., Gyngazov V.A. Computer simulation radiation damages in condensed matters// IOP Conf. Series: Material Science and Engineering. 110. 012039. – 2016. – P. 1–4.
- Истомин Н.П., Семенов А.П. Антифрикционные свойства композиционных материалов на основе фторполимеров. М.: Наука, 1981, 460 с.
- Машков Ю.К., Овчар З.Н., Суриков В.И., Калистратова Л.Ф. Композиционные материалы на основе политетрафторэтилена. М.: Машиностроение, 2005, 239 с.

СЫЗЫҚТЫҚ ПОЛИМЕРДІҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТІНЕ МЕХАНИКАЛЫҚ ЖҮКТІҢ, Электронды сәулелендіру және температураның комплекстік әсері

¹⁾ Н.А. Воронова, ^{1,2)} А.И. Купчишин, ¹⁾ М.Н. Ниязов, ¹⁾ В.И. Кирдяшкин

¹⁾ Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан
²⁾ Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

Политетрафторэтиленді материалдың термомеханикалық қасиетіне электронды сәулелендіру, статикалық жүктің және температураның әсерін зерттеу үшін комплексті эксперименттер жүргізілді. Зерттеу барысында алынған мәліметтер є t–дан тәуелділігі, осы пленкада фазалық ауысудың болуын растайды. Сәулелендіру є(t) және є(σ) тәуелділігіне айтарлықтай әсер етеді. Политетрафторэтиленді материал электрондармен сәулелендіруден кейн икемділікті жоғалтады, ~170 %-ға деформация айтарлықтай азаяды (сәулеленбеген материалмен салыстырғанда), бұл барлық тізбектердің бұзылуымен байланысты. Сәулелендірілмеген және де сәулелендірілген материалға є-нің σ-дан тәжірибелік тәуелділігі каскадты-ықтималдық модель шеңберінде қанағаттанарлық сипатталған.

незначительно. Далее при t = 30-55 °C происходит существенное удлинение исследуемых образцов. При t > 55 °C рост удлинения замедляется. Наибольшая деформация составляет ~450 % при t = 85 °C и $\sigma = 13$ МПа.

2. Ввиду своей радиационной нестойкости и происходящей деструкции, облученный материал при термомеханических испытаниях рвется при деформации в 9 раз меньшей, чем у необлученных образцов.

3. Облучение образцов политетрафторэтилена приводит к потере пластичности, существенному уменьшению деформации (по сравнению с необлученным материалом) на ~170 %, что связано с деструкцией всех цепей полимера.

 Экспериментальная зависимость ε от σ как для необлученного, так и для облученного материала удовлетворительно описывается в рамках каскадновероятностной модели.

INTEGRATED IMPACT OF TEMPERATURE, MECHANICAL STRESS AND ELECTRON RADIATION ON THE MECHANICAL PROPERTIES OF LINEAR POLYMERS

¹⁾ N.A. Voronova, ^{1,2)} A.I. Kupchishin, ¹⁾ M.N. Niyazov, ¹⁾ I.V. Kirdyashkin

¹⁾ Kazakh National Pedagogical University by Abay, Almaty, Kazakhstan ²⁾ Kazakh National University by al-Farabi, Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan

Complex experimental studies on the effect of temperature, static load and electron irradiation on the thermomechanical properties of polytetrafluoroethylene material were carried out. The obtained data of the dependence ε on t confirms the presence of phase transitions in this film. Irradiation significantly affects the dependences $\varepsilon(t)$ and $\varepsilon(\sigma)$. Polytetrafluoroethylene material loses plasticity after electron irradiation, deformation (compared to non-irradiated material) by ~170 %, which is associated with the destruction of all chains. The experimental dependence ε on σ for both non-irradiated material is satisfactorily described in the cascade-probabilistic model.

ОПТИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НЕОБЛУЧЕННЫХ, ЗАГРЯЗНЕННЫХ И ОБЛУЧЕННЫХ БИОМАТЕРИАЛОВ

^{1,2)} Купчишин А.И., ¹⁾ Есырев О.В., ¹⁾ Ходарина Н.Н., ¹⁾ Таипова Б.Г., ¹⁾ Зубарева Т.И.

¹⁾ Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан ²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Были исследованы оптические свойства необлученных и облученных ряда биоматериалов озера-накопителя Сорбулак. Образцы изготовлены из биоматериалов озера Сорбулак (загрязненные) и растущих около близлежащей проточной реки (незагрязненные). Изучение оптических свойств и структуры облученных и необлученных образцов камыша, осоки на отражение и просвет проводилось на автоматизированном цифровом микроскопе (АЦМ) типа *Leica DM6000M*. Экспериментальные образцы готовились в виде трубок (нарезанных из стеблей) и листьев. Доза электронного облучения равна 50–500 кГр.

Анализ полученных данных показал, что одновременное загрязнение и электронное облучение образцов биоматериала приводит к размытию полос материала, что связано с накоплением тяжелых металлов и генерацией устойчивых радиационных дефектов типа пары Френкеля и пары электрон – ион, которые в последующем приводят к разрушению клеток и к деструкции биоматериала.

Введение

Проблемы загрязнения водоемов, влияния токсических веществ на их флору и фауну, очистка водных объектов от загрязнителей являются на сегодняшний день актуальными [1]. Сточные воды, подвергшиеся специальной очистке в системах очистных сооружений, собираются в так называемых озерах-накопителях. Вопросы таких водных сред требуют незамедлительного решения, поскольку, являясь частью внешней среды целых областей, они определяют в большой степени благополучие их среды и населения. Нужно иметь в виду, что исследования экологических процессов в водоемах-накопителях будут успешным только при последовательном их изучении в сравнении с уже известным состоянием пресноводных сред [2].

Тяжелые металлы (ТМ) являются важнейшими загрязняющими водоемы веществами. При экологическом и гидробиологическом мониторинге они рассматриваются как приоритетные. Тяжелые металлы биологически активны и не трансформируются в организме гидробионтов, сорбируются клеточными стенками и накапливаются внутри клеток растений микроорганизмов-бактерий, водорослей и т.д. [3]. По большинству ТМ их сорбционная способность сравнительно высока. Однако в настоящее время в литературе по исследованию тяжелых металлов в высших растениях и в ракообразных в озерах-накопителях сточных вод очень мало данных. Наиболее важным является при этом поиск физических и биологических факторов, улучшающих качества воды.

Целью настоящей работы было исследование оптических свойств необлученных и облученных ряда биоматериалов в высших растениях озера-накопителя Сорбулак.

Методика эксперимента

Проведены оптические исследования необлученных, загрязненных и облученных биоматериалов на примере камыша и осоки. Экспериментальные образцы были изготовлены из биоматериалов озера Сорбулак (загрязненные образцы) и растущих около близлежащей проточной реки (незагрязненные образцы). Изучение оптических свойств и структуры как облученных, так и необлученных образцов камыша, осоки на отражение и просвет проводилось на автоматизированном цифровом микроскопе (АЦМ) типа Leica DM6000M. Экспериментальные образцы готовились в виде трубок (нарезанных из стеблей) и листьев. Облучение материалов велось в воздушной среде в специальных держателях на ускорителе электронов ЭЛУ-6 КазНПУ им. Абая. Параметры ускорителя следующие: энергия электронов – 2 МэВ, длительность импульсов – 5 мкс, частота их повторения – 200 Гц. Вакуум в системе ускорителя поддерживался равным 10⁻⁶ мм ртутного столба. Величина тока пучка высокоэнергетических электронов составляла 0,3 мкА/см². Доза электронного облучения выбиралась равной 50-500 кГр. Биообразцы были расположены на расстоянии 40 см от выходного окна ускорителя, облучение длилось в течение нескольких минут. Средняя высота закрепления образцов во время облучения совпадала с центром выходного окна, максимальная – равнялась 30 см. При проведении работ температура образцов поддерживалась равной 23 °С, а относительная влажность – 55 %.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На рисунке 1 представлены фотографии незагрязненного облученного (D = 500 кГр; увеличение в 5 раз) и загрязненного облученного (D = 500 кГр; увеличение в 10 раз) стебля камыша. Как видно из рисунка, незагрязненный образец стебля камыша имеет практически идеальную полосатую структуру. Повторяющиеся полосы для камыша представляют собой трубки диаметром порядка 250 мкм, а расстояние между ними составляет 400 мкм (для камыша) и 250 мкм для осоки. Для загрязненного образца свойственны вкрапления размерами 30–50 мкм в виде конгломератов, состоящих из атомов тяжелых металлов и их соединений. Одновременное воздействие загрязнения и электронного облучения образцов биоматериала размывает полосы материала, что связано с генерацией устойчивых радиационных дефектов типа пары Френкеля и пары электрон-ион, которые в последующем приводят к разрушению клеток и к деструкции биоматериала.





б)

Рисунок 1. Микрофотографии облученного (D = 500 кГр) стебля камыша: (a) – незагрязненный (увеличение в 5 раз); (б) – загрязненный (увеличение в 10 раз)

Также на загрязненном стебле камыша обнаружено огромное количество упорядоченных мелких темных структур, связанных с имеющими место вредными для растения веществами.

Представленные на рисунках 2 и 3 микрофотографии необлученных, облученных, незагрязненных и загрязненных образцов стебля осоки показывают, что незагрязненные и загрязненные образцы осоки сильно отличаются своей структурой. На загрязненных стеблях осоки наблюдаются огромные темные пятна, связанные, на наш взгляд, с содержанием большого количества тяжелых металлов.

Поверхность и объем тела всех исследуемых объектов (осоки, камыша и др.) сильно подвержены существенным изменениям. Для загрязненных объектов видны существенные повреждения структуры материала.





Рисунок 2. Микрофотография (увеличение в 5 раз) необлученного стебля осоки: (а) – незагрязненного; (б) – загрязненного





Рисунок 3. Микрофотография облученного стебля осоки: (a) – незагрязненного; (б) – загрязненного

На рисунке 4 представлены микрофотографии биоматериала в 3D-формате, видно, что основная часть включений имеет размеры менее 1 мкм (макромолекулы).



Рисунок 4. 3D-микрофотография участка поверхности образца бирматериала пощадью 15×15 мкм

Литература

- Савченко, В.В., Вадковская, И.К. Микроэлементы в водных растениях Беларуси (на примере рек Березина и Свислочь) // Природопользование. – 1996. – Вып. 1. – С. 124–126.
- Ялынская, Н.С., Лопотун, А.Г. Накопление микроэлементов и тяжелых металлов в растениях рыбоводных прудов // Гидробиологический журнал. – 1993. – Т. 29, №5. С. 40–46.
- Поклонов, В.А., Котелевцев, С.А., Шестакова, Т.В., Остроумов, С.А. Снижение концентрации тяжелых металлов в водных растворах при взаимодействии с макрофитами. Экологическая химия. – 2011. – Т. 20. – С. 200–203.
- Esyrev O.V., Kupchishin A.A., Kupchishin A.I., Voronova N.A. Optical research of biomaterials of sorbulak// IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 110 012036. – 2016. – P. 1–5.

СӘУЛЕЛЕНБЕГЕН, СӘУЛЕЛЕНГЕН ЖӘНЕ ЛАСТАНҒАН БИОМАТЕРИАЛДАРДЫ ОПТИКАЛЫҚ ЗЕРТТЕУ

^{1,2)} А.И. Купчишин, ¹⁾ О.В. Есырев, ¹⁾ Н.Н. Ходарина, ¹⁾ Б.Г. Таипова, ¹⁾ Т.И. Зубарева

¹⁾ Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан ²⁾ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Сорбұлақ көлінің сәулеленбеген және Сәулеленген биоматериалдарының оптикалық қасиеттері зерттелді. Үлгілер Сорбұлақ көлінің (ластанған) және жақын маңдағы ағынды өзеннің маңында өсіп келе жатқан (ластанбаған) биоматериалдарынан жасалған. Сәулеленген және сәулеленбеген қамыс үлгілерінің, осоктардың оптикалық қасиеттері мен құрылымын бейнелеу және жарықтандыру *Leica DM6000M* типті автоматтандырылған сандық микроскоппен (АЦМ) зерттеу жүргізілді. Тәжірибелік үлгілер түтікшелер (сабақтардан кесілген) және жапырақтар түрінде дайындалды. Электрондық сәулелену дозасы 50–500 кГр тең.

Алынған деректерді талдау биоматериал үлгілерінің бір мезгілде ластануы мен электрондық сәулеленуі материал жолақтарының жайрайтыным көрсетті, бұл ауыр металдардың жиналуымен және Френкель буы және электрон – ион буы түріндегі тұрақты радиациялық ақаулардың генерациясымен байланысты, олар кейіннен жасушалардың бұзылуына және биоматериалдың деструкциясына әкеп соқтырады.

Выводы

Установлено, что одновременное загрязнение и электронное облучение образцов биоматериала приводит к размытию полос материала, что связано с накоплением тяжелых металлов и генерацией устойчивых радиационных дефектов типа пары Френкеля и пары электрон – ион, которые в последующем приводят к разрушению клеток и к деструкции биоматериала.

OPTICAL RESEARCHES OF UNIRRADIATED, POLLUTED AND IRRADIATED BIOMATERIALS

^{1,2)} A.I. Kupchishin, ¹⁾ O.V. Esyrev, ¹⁾ N.N. Hodarina, ¹⁾ B.G. Taipova, ¹⁾ T.I. Zubareva

¹⁾ Kazakh National Pedagogical University named after Abai, Almaty, Kazakhstan ²⁾ Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

The optical properties of the unirradiated and irradiated series of biomaterials of the lake-reservoir Sorbulak were investigated. Samples are made from biomaterials of Sorbulak Lake (polluted) and growing near a nearby flowing river (unpolluted). The study of the optical properties and structure of irradiated and non-irradiated samples of reeds, sedges for reflection and lumen was carried out on an automated digital microscope (ACM) of the type *Leica DM6000M*. Experimental samples were prepared in the form of tubes (cut from stems) and leaves. The dose of electron irradiation is 50–500 kGy.

Analysis of the data showed that simultaneous contamination and electron irradiation of biomaterial samples leads to blurring of material bands, which is associated with the accumulation of heavy metals and the generation of resistant radiation defects such as a Frenkel pair and an electron-ion pair, which subsequently lead to cell destruction and destruction of the biomaterial.

МОДЕЛИРОВАНИЕ НА ЭВМ ПРОСТРАНСТВЕННЫХ РАСПРЕДЕЛЕНИЙ ДЕФЕКТОВ В МАТЕРИАЛАХ

^{1,2)} Купчишин А.И., ¹⁾ Ниязов М.Н., ¹⁾ Абдухаирова А.Т., ¹⁾ Тронин Б.А.

¹⁾ Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан ²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Произведено моделирование на ЭВМ распределений по глубине имплантированных ионов титана и азота с энергиями E = 70, 150, 250, 550, 700 и 1000 эВ, потерь энергии в титане. Получено, что эти кривые (для различных энергий), как для титана, так и для азота имеют четко выраженные максимумы, а их концентрации неравномерно распределены по глубине. Как показывают расчеты распределение потерь энергии на ионизацию и возбуждение по глубине материала титана и азота в титане – это резко убывающие функции для всех рассчитанных энергий. С увеличением энергии величина максимума в распределении имплантированных ионов уменьшается, а потерь энергии – возрастает.

Введение

Как известно, высокоэнергетические частицы производят в твердых телах, в том числе и в металлических материалах, ряд последовательных взаимодействий с электронами и атомами конденсированного вещества. В результате этого происходит передача энергии этому веществу, которая вызывает радиационно-химические превращения в материале путем ионизации и возбуждения атомов и молекул. Кроме этого, идет каскад вторичных частиц (первично-выбитых атомов), обладающих достаточно высокой кинетической энергией. Следует заметить, что заряженные частицы (электроны, ионы и т.п.) производят в конденсированных средах непосредственную ионизацию атомов и молекул, а фотонные излучения - косвенную, за счет образования вторичных электронов. Далее, электроны и атомы вещества, поглощая энергию первичных взаимодействий, становятся родоначальниками большого числа дальнейших последовательных взаимосвязанных между собой событий на атомно-молекулярном уровне, что приводит в конечном итоге к изменению структуры и различных свойств облучаемого материала. В результате после облучения, в основном, происходят необратимые изменения структуры и свойств материалов, сопровождающиеся совокупностью эффектов, которые характеризуются дозовыми или интегральными эффектами, поскольку степень их проявления зависит, прежде всего, от энергии, интенсивности излучения и поглощенной дозы. Как правило, дозовые эффекты проявляются на атомном и молекулярном уровне в виде различных радиационных дефектов. При этом наиболее типичным видом радиационных дефектов в структуре твердого тела являются пары Френкеля в виде междоузельных атомов и вакансий в кристаллической решетке [1-4].

При упругом взаимодействии суммарная кинетическая энергия смещенного атома и первичной частицы остается неизменной. Первично-выбитый атом, имея кинетическую энергию, достаточную для последующих взаимодействий с атомами кристаллической решетки, может вызывать дальнейшие смещения. В различных моделях и теориях каскадов рассматриваются закономерности образования вторичных атомов. Причем при этом различные виды ионизирующих излучений имеют различную способность образования вторичных и т.д. смещений [5–7]. Несмотря на большое количество работ в этом направлении, расчетов для конкретных экспериментов и анализу характеристик числа взаимодействий и глубин наблюдения выполнено крайне мало.

В данной работе произведены расчеты пространственных распределений дефектов, потерь энергии, концентрации выбитых атомов в титане, облученном ионами азота и титана.

МЕТОДИКА РАСЧЕТА

Моделирование на ЭВМ пространственных распределений имплантированных ионов производилось по стандартной программе *SRIM*. Пакет программ *TRIM (SRIM)* предназначен для моделирования физических процессов возникновения каскадов радиационных дефектов при облучении слоистых твердотельных композиций быстрыми протонами, альфа-частицами и ионами с большей массой.

Пакет программ (ПП) доступен в двух версиях: TRIM для операционной системы DOS (также может работать под Windows в режиме эмуляции DOS) и SRIM for Windows. TRIM (SRIM) использует графический пользовательский многооконный интерфейс.

- Состав ПП TRIM (SRIM):
- а) блок ввода исходных данных;
- б) блок моделирования;
- в) блок стат. анализа результатов расчета;
- г) блок вывода результатов расчета.

Основой интерфейса является стандартное окно с набором кнопок для ввода исходных данных и кнопок, предназначенных для запуска команд, а также стандартные типы изображений, играющие роль управляющих элементов. Следует отметить, что указанная программа может быть запущена на компьютере в виде нескольких копий с разными исходными данными. В качестве мишени был выбран титан, а налетающими частицами являлись ионы титана и азота.

Результаты и их обсуждение

На рисунках 1-3 представлены распределения имплантированных ионов титана и азота, потерь энергии и концентрация выбитых атомов в облученном титане в зависимости от глубины проникновения для различных энергий налетающих ионов. Кривые распределения, как имплантированных ионов, так и потерь энергии для титана и азота имеют четко выраженные максимумы, а их концентрация неравномерно распределена по глубине материала. Для титана в титане величина максимума распределения имплантированных ионов в 2 раза больше, чем ионов азота в том же материале (рисунок 1). Причем глубина проникновения ионов для обоих случаев имеет сильное различие (для ионов титана ~ 60, а для ионов азота ~100 Å).







Как показывают расчеты, распределение потерь энергии на ионизацию и возбуждение по глубине материала – это довольно резко убывающие функции. Распределения выбитых атомов по глубине в определенной мере повторяют распределения имплантированной примеси (рисунок 3).



1 - 70, 2 - 150, 5 - 250, 4 - 550, 2 - 700, 5 - 1000 3B

Рисунок 2 – Распределение потерь энергии на ионизацию при облучении Ti ионами Ti (a) и N (б)

Концентрация имплантированных ионов с ростом энергии (на единицу длины пути) уменьшается, а потери энергии – растут, что связано с пробегом взаимодействия первичных частиц. На рисунке 4 показаны зависимости концентрации имплантированной примеси в титане в максимуме и потерь энергии на ионизацию от энергии первичной частицы. Потери энергии на ионизацию увеличиваются, а концентрация имплантированных ионов с увеличением энергии уменьшается по экспоненциальному закону. Потери энергии при облучении ионами азота практически в два раза больше, чем при облучении ионами титана. А распределение имплантированных ионов при этом при облучении титана ионами того же элемента больше, чем при облучении его азотом. Наблюдается закономерность изменения потерь энергии и распределения имплантированных ионов, как для ионов титана, так и для ионов азота.





Использование полученных результатов может существенно углубить понимание радиационных процессов в материалах и упростить расчеты других параметров и характеристик частиц и дефектов

Выводы

1. Произведено моделирование на ЭВМ распределений по глубине имплантированных ионов титана и азота с энергиями Е = 70, 150, 250, 550, 700 и 1000 эВ, потерь энергии в титане. Получено, что эти кривые (для различных энергий), как для титана, так и для азота имеют четко выраженные максимумы, а их концентрации неравномерно распределены по глубине.

2. Потери энергии на ионизацию увеличиваются с ростом энергии налетающих частиц, а максимум в распределении имплантированных ионов уменьшается.

3. Как показывают расчеты распределение потерь энергии на ионизацию и возбуждение по глубине материала титана и азота в титане – это резко убывающие функции для всех рассчитанных энергий.

4. С увеличением энергии величина максимума в распределении имплантированных ионов уменьшается, а потерь энергии – возрастает.



Рисунок 4. Сравнение зависимостей потерь энергии (a) и концентрации (б) имплантированной примеси в максимуме кривых от энергии частиц при облучении Ti ионами Ti и N

Литература

- 1. Динс Дж., Винийард Дж. Радиационные эффекты в твердых телах. М.: ИЛ, 1960. 243 с.
- Купчишин А.А., Купчишин А.И., Шмыгалева Т.А. Компьютерное моделирование радиационно-физ. задач. – Алматы: «Қазақ университеті», 2007. – 432 с.
- Буренков А.Ф., Комаров Ф.Ф., Кумахов М.А., Темкин М.М. Таблицы параметров пространственного распределения ионно-имплантированных примесей. – Минск: Изд. БГУ им. Ленина, 1980. – 352 с.
- Jorabayev A.B., Kupchishin A.A., Kupchishin A.I., Smygalev E.V., Shmygaleva T.A. Finding the domain of cascadely-probabilistic functions for Light particles// KazNU. Bulletin. Chemistry scries. – Almaty. – 2013. – №3 (71). – C. 112–117.
- T.A. Belykh, A.L. Gorodishchensky, L.A. Kazak, A.R. Urmanov. Nucl. Instr. Meth. B51, 242 (1990).
- I.V. Antonova, A.V. Dvurechenskii, A.A. Karanovich, A.V. Rybin, S.S. Shaimeev, H. Klose. Phys. Stat. Sol. (a) 147,K1 (1995).
- Гусева М.И., Иванов С.М., Мансурова А.Н., Мартыненко Ю.В. –Физика плазмы, 1986, т. 4, с. 97.

МАТЕРИАЛДАРДАҒЫ АҚАУЛАРДЫҢ КЕҢІСТІКТІК ҰСТАНУЫНЫҢ КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛІН ЖАСАУ

^{1,2)} А.И. Купчишин, ¹⁾ М.Н. Ниязов, ¹⁾ А.Т. Абдухаирова, ¹⁾ Б.А. Тронин

¹⁾ Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан ²⁾ Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

E = 70, 150, 250, 550, 700 және 1000 эВ энергиясымен имплантацияланған титан және азот иондарының тереңдікті таратылуын және иондардың энергия шығының компьютерлік моделдеужасалған. Титан және азот үшін бұл қисықтардың (әртүрлі энергия үшін) максимумы анық көрсетілген және олардың концентрациясы тереңдікте біркелкі таралмайді. Есептеулер корсеткендей иондану процксінде энергия шығынының таралуы және титан мен азоттыңқазған иондардыңтитанға өтуі – бұл барлық есептелген энергиялар үшін күрт төмендейтін функциялар. Энергияның өсуі кезінде имплантацияланған иондардың таралуының максималды мәні төмендейді, ал энергия шығыны артады.

MODELLING ON COMPUTER OF SPATIAL DISTRIBUTIONS OF DEFECTS IN MATERIALS

1,2) A.I. Kupchishin, ¹⁾ M.N. Niyazov, ¹⁾ A.T. Abdukhairova, ¹⁾ B.A. Tronin

Kazakh National Pedagogical University by Abay, Almaty, Kazakhstan
 ²⁾ Kazakh National University by al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

The computer simulation of the depth distributions of implanted titanium and nitrogen ions with e energies was performed= 70, 150, 250, 550, 700 and 1000 eV, energy loss in titanium. It is found that these curves (for different energies), both for titanium and nitrogen, have distinct maxima, and their concentrations are unevenly distributed in depth. As shown by the calculations, the distribution of energy losses for ionization and excitation by the depth of titanium and nitrogen material in titanium are sharply decreasing functions for all calculated energies. With increasing energy, the maximum value in the distribution of implanted ions decreases, and energy losses – increases.

УДК 535.37:537.312:539.16.04

ПОЛИМЕРНЫЕ ИЗОЛЯЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ИХ МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

^{1,2)} Купчишин А.И., ¹⁾ Таипова Б.Г., ¹⁾ Тронин Б.А., ¹⁾ Шаханов К.Ш.

¹⁾ Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан ²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

В работе рассмотрены полимерные изоляционные материалы: полиэтилентерефталатная, полиимидная, фенилоновая. Исследованы их механические свойства. Предложены различные модели разрушения материалов. Установлено, что механические свойства пленок зависят от структуры и условий их синтеза. Глобулярная структура полимеров определяет их хрупкость. Разрушение, как правило, происходит по границам глобул, слабо связанных между собой. Механические воздействия приводят к способности глобулы разворачиваться, а глобулярная структура – переходит в фибриллярную, что приводит к сильным деформациям полимеров. При одноосном нагружении материалов произведен расчет по экспоненциальной модели. Получено хорошее согласие расчетных данных с экспериментальными.

Введение

Прогрессивное развитие техники требует от физики и химии полимеров растущий спрос на новые типы электроизоляционных материалов [1]. Полимерные пленки занимают промежуточное положение между компактными твердыми телами и дисперсными системами, и их особенностью является определенное соотношение между массой и поверхностью. Фактор, определяющий поведение полимеров – это температура. В результате внутреннего вращения одних групп макромолекул относительно других образуются пространственные изомеры. Регулярность следования поворотных изомеров вдоль цепи формирует как ближний, так и дальний конформационный порядок [2, 3].

Полиимидные пленки (ПИ) используют, в основном, для электроизоляции, т.к. они обладают высокой термостойкостью при длительных сроках эксплуатации и сохраняют пластичность вплоть до температуры термического разложения [4]. Их получают поликонденсацией диангидридов тетракарбоновых кислот и ароматических диаминов по одно- или двухстадийной схеме, что и определяет их величину молекулярной массы. При двухстадийных процессах их электромеханические свойства улучшаются.

Лавсановые полимеры все шире используются в промышленности и в быту. Их прочностные и другие свойства являются достаточно привлекательными для различных целей (к примеру, как электроизоляторы, для изготовления пленок, волокон и т.д.). Свойства ПЭТФ обусловлены особенностями строения лавсанов. Они имеют основное звено вида: $[-O - CH_2 - CH_2 - O - CO - C_6H_4 - CO -]_n$ – это полиэтиленгликольтерефталат или сокращенно ПЭТФ. Полиэфирные волокна в разных странах изготавливаются из продуктов переработки нефти по близкой технологии и имеют разные назначения [5].

Линейный ароматический полиамид – поли-м-фениленизофталамида, [– $HMC_6H_4NHOCC_6H_4CO$ –]_n называют фенилоном, который в США известен как «номекс». Способ получения фенилона – поликонденсация дихлор-ангидрида изофталевой кислоты и м-фенилендиамина в эмульсии или растворе. Он белого цвета, $t_{\rm стеклов.} = 270$ °C. Кристаллизуется при нагревании до 340–360 °C, $t_{\rm пл} = 430$ °C; молярная масса 20 000–120 000. Растворим в концентрированной серной кислоте, диметилацетамиде и диметилформамиде, содержащих добавки, например LiCl или CaCl₂. Не горит, химически устойчив в кипящей воде, к действию масел, некоторых минеральных и органических кислот, щелочей, радиационно-стоек. Изделия из фенола характеризуются высокой прочностью (при сжатии и изгибе ~240 Мн/м², или 2409 кгс/см²) [6].

Методика эксперимента

В работе были исследованы следующие виды полимерных пленок: полиэтилентерефталатная, полиимидная, фенилоновая. Образцы полимерных диэлектриков проходили механические испытания [7]. Пленки исследовались на растяжение по ГОСТ 14-236-69, при котором определялось разрушающее напряжение и относительное удлинение. Велась автоматическая запись «нагрузка-деформация» для механических испытаний.

Для унификации параметров пленок был изготовлен специальный разрезной станок, обеспечивающий высокое качество изготовления кромки пленки, а специальная система зажимов обеспечивала действие силовых нагрузок вплоть до разрывных. Совокупность применяемых методов и оборудования позволили обеспечить небольшую погрешность измерений (5 %) и хорошую воспроизводимость опытов.

Исследуемые образцы представляли собой полоски шириной 10, рабочей длиной 50 мм, толщиной 100 мкм для ПЭТФ, ПИ и фенилона – 50 мкм.

Механические испытания проводились на разрывной машине типа РМУ-0,05-1 со скоростью раздвижения зажимов $36,09\pm0,05$ мм/мин. Пленочные образцы испытывались на одноосное растяжение при нормальных условиях вплоть до разрыва (при $T = 20\pm2$ °C, относительной влажности воздуха (45±5) %).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В таблице представлены зависимости относительного удлинения от напряжения и расчетные данные, полученные по предложенной экспоненциальной модели, для исследованных полимерных пленок.

Таблица. Зависимость относительного удлинения от напряжения для различных материалов

Материал	Є эксп, %	σэксп,, МПа	$\sigma_{\text{расч}},$ МПа		
ПЭТФ	104,6	141,12	142,8		
Фенилон	50	44,1	43,3		
ПИ	30,2	166,6	165,2		

Как видно из таблицы, наиболее прочная из трех пленок – полиимидная при относительном удлинении (є) 30 %. По деформационным характеристикам лучше полиэтилентерефталатная пленка с $\varepsilon = 104,6$ %. Промежуточное положение по деформационным характеристикам занимает фенилоновая пленка с относительным удлинением порядка 50 %, но с наименьшими показаниями прочности $\sigma = 44$ МПа. Из всех исследованных пленок полиэтилентерефталатная обладает лучшими механическими свойствами. В зависимости от применения пленок стоит отметить, что по прочностным характеристикам (σ) – лучшая полиимидная, по деформационным (є) – полиэтилентерефталатная.

Механические свойства полимеров связаны с их структурой. Структурные неоднородности, обусловленные наличием в них областей с различной степенью разупорядоченности и дефектности, определяют неравномерность напряжений и перенапряжений на отдельных участках и ответственны за зарождение трещин. Глобулярная структура полимеров определяет их хрупкость и разрушение, которые, как правило, происходят по границам глобул, слабо связанных между собой. При механических воздействиях глобулы имеют способность разворачиваться, а глобулярная структура – переходить в фибриллярную, что приводит к сильным деформациям полимеров [3].

В работах [8, 9] были предложены различные модели разрушения полимерных материалов. Расчет производился по экспоненциальной модели. Получено хорошее согласие расчетных данных с экспериментальными.

Выводы

Механические свойства полимерных материалов сильно зависят от структуры и условий их синтеза. Наилучшими прочностно-деформационными свойствами обладают полиэтилентерефталатная и полиимидная пленки.

Проведен расчет по экспоненциальной модели при одноосном нагружении материалов. Получено хорошее согласие расчетных данных с экспериментальными.

Литература

- 1. Галыгин В.Е., Баронин Г.С., Таров В.П., Завражин Д.О. Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов: учебное пособие. Тамбов: Изд-во ФГБОУ ВПО «ТГТУ», 2012. 180 с.
- Зуев В.В., Успенская М.В., Олехнович А.О. Физика и химия полимеров/ Учеб. пособие. СПб.: СПбГУ ИТМО, 2010. 45 с.
- 3. Волькенштейн М.В. Конфигурационная статистика полимерных цепей. М.: Изд.АН СССР, 1959. 466 с.
- Кудайкулова С.К., Искаков Р.М., Кравцова В.Д., Умерзакова М.Б., Abadie М., Жубанов Б.А. и др. Полимеры специального назначения. Алматы, 2006. 310 с.
- 5. Уайт Дж.Л., Чой Д.Д. Полиэтилен, полипропилен и другие полиолефины. Спб.: Профессия, 2006. 368 с.
- 6. Абакумова Н.М., Гудимов М.М., Финогенов Г.Н., Андреева Г.Г., Михеев С.А. Физико-механические свойства ароматических полиамидов марки фенилон// Электронная версия доступна по адресу: www.viam.ru/public.
- Шах В. Справочное руководство по испытаниям пластмасс и анализу причин их разрушения / пер. с англ. под ред. А.Я. Малкина. – СПб.: Научные основы и технологии, 2009. – 732 с.
- 8. Kupchishin A.I., Taipova B.G., Kupchishin A.A., at all. Catastrophic models of materials destruction // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering. 110. 012037. – 2016. – P. 1–5.
- Kupchishin A.I, Taipova B.G., Voronova N.A. Study of the influence of filler on the mechanical properties of composites based on polyimide// IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 168 012015. – 2017. – P. 1–4.

ПОЛИМЕРЛІ ОҚШАУЛАҒЫШ МАТЕРИАЛДАР ЖӘНЕ ОЛАРДЫҢ МЕХАНИКАЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

^{1,2)} А.И. Купчишин, ¹⁾ Б.Г. Таипова, ¹⁾ Б.А. Тронин, ¹⁾ К.Ш. Шаханов

¹⁾ Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан ²⁾ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Жұмыс барысында полиэтилентерефталат, полиимид, фенилон полимерлік оқшаулау материалдары зерттелді. Олардың механикалық қасиеттері зерттелді. Материалдарды бұзудың түрлі үлгілері ұсынылды. Пленкалардың механикалық қасиеттері олардың синтезінің құрылымы мен шарттарына байланысты екені анықталды. Полимерлердің глобулярлық құрылымы олардың иілгіш екенін анықтайды. Қирау, әдетте, бір-бірімен әлсіз байланысқан глобул шекаралары бойынша жүреді. Механикалық әсер ету глобуланың иілу қабілетіне әкеледі, ал глобулярлық құрылым-фибриллярға өтеді, бұл полимерлердің қатты деформациясына әкеледі. Материалдарды бір осьтік жүктеу кезінде экспоненциалды модель бойынша есеп жүргізілді. Есептік деректердің эксперименталдық мәліметтермен сәйкестігі алынды.

POLYMER INSULATING MATERIALS AND THEIR MECHANICAL PROPERTIES

1,2) A.I. Kupchishin, ¹⁾ B.G. Taipova, ¹⁾ B.A. Tronin, ¹⁾ K.Sh. Shakhanov

Kazakh National Pedagogical University named after Abai, Almaty, Kazakhstan
 ²⁾ Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

The paper discusses polymeric insulating materials: polyethyleneterephthalate, polyimide, phenylone. Their mechanical properties are investigated. Various models of materials destruction are proposed. It was established that the mechanical properties of the films depend on the structure and conditions of their synthesis. The globular structure of polymers determines their fragility. The destruction, as a rule, occurs along the boundaries of globules weakly interconnected. Mechanical influences lead to the ability of the globule to unfold, and the globular structure becomes fibrillar, which leads to severe deformations of polymers. In the case of uniaxial loading of materials, an exponential model was calculated. A good agreement between the calculated and experimental data was obtained.

УДК 539.14+533.924.621.38.621.793.519.6

ОБОБЩЕННАЯ КАСКАДНО-ВЕРОЯТНОСТНАЯ ФУНКЦИЯ ДЛЯ ПОТОКОВ ЧАСТИЦ И ЕЕ СВЯЗЬ С УРАВНЕНИЕМ БОЛЬЦМАНА

¹⁾ Воронова Н.А., ^{1,2)} Купчишин А.И., ²⁾ Шмыгалева Т.А., ¹⁾ Кирдяшкин В.И., ¹⁾ Купчишин А.А.

¹⁾ Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан ²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Получено аналитическое решение интегро-дифференциального уравнения каскадного процесса для частиц (выбитых атомов и др.) в трехмерной модели элементарного акта, в которое водит обобщенная каскадно-вероятностная функция (ОКВФ). Показано, что после преобразования Лапласа уравнение переходит в интегральное, которое затем решается методом последовательных приближений. Установлены основные физические свойства этой функции. При постоянстве пробега на взаимодействие и угла вылета частицы после соударения ОКВФ переходит в простейшую КВФ. При малых глубинах регистрации вероятность того, что частица пройдет эту глубину, стремится к нулю (как без соударений, так и при испытании i-взаимодействий). При больших глубинах эти вероятности стремятся к нулю. При большом i ОКВФ переходит в формулу типа Стирлинга. При увеличении пробега взаимодействия вероятность без взаимодействия стремится к единице, а вероятность с i-взаимодействием → к нулю.

Введение

Каскадно-вероятностный (КВ) метод разработан нами в процессе многолетней работы в области прикладной математики [1], физики элементарных частиц, физики космических лучей [2, 3], радиационной физики материалов [4, 5] и позитронной физики [6], а также на основе анализа и обобщения этих исследований. В рамках каскадно-вероятностного метода [7] нам также удалось получить аналитическое выражение и рассчитать пороговые энергии смещения для различных элементов.

ФИЗИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Пусть на некоторой переменной глубине х под зенитным и азимутальным углами γ и φ к выбранному направлению (относительно перпендикуляра к поверхности образца или по отношению к зениту) генерирована частица (нуклон, электрон, первично-выбитый атом и т.п.). Наиболее реальным описанием процесса при этом является трехмерная модель распространения частиц в веществе, поскольку траектория движения частиц сильно закручивается в пространстве.

В трехмерной модели уравнение баланса (типа Больцмана) для потока частиц на глубине *х* запишется в виде:

$$\frac{dN(E,\theta,\varphi,x)}{dx} = -\frac{N(E,\theta,\varphi,x)}{\lambda(E)\cos\theta} + \frac{1}{2\pi} \int_{E}^{E_{m}} \int_{\theta_{1}}^{\theta_{1}'} \varphi_{1}' N(E',\theta',\varphi',x) \times \qquad (1)$$

$$\times \frac{n(E',E,\theta',\theta)}{\lambda(E')\cos\theta'} dE' d\theta' d\varphi'.$$

при начальном условии $N(E, \theta, \varphi, x) = N(E, \theta)$.

Причем здесь $N(E, \theta, \varphi, x)$ – поток частиц на глубине х; $dN(E, \theta, \varphi, x) / dx$ – изменение потока излучения в бесконечно-малом слое dx, $\lambda(E)$ и γ - пробег взаимодействия и угол вылета соответственно частицы относительно вертикали после взаимодействия, $n(E', E, \theta', \theta)$ – нормированный дифференциальный энергетический спектр вторичных частиц в элементарном акте, E – энергия частицы.

Результаты и обсуждение

Найдем решение уравнения (1) в общем виде с помощью преобразования Лапласа. Сделав обратное преобразование Лапласа, найдем оригинал. После соответствующих вычислений получим:

$$N(E,\theta,\varphi,x) = \sum_{n=0}^{n} Y_n(E,\theta,\varphi,x),$$
(2)

$$Y_{n}(E,\theta,\phi,x) =$$

$$= \int_{E} \int_{\theta_{1}} \varphi_{1}^{'} \cdots \int_{E_{n-1}} \int_{\theta_{n-1}} \varphi_{n-1}^{'} N(E_{1},\theta_{1},\varphi_{1},0) \times$$

$$\times \frac{n_{p}(E_{n},E_{n-1},\theta_{n},\theta_{n-1},\varphi_{n},\varphi_{n-1})}{2\pi} \cdots \times$$

$$\times \frac{n_{p}(E_{1},E,\theta_{1},\theta,\varphi_{1},\varphi)}{2\pi} \times$$

$$\times \psi_{n}(x,\lambda_{0} \div \lambda_{n}) dE_{n} d\theta_{n} d\varphi_{n} \cdots dE_{1} d\theta_{1} d\varphi.$$
(3)

где

$$\psi_n \left(x, \alpha_0 \div \alpha_n \right) = \sum_{j=0}^n \frac{\alpha_n \alpha_j^{n-1}}{\prod_{\substack{i=0\\i\neq j}}^n \left(\alpha_j - \alpha_i \right)} \exp\left(-\frac{x}{\alpha_j} \right).$$
(4)
$$\alpha_n = \lambda_n \left(E \right) \cos \theta_n;$$

$$\alpha_i = \lambda_i \left(E \right) \cos \theta_i;$$

$$\alpha_j = \lambda_j \left(E \right) \cos \theta_j.$$

Как видно из решения (3), в него входит обобщенная каскадно-вероятностная функция (ОКВФ), учитывающая распространение излучения в трехмерном пространстве. Она имеет смысл вероятности того, что частица, генерированная на глубине х' достигнет глубины х, после п числа соударений. Рассмотрим свойства ОКВФ. Введем обозначение:

$$A_{jn} = \frac{\alpha_j^{n-1}}{\prod_{\substack{i=0\\i\neq j}}^{n} (\alpha_j - \alpha_i)}.$$
(5)

<u>Свойство 1</u>. Для всех целых и положительных значений всегда имеем равенство:

$$\sum_{j=0}^{n} A_{jn} = 0.$$
 (6)

Рассмотрим $\sum_{j=0}^{n} A_{jn}$ при n = 1, 2, 3, 4 и т.д. С ис-

пользованием общего соотношения и выражения для A_{jn} , полученного при n = 1, 2, 3, 4 и т.д., можно показать, что эта сумма равна нулю.

Для любого $n \sum_{j=0}^{n} A_{jn} = 0$ доказывается методом

математической индукции.

<u>Свойство 2.</u> Для всех целых и положительных значений $n \ge 1$ выполняется равенство:

$$B_{n} = \sum_{j=0}^{n} A_{jn} \alpha_{j} = 1.$$
 (7)

Рассмотрим $\sum_{j=0}^{n} A_{jn} \alpha_{j}$ при n = 1, 2, 3, 4. При n = 1

имеем соотношение:

$$B_1 = \frac{\alpha_0}{\alpha_0 - \alpha_1} + \frac{\alpha_1}{\alpha_1 - \alpha_0}; \ n = 1.$$

Аналогично записываются выражения для *B*₂, *B*₃ и т.д. В результате получим (7).

<u>Свойство 3.</u> Для всех целых и положительных значений $n \ge 1$ всегда выполняется равенство:

$$C_{n} = \sum_{j=0}^{n} A_{jn} \alpha_{j}^{2} = \sum_{j=0}^{n} \alpha_{j}.$$
 (8)

Аналогично (7) запишем суммы $\sum_{j=0}^{n} A_{jn} \alpha_{j}^{2}$ при

n = 1, 2, 3, 4.

После проведения алгебраических преобразований находим $C_1 = \alpha_0 + \alpha_1$; $C_2 = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2$; $C_3 = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3$; $C_3 = \alpha_0 + \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4$. Обобщая на

случай *n*-переменных, имеем: $C_n = \sum_{j=0}^n \alpha_j$.

Воспользуемся методом математической индукции. Запишем формулу для C_{n+1} . Преобразовывая полученные соотношения придем к выражению (8).

<u>Свойство 4.</u> При $\alpha_0 \rightarrow \alpha_1 \rightarrow ... \rightarrow \alpha_n$ имеем неопределенность функции *n*-переменных, раскрывая которую, получаем:

$$\lim_{\alpha_0 \to \alpha_1 \dots \to \alpha_n} \psi_n(h', h, \alpha_0 \div \alpha_n) = \psi_n(h', h, \alpha_0), \qquad (9)$$

где

$$\psi_n(h', h, \alpha_0) = \frac{1}{n!} \left(\frac{h-h'}{\alpha_0}\right) \exp\left(-\frac{h-h'}{\alpha_0}\right)$$

Доказательство этого соотношения можно произвести на основе анализа выражения для $\psi_1(h', h, \alpha_0) \div \psi_4(h', h, \alpha_0, \alpha_{1+1} \div \alpha_4)$ и т.д.

<u>Свойство 5.</u> Для любых целых положительных значений $n \ge 0$ всегда выполняется равенство:

$$D_n = \frac{1}{\alpha_n} \int_0^\infty \psi_n \left(H, \alpha_0 \div \alpha_n \right) dH = 0.$$
 (10)

Подставив в (10) соотношения для $\psi_0(H, \alpha_0)$, $\psi_1(H, \alpha_0, \alpha_1)$, $\psi_2(H, \alpha_0 \div \alpha_2)$, $\psi_3(H, \alpha_0 \div \alpha_3)$, видим, что это выражение выполняется. Для окончательного решения вопроса необходимо воспользоваться общим выражением для $\psi_n(H, \alpha_0 \div \alpha_n)$.

<u>Свойство 6.</u> Для любых целых положительных значений выполняется равенство:

$$\frac{1}{\alpha_n} \int_0^\infty H \psi_n \big(H, \alpha_0 \div \alpha_n \big) dH = \sum_{j=0}^n \alpha_j.$$
(11)

Подставляя выражения для $\psi_0(H, \alpha_0), \psi_1(H, \alpha_0, \alpha_1), \psi_2(H, \alpha_0 \div \alpha_2), \psi_3(H, \alpha_0 \div \alpha_3) \delta$ (11), убеждаемся, что равенство (11) справедливо.

Свойства 4–6 вероятностной функции имеют определенный физический смысл. Например, при прохождении ионов через вещество указанные выше соотношения описывают общий случай их взаимодействия, а (9) – при условии, что ион после взаимодействия сохраняет направление своего движения. Соотношение (10) свидетельствует о том, что сумма вероятностей (взаимодействий) того, что частица пройдет глубину H = h - h', равна 1, т.е., она достигнет обязательно какой-то глубины $H (0 \le H \le \infty)$ с вероятностью 1. Формула (11) показывает, что среднее расстояние, которое проходит частица, равна сумме полных средних пробегов взаимодействия этой частицы.

Выводы

1. Показано, что обобщенная каскадно-вероятностная функция может быть получена из с трехмерного уравнения Больцмана. Решение ведется методом преобразования Лапласа.

2. Рассмотрены физические свойства ОКВФ, которые имеют определенный физический смысл.

Литература

- 1. Kupchishin A.A., Kupchishin A.I., Shmygaleva T.A. at al. Analysys of cascade-probabilistic functions taking into account the energy losses in the case of charged particles // Modelling, Measurement & Control, A, AMSE. 1994. Vol. 55, № 2. P. 49-55.
- 2. Efimov A.K., Kolomeets E.V., A.I., Boos E.G at al. Calculation of the coupling coefficient for cosmic ray muon and neutron component // Proc. 13-th Int. conf. of Cosmic Rays. Denver. 1973. Vol. 2. P. 863–868.
- 3. Байсакалова А.Б., Богданова О.А., Искаков Т.З. и др. Генерация протонов, нейтронов и электронов на Солнце // Изв. АН СССР. Сер. физ. 1975. Т. 39, № 2. С. 264–271.
- Купчишин А.Й., Купчишин А.А., Шмыгалева Т.А. и др. Каскадно-вероятностный метод. Решение радиационнофизических задач, уравнений Больцмана. Связь с цепями Маркова / Монография. – Алматы. Изд. КазНПУ им. Абая, ТОО Кама, НИИ НХТиМ КазНУ им. аль-Фараби, 2015. – 388 с.
- Voronova N.A., Kirdyashkin V.I., Gyngazov V.A. at al. Computer simulation radiation damages in condensed matters // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 110 012039. – 2016. – P. 1–4.
- Kupchishin A.I., Kupchishin A.A., Voronova N.A. at al. Positron sensing of distribution of defects in depth materials // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 110 012040. – 2016. – P. 1–4.
- Kupchishin A.I., Kupchishin A.A. Dynamic model of the threshold displacement energy // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering 110 012040. – 2016. – P. 1–4.

БӨЛШЕКТЕР АҒЫНЫ ҮШІН ЖАЛПЫЛАНҒАН КАСКАДТЫ-ЫҚТИМАЛДЫҚ ФУНКЦИЯ ЖӘНЕ ОНЫҢ БОЛЬЦМАН ТЕҢДЕУІМЕН БАЙЛАНЫСЫ

¹⁾ Н.А. Воронова, ^{1,2)} А.И. Купчишин, ²⁾ Т.А. Шмыгалева, ¹⁾ В.И. Кирдяшкин, ¹⁾ А.А. Купчишин

¹⁾ Абай атындағы Қазақ ұлттық педагогикалық университеті, Алматы, Қазақстан ²⁾ әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Жалпыланған каскадты-ықтималдық функциясы (ЖКЫФ) жүргізетін қарапайым әрекеттің үш өлшемді үлгісінде бөлшектерге арналған каскадтық процестің интегралды-дифференциалдық теңдеулері үшін аналитикалық шешім алынады (атомдар сындырылған және т.б.). Лаплас трансформациясыдан кейін теңдеу интегралға өтеді, содан кейін дәйекті жақындаулар әдісі арқылы шешіледі. Бұл функцияның негізгі физикалық қасиеттері белгіленеді. Соқтығысқаннан кейін өзара әрекеттесу жолының тұрақтылығы мен бөлшектердің кету бұрышы ЖКЫФ қарапайым КЫФ-на ауысады. Таяз тіркеу тереңдігінде бөлшектердің осы тереңдіктің өту ықтималдығы нөлге тең болады (екі қақтығыстарсыз және өзара әрекеттесу кезінде). Үлкен тереңдікте бұл ықтималдықтар нөлге тең. Үлкен і ЖКЫФ Стирлинг түріндегі формулаға өтеді. Өзара іс-қимыл жүгірісі ұлғайған кезде әсерлесусіз ықтималдығы бірге ұмтылады, і-өзара әрекеттесу ықтималдығы нөлге тең.

GENERALIZED CASCADE-PROBABILITY FUNCTION FOR HOUR-TIME FLOWS AND ITS CONNECTION WITH THE BOLTZMAN EQUATION

¹⁾ N.A. Voronova, ^{1,2)} A.I. Kupchishin, ²⁾ T.A. Shmygaleva, ¹⁾ V.I. Kirdyashkin, ¹⁾ A.A. Kupchishin

Kazakh National Pedagogical University named after Abai, Almaty, Kazakhstan ²⁾ Kazakh National University named after al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

An analytical solution is obtained for the integro-differential equation of a cascade process for particles (knocked out atoms, etc.) in a three-dimensional model of an elementary act, into which a generalized cascade-probability function (GCPF) leads. It is shown that after the Laplace transformation, the equation passes into an integral one, which is then solved by the method of successive approximations. The basic physical properties of this function are established. With the constancy of the path to the interaction and the angle of departure of the particle after the collision, the GCPF goes into the simplest CPF. With small depths of registration, the probability that a particle will pass this depth tends to zero (both without collisions and when testing i interactions). At greater depths, these probabilities tend to zero. With a large i GCPF goes into a Stirling type formula. As the interaction path increases, the probability without interaction tends to unity, and the probability with i-interactions tends to zero.

ИЗУЧЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ОРГСТЕКЛА ПРИ ИЗГИБЕ, ОБЛУЧЕННОГО ЭЛЕКТРОНАМИ

^{1,2)} Купчишин А.И., ¹⁾ Ниязов М.Н., ¹⁾ Таипова Б.Г., ¹⁾ Абдухаирова А.Т., ²⁾ Яр-Мухамедова Г.Ш.

¹⁾ Казахский национальный педагогический университет им. Абая, Алматы, Казахстан ²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Проведены эксперименты по зависимости деформации от напряжения при испытании на плоский прямой изгиб образцов необлученного и облученного рифленого оргстекла. Установлено, что при увеличении напряжения относительное удлинение рифленых образцов оргстекла (как необлученного, так и облученного) растет по линейному закону. Выявлено, что облучение приводит к заметному изменению деформационно-прочностных характеристик материала, проявляющихся в уменьшении пластичности. Относительное удлинение полосатого оргстекла после облучения изменяется на 20 %, а пирамидного – на 40 %. При этом изменение прочности не происходит. Полученные кривые зависимости є от о удовлетворительно описываются в рамках линейной модели.

Введение

Испытание на изгиб проводят, в частности, для проверки стыковых соединений [1–3]. Оно может быть статическим и ударным (динамическим) [4]. На изгиб испытываются и пластичные, и хрупкие материалы. Характер деформации хрупких образцов резко отличается от пластичных [5]. Если испытанию на изгиб подвергается пластичный материал, то из-за больших деформаций его не удается разрушить и определить предел прочности на изгиб. Другие механические характеристики, как, например, предел пропорциональности, предел текучести, легко определяются из опыта [6–9].

Испытание при проверке прочности и жесткости хрупких материалов приобретает важное значение, так как разрушение их при работе чаще всего происходит от остаточных деформаций [10, 11]. При этом находят максимальную нагрузку и максимальную стрелу прогиба, предшествующие моменту разрушения. При максимальной нагрузке вычисляют предел прочности. Испытание на изгиб осуществляется следующим образом: одной сосредоточенной силой, приложенной посередине образца между опорами и двумя силами, приложенными симметрично относительно опор [12, 13]. Результаты испытания в значительной мере зависят от типа материала, условий нагрузки, формы и размеров образцов. Особый интерес при модификации свойств и структуры полимерных и композитных материалов представляет их облучение разными частицами, в том числе электронами [14].

Методика эксперимента

Данная работа посвящена исследованию влияния напряжения и электронного облучения на деформацию рифленого оргстекла при плоском прямом изгибе с одной сосредоточенной силой. Исследуемый материал – рифленое оргстекло двух видов (пирамиды и полосы). Толщина (h) образцов оргстекла была равна 3 мм в выпуклой части рифления, ширина (b) – 5 мм и длина L - 40 мм. Наименьшая толщина в вогнутой части рифления для пирамидного материала составляла 1, а для полосатого – 2 мм. Испытание

проводились при температуре 23 $^{\rm o}{\rm C}$ и относительной влажности 50 %

Для исследования зависимости деформации є от напряжения о нами была разработана и изготовлена соответствующая экспериментальная установка, схема которой показана на рисунке 1. Она состоит из следующих частей: датчик силы, индикатор часового типа, устройство для крепления образца, соединительные провода и интерфейс, на который выводятся данные о силе.



Рисунок 1. Схема установки для испытания материалов на плоский прямой изгиб

Все это устанавливается на нижней части разрывной машины РУ-50, обеспечивающей равномерную скорость передвижения – 10 мм/мин и относительное перемещение нагружающего наконечника и опор, и позволяющей производить измерение нагрузки с погрешностью ± 1 %, а прогиба – ± 2 %. Облучение образцов электронами проводилось на линейном ускорителе ЭЛУ-6 с энергией 2 МэВ в воздушной среде. Вакуум в системе ускорителя поддерживался равным 10^{-6} мм ртутного столба. Образцы для облучения помещались на расстоянии 40 см от выходного окна ускорителя. Величина тока пучка составляла 0,3 мкА/см², доза облучения – 100 кГр.

Результаты и их обсуждение

В результате проведенных экспериментальный исследований получены зависимости деформации от напряжения для необлученных и облученных образцов рифленых оргстекол, при котором происходит плоский изгиб с учетом и без учета горизонтальной составляющей (рисунок 2). Фигурами показаны результаты эксперимента, а линиями – данные расчетов. Рассмотрение физико-механический свойств проводилось в координатах ε , σ . Зависимость σ от ε не имеет физического смысла, поскольку σ является аргументом, а ε – функцией, что показано в [15].



фигуры – эксперимент; линии – расчет

Рисунок 2. Зависимость деформации от напряжения для необлученных (1, 2) и облученных электронами (3, 4) образцов полосато-рифленого (а) и пирамидно-рифленого (б) оргстекла, при плоском изгибе с учетом (квадраты и звездочки) и без учета горизонтальной составляющей соответственно (точки и треугольники)

Расчет зависимости ε от σ по экспериментальным данным производился следующим образом. Напряжение, при котором происходит изгиб, вычислялось по формуле [16]:

$$\sigma = \frac{M}{W}, \qquad (1)$$

где М – изгибающий момент; W – момент сопротивления образца. Изгибающий момент (М) находился из выражения:

$$M = \frac{FL}{4}, \qquad (2)$$

где F – нагрузка; L – расстояние между опорами. Момент сопротивления образца (W) определяется из соотношения:

$$W = \frac{bh^2}{6}.$$
 (3)

Из (1) – (3) следует, что [14]:

$$\sigma = \frac{3\text{FL}}{2\text{bh}^2} \,. \tag{4}$$

Изгибающее напряжение (σ_f) с учетом горизонтальной составляющей изгибающего момента при изгибе z, может быть вычислено по формуле:

$$\sigma_{\rm f} = \frac{3\rm FL}{2\rm bh}^2 \left(1 + \frac{4\rm z^2}{\rm L^2}\right),\tag{5}$$

где z – прогиб образца в середине между опорами.

Как следует из результатов, при увеличении напряжения, относительное удлинение рифленых образцов оргстекла (как необлученного, так и облученного) растет по линейному закону. При этом, полосато-рифленый материал имеет большую прочность и относительное удлинение чем пирамидно-рифленый. После облучения дозой 100 кГр образцы оргстекла теряют пластичность на 20 и 40 % соответственно по сравнению с необлученными материалами. Изменение прочности материалов после облучения не происходит. Анализ показывает, что светопропускаемость (прозрачность) уменьшается, образцы окрашиваются в коричневый цвет. Учет горизонтальной составляющей несущественно влияет на величину относительного удлинения. С хорошей точностью экспериментальные данные описывается линейной моделью:

$$\varepsilon = \alpha \sigma,$$
 (6)

где α – тангенс угла наклона. Для необлученного полосато-рифленого стекла $\alpha = 0,14$, а пирамидно-рифленого 0,2. Для облученных материалов $\alpha = 0,1$ и 0,13 соответственно.

Выводы

1. Проведены эксперименты по зависимости деформации от напряжения при испытании на плоский прямой изгиб образцов необлученного и облученного рифленого оргстекла. Установлено, что при увеличении напряжения относительное удлинение рифленых образцов оргстекла (как необлученного, так и облученного) растет по линейному закону. Выявлено, что облучение приводит к заметному изменению деформационно-прочностных характеристик материала, проявляющегося в уменьшении пластичности. Относительное удлинение полосатого оргстекла после облучения изменяется на 20 %, а пирамидного – на 40 %. При этом изменение прочности не происходит.

2. Полученные кривые зависимости ε от σ удовлетворительно описываются в рамках линейной модели.

Литература

- 1. Беляев Н.М. Сопротивление материалов. М.: Наука, 1976. 608 с.
- Briskman B.A., Tlebaev K.B. Radiation Effects on Thermal Properties of Polymers. II. Polytetrafluoeroethylene //High Performance Polymers. 2008. Vol. 20, No.1. P. 86–114.
- 3. Рубашкин А.Г., Чернилевский Д.В. Лабораторно-практические работы по технической механике. М.: Высшая школа, 1975. 254 с.
- Jiazhen Sun, Yuefang Zhang, Xiaoguang Zhong. Radiation cross linking of polytetrafluoeroethylene// Polymer. 1994. Vol. 35, Iss. 13. – P. 2881–2883.
- 5. Tabata Y., Ikeda S., Tabata Y., Suzuki H., Miyoshi T., Katsumura Y. // Rad. Phys. Chem. -2008. Vol. 77, No 9. P. 401-408.
- 6. Oshima A., Ikeda S., Katoh E., Tabata Y. // Rad. Phys.Chem. 2001. Vol. 62, No1. P. 39-45.
- Katoh E., Sugisawa H., Oshima A., Tabata Y., Seguchi T., Yamazaki T. // Rad. Phys. Chem. 1999. Vol. 54, No 2. P. 165-171.
- 8. Lappan U., Geißler U., Lunkwitz K.I. // Rad. Phys. Chem. 2000. Vol. 59, No 3. P. 317-322.
- 9. Lappan U., Fuchs B., Geiβler U., Scheler U., Lunkwitz K. // Rad. Phys. Chem. 2003. Vol. 67, No 4. P. 447-451.
- Komarov F.F., Kupchishin A.I., Pivovarov S.P., Tlebaev K.B., Kusainov A.T., Rukhin A.B., Pozdeeva T.V. Influence of γ-irradiation on the conformation of free radicals in polytetrafluoeroethylene // J. of engineering physics and Thermophysics. – 2012. – Vol. 85, No.2. – P. 455–458.
- 11. Ivchenko V.A. Atomic structure of cascades of atomic displacements in metals and alloys after different types of radiation // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110012003. 2016. P. 1–5.
- 12. Surzhikov A.P., Galtseva O.V., Vasendina E.A., Vlasov V.A., Nikolaev E.V. Processing line for industrial radiation-thermal synthesis of doped lithium ferrite powders // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 110 012002. 2016. P. 1–4.
- 13. Kupchishin A.I., Niyazov M.N., Voronova N.A., Kirdiashkin V.I., Abdukhairova A.T. nhe effect of temperature, static load and electron beam irradiation on the deformation of linear polymers // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 168012017. 2017. P. 1–4.
- 14. Kupchishin A.I., Taipova B.G., Voronova N.A. Study of the influence of filler on the Structure Treatment systems biomaterials // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering: 168012015. 2015. P. 1–4.
- 15. Kupchishin A.I., Taipova B.G., Kupchishin A.A., Kozhamkulov B.A. Study on the physical and mechanical properties of composites based on polyimide and polycarbonate // Mechanics of composite materials. 2015. Vol. 51, № 1. P. 115–118.
- Kupchishin A.I., Taipova B.G., Kupchishin A.A., Voronova N.A., Kirdyashkin V.I., Fursa T.V. Catastrophic models of materials destruction // IOP Conf. Series: Material Science and Engineering. 110 012037. – 2016. – P. 1–5.

ЭЛЕКТРОНДЫҚ СӘУЛЕЛЕНУДІҢ ОРГАНИКАЛЫҚ ШЫНЫНЫҢ ДЕФОРМАЦИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ӘСЕР ЕТУІН ЗЕРТТЕУ

^{1,2)} А.И. Купчишин, ¹⁾ М.Н. Ниязов, ¹⁾ Б.Г. Таипова, ¹⁾ А.Т. Абдухаирова, ²⁾ Г.Ш. Яр-Мухамедова

¹⁾ Абай атындағы Қазақ Ұлттық Педагогикалық Университеті, Алматы, Қазақстан
²⁾ Әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық Университеті, Алматы, Қазақстан

Сәулеленген және сәулеленбеген органикалық шыны үлгілерінің тегіс тік бұрышында сыналған кезде кернеудің деформациядан тәуелділігі бойынша эксперименттер жүргізілді. Кернеудің жоғарылауымен, органикалық шыны үлгілерінің салыстырмалы ұзаруы (сәулеленген де, сәулеленбеген де) сызықты түрде артады. Сәулелендіру материалдың деформация-беріктігі сипаттамаларының елеулі өзгеруіне экелетіні анықталды, бұл икемдіктің төмендеуімен көрінеді. Сәулеленген Плексигластың сәулеленуден кейінгі салыстырмалы ұзарту 20 %-ға, ал пирамиданың мөлшері 40 % -ға өзгереді. Бұл жағдайда күштің өзгеруі орын алмайды. Алынған қисықтар ε-нің о-ға тәуелділігі сызықтық модель шеңберінде қанағаттанарлық сипатталады.

THE STUDY OF THE DEFORMATION OF THE PLEXIGLAS BENDING IRRADIATED WITH ELECTRONS

^{1,2)} A.I. Kupchishin, ¹⁾ M.N. Niyazov, ¹⁾ B.G. Taipova, ¹⁾ A.T. Abdukhairova, ²⁾ G.Sh. Yar-Mukhamedova

Kazakh National Pedagogical University by Abay, Almaty, Kazakhstan
 ²⁾ Kazakh National University by al-Farabi, Almaty, Kazakhstan

Experiments were carried out on the dependence of strain on stress in the test for a flat straight bend of samples of nonirradiated and irradiated corrugated Plexiglas. It is found that with increasing voltage the relative elongation of corrugated samples of Plexiglas (both non-irradiated and irradiated) increases linearly. It is revealed that the irradiation leads to a noticeable change in the deformation-strength characteristics of the material, manifested in a decrease in plasticity. Elongation striped acrylic plastic after irradiation is changed to 20 %, and the pyramid – 40 %. In this case, the strength change does not occur. The obtained curves of lgt versus σ are satisfactorily described in the framework of the linear model.

УДК 539.21: 620.193: 621.039.5

СВОЙСТВА РАСПЛАВА МАТЕРИАЛОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА, ПОЛУЧЕННОГО НА ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОМ РЕАКТОРЕ ИГР

Скаков М.К., Мухамедов Н.Е., Пахниц А.В., Дерявко И.И.

Филиал «Институт атомный энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе впервые определены теплофизические свойства (удельная теплоемкость, температуропроводность и теплопроводность) натурного кориума быстрого энергетического ядерного реактора в диапазоне температур от комнатной до ~400 °C. Полученные данные предназначены к использованию в расчетах температурных полей при моделировании процессов по удержанию расплава кориума в корпусе ядерного реактора на быстрых нейтронах.

Введение

Исследование теплофизических свойств материалов и топлива ядерного реактора при высоких температурах представляет важную научную проблему, имеющую большую практическую значимость. С практической точки зрения сведения о теплофизических свойствах расплавленной активной зоны реактора (кориума) и отдельных ее составляющих важны для моделирования явлений и процессов, являющихся неотъемлемой частью сценариев гипотетических тяжелых аварий на ядерных реакторах.

Как известно, теплофизические свойства (ТФС) кориума [1–4], полученного в экспериментах, моделирующих тяжелые аварии на ядерных реакторах, являются одними из важнейших характеристик, поскольку информация по ТФС является исключительно полезной для выявления механизмов тяжелых реакторных аварий. Именно поэтому необходимо экспериментальное изучение теплофизических свойств кориума для построения базы данных, которая могла бы быть использована при прогнозировании течения тяжелых аварий, а также в расчетных моделях.

В рамках упомянутых исследований в Институте атомной энергии Национального ядерного центра Республики Казахстан проводятся эксперименты на реакторе ИГР по изучению поведения топлива быстрого энергетического реактора в условиях тяжелой аварии с потерей теплоносителя.

Целью настоящей работы является экспериментальное определение ТФС натурного кориума (затвердевшей смеси диоксида урана и стали) быстрого энергетического реактора, полученного в одном из таких экспериментов на исследовательском реакторе ИГР.

Методика исследований

В качестве материала исследования был выбран слиток натурного кориума, полученного путем облучения экспериментального устройства на реакторе ИГР. Экспериментальное устройство включало в себя тепловыделяющую сборку (ТВС), состоящую из топливных таблеток диоксида урана с обогащением 17 % по ²³⁵U в активной части и 0,27 % по ²³⁵U в бланкетной части. В качестве оболочек твэлов использовались трубки из стали X16H15M3Б.

Измерение теплофизических свойств полученного натурного кориума осуществляли на лабораторной установке УТФИ-2. При определении ТФС использовали методику, описанную в статье [5].

Исследование структуры и элементного состава кориума проводили на растровом электронном микроскопе *JSM-6390* японской компании *JEOL*, оснащенном эноргодисперсионным спектрометром (ЭДС) *JED-2300*.

Рентгеноструктурные исследования кориума проводили на дифрактометре *Empyrean* с управляющей компьютерной системой *Roentgen-Master* с использованием CuK_α-излучения.

Расшифровку рентгенограмм проводили с использованием базы данных Crystallography Open Database (COD). Количественный анализ выполняли с помощью программы *HighScore*.

Результаты исследований и их обсуждение

Анализ дифрактограмм с поверхности образцов выявил в качестве основной кристаллической фазы диоксид урана UO₂ с гранецентрированной кубической решеткой с оценочным параметром решетки a = 0,547 нм (~99 % по массе).

Результатом исследований линий малой интенсивности явилось обнаружение линий фазы на основе феррита α-(Fe, Ni, Cr). Доля металлических включений в образцах по результатам исследований микроструктуры в среднем находилась на уровне 1,5– 2,5 %, значительного разброса доли металлических включений по поверхности образцов не наблюдалось. Элементный анализ включений выявил, что основными элементами их химического состава являются компоненты хромо-никелевой нержавеющей стали в порядке убывания содержания: Fe, Cr, Ni, Mo, Mn.

Структура поверхности образцов характеризовалась наличием пор и трещин. В образцах имелось большое количество трещин, образующих между собой сетку трещин (рисунок 1).

При изучении микроструктуры образцов обнаружены металлические включения с размерами 2– 8 мкм. (рисунок 2), характер распределения которых на разных отметках затвердевшего расплава заметно различался.



а) образец 1



б) образец 2

Рисунок 1. Структура поверхностей образцов, вырезанных из затвердевшего расплава

Для определения элементного состава завтвердевшего расплава был проведен ЭДС-анализ каждого образца. Данные элементного состава в массовых и атомных процентах представлены в таблицах 1 и 2.

Для идентификации элементного состава металлических включений был проведен локальный элементный анализ (рисунок 3 и таблица 3).

Таким образом, методом локального элементного анализа металлических включений определено, что включения преимущественно состоят из хрома и железа, при этом содержание урана составляет около 1 %.

Результаты измерений коэффициентов ТФС образцов натурного кориума в сравнении с результатами калибровочных измерений образца двуокиси урана представлены на рисунке 4. Характер полученных температурных зависимостей коэффициентов ТФС совпадает с температурными зависимостями, полученными для двуокиси урана.



а) образец 1



б) образец 2

Рисунок 2. Металлические включения в микроструктуре образцов при увеличении ×500

Таблица 1. Элементный состав поверхности исследуемых образцов в масс. %.

Образцы	U	Fe	Cr	0	AI	Ni	Ti	Nb
1	86,86	0,84	0,95	9,89	1,24	0,14	0,07	-
2	86,70	0,89	1,03	9,90	1,24	0,16	0,07	0,01

Таблица 2. Элементный состав поверхности исследуемых образцов в атом. %.

Образцы	U	Fe	Cr	0	AI	Ni	Ti	Nb
1	34,22	1,42	1,72	57,98	4,30	0,23	0,14	-
2	34,08	1,49	1,85	57,88	4,30	0,25	0,14	0,01

Таблица 3. Элементное содержание металлических включений в образцах, масс. %.

Области анализа	0	AI	Ti	Cr	Fe	Ni	Nb	U
6.1	-	1,04	0,87	62,04	30,39	3,73	I	1,93
6.2	0,43	0,86	0,66	52,25	38,97	5,42	0,23	1,18
7.1	-	0,62	0,19	29,67	61,47	6,25	0,68	1,12
7.2	-	0,86	0,49	48,70	45,02	4,92	-	0,02



а) образец 1



б) образец 2

Рисунок 3. Локальный элементный анализ металлических включений

Теплоемкость и температурная зависимость теплоемкости образцов совпадают в пределах 3 % для обоих образцов кориума и образца диоксида урана.

Основными отличиями обладают тепло- и температуропроводность образцов кориума, они на 10–15 % ниже, чем у диоксида урана.

Зафиксированные изменения ТФС после нагрева до 400 °C составили для температуропроводности те же 5–10 %. Отличие температуропроводности материала образцов от температуропроводности спеченного диоксида урана в большей степени определяется наличием пористости и трещиноватости, можно предположить, что параметры трещиноватости должны были измениться заметным образом (примерно в два раза) для получения подобного эффекта.

Измерения геометрических размеров и массы образцов не выявили регистрируемых изменений этих параметров в результате испытаний.



Рисунок 4. Сравнение результатов измерений ТФС образцов натурного кориума и спеченного диоксида урана

Заключение

Проведено изучение теплофизических свойств натурного кориума быстрого энергетического реактора, полученного в эксперименте на исследовательском реакторе ИГР. По результатам исследований сделаны следующие выводы:

1. Впервые получены экспериментальные данные по ТФС образцов натурного кориума быстрого реактора в диапазоне температур от комнатной до \sim 400 °C.

2. Показана хорошая воспроизводимость результатов в диапазоне температур от комнатной до 300 °C.

3. Характер полученных температурных зависимостей коэффициентов ТФС образцов натурного кориума совпадает с характером температурных зависимостей, полученных для образцов спеченного диоксида урана.

Литература

- 1. J.K. Fink. Thermophysical properties of uranium dioxide // Journal of Nuclear Materials. 2000. vol. 279. pp. 1-18.
- M. Skakov, N. Mukhamedov, I. Deryavko, et al. Temperature dependence of thermophysical properties of light-water reactor prototype corium // Proceedings of Inter. conf. "Materials and Engineering and Industrial Applications (MEIA)" September 20– 21, 2015. – Hong Kong. – pp. 75–79.
- D.E. Burkes, C.A. Papesch, A.P. Maddison, T. Hartmann, F.J. Rice. Thermophysical properties of DU-10wt.% Mo alloys // Journal of Nuclear Materials. – 2010. – vol. 403. – pp. 160–166.
- M. Skakov, N. Mukhamedov, W. Wieleba, I. Deryavko, Study of corium thermophysical properties of light water reactor with different oxidation degrees of zirconium // Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences. – 2016. – vol. 7(4). – pp. 2018–2024.
- V. Zhdanov, V. Baklanov et al. The Methodology of Determining Heat-Transfer Properties of the Samples of Promising Fuel for Water-Moderated Water-Cooled Power Reactor // Proceedings of Intern. conf. "Nuclear Power of the Republic of Kazakhstan" June 11–13, 2008, Kurchatov, IAE NNC RK. – 2009. – pp. 150–156.

ИГР ЗЕРТТЕУ РЕАКТОРЫНДА АЛЫНҒАН ЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДЫҢ БЕЛСЕНДІ АУМАҒЫНЫҢ МАТЕРИАЛДАРЫНЫҢ БАЛҚЫТПАСЫНЫҢ ҚАСИЕТІ

М.К. Скаков, Н.Е. Мухамедов, А.В. Пахниц, И.И. Дерявко

ҚР ҰЯО РМК «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Жұмыста алғашқы рет шапшаң энергетикалық ядролық реактордың табиғи кориумының ~400 °С дейінгі бөлме температурасында жылуфизикалық қасиеттері (салыстырмалы жылу сыйымдылығы, температура өткізгіштігі жәнежылу өткізгіштігі) анықталған болатын. Алынған деректер шапшаң нейтрондардағы ядролық реактордың корпусында кориум балқытпасын ұстап қалу бойынша үдірісті моделдеу кезінде температура өрістерін есептеуде пайдалануға арналған.

NUCLEAR REACTOR CORIUM PROPERTIES OBTAINED AT IGR RESEARCH REACTOR

M.K. Skakov, N.Ye. Mukhamedov, A.V. Pakhnits, I.I. Deryavko

RSE NNC RK Branch "Institute of Atomic Energy", Kurchatov, Kazakhstan

In the paper for the first time thermophysical properties (specific heat capacity, thermal diffusivity and thermal conductivity) of natural corium of a fast nuclear power reactor were determined in the temperature range from room one up to \sim 400 °C. The obtained data is oriented at use in temperature field calculations when modeling the processes of corium melt retention in fast nuclear reactor vessel.

УДК 621.039

ВНУТРИРЕАКТОРНЫЙ ЭКСПЕРИМЕНТ ПО ИСПЫТАНИЮ ТВЭЛА БЫСТРОГО РЕАКТОРА В УСЛОВИЯХ АВАРИИ С ПОТЕРЕЙ ТЕПЛОНОСИТЕЛЯ

¹⁾ Сулейменов Н.А., ²⁾ Пахниц А.В., ²⁾ Сураев А.С.

¹⁾ ВКГТУ им. Д.Серикбаева, Усть-Каменогорск, Казахстан ²⁾ Филиал «Институт атомной энергии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе исследовано поведение модельного твэла реактора на быстрых нейтронах, с целью изучения влияния бланкетных зон на распределение расплава топлива по активной зоне. Разработана расчетная модель экспериментального устройства, проведены теплофизические расчеты в обоснование безопасности проведения внутриреакторного эксперимента, определена диаграмма изменения мощности реактора, при реализации которой достигнута начальная стадия плавления зон с высоким обогащением топлива. Подготовлен и проведен внутриреакторный эксперимент на КИР ИГР с экспериментальным устройством, оснащенным модельным твэлом реактора на быстрых нейтронах.

Введение

В настоящее время в мире продолжается развитие технологии быстрых реакторов с натриевым теплоносителем. Важной задачей является обеспечение безопасности таких реакторов при различных аварийных ситуациях.

Одним из факторов возникновения аварийной ситуации является нарушение теплосъема в активной зоне реактора, приводящее к росту температуры топлива. Дальнейшая работа твэлов в таком режиме становится причиной кипения теплоносителя и расплавления оболочек твэлов, что приводит к блокировке сечения натриевого теплоносителя. Прекращение циркуляции теплоносителя влечет за собой дальнейший перегрев топлива и его расплавление, образование критической массы топлива, а также возможное разрушение контура теплоносителя и активной зоны (рисунок 1).

Актуальным является получение данных о параметрах протекания таких аварийных ситуаций, что возможно при испытаниях элементов активных зон перспективных реакторов в исследовательских реакторах. Для этой цели в Филиале ИАЭ РГП НЯЦ РК разработано и собрано экспериментальное устройство [1, 2] с модельным твэлом перспективного реактора на быстрых нейтронах. Описание и конструкция устройства приведена ниже.

Описание и конструкция экспериментального устройства

Конструкция экспериментального устройства представлена на рисунке 2. Испытываемый модельный твэл устанавливается в испытательную секцию. Топливный столб твэла состоит из бланкетных зон и зон деления (рисунок 2-д). Для контроля температуры твэл оснащен пятью термопарами, установленными в центре топливного столба верхней зоны деления и на поверхности твэла у каждой зоны.

Для заполнения испытательной секции натрием используется буферная емкость, компенсирующая рост давления в испытательной секции при теплогидравлических ударах во время эксперимента.

Исходя из рабочих параметров теплоносителя рассматриваемого реактора начальная температура натрия на входе в активную зону должна составлять 400 °С, на выходе – 550 °С. Эта задача решается с помощью электрического нагревателя, намотанного на испытательную секцию с различным шагом витков.

В результате нейтронно-физических расчетов было определено расположение твэла относительно ЦАЗ, обеспечивающее требуемый уровень высотного распределения энерговыделения в топливе. Верхний торец топливного столба должен находиться на 120 мм выше ЦАЗ реактора ИГР.



Рисунок 1. Схема процесса разрушения активной зоны ядерного реактора



Рисунок 3. Предварительный разогрев испытательной секции

РАСЧЕТНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПРИ ПОДГОТОВКЕ ЭКСПЕРИМЕНТА

На первом этапе работ, был проведен расчет предварительного разогрева испытательной секции [3], необходимого для обеспечения требуемого высотного распределения температуры натриевого теплоносителя.

Расчет проводился с помощью трехмерной расчетной модели (рисунок 3-а), разработанной с использованием программного пакета ANSYS [4]. Модель включает в себя буферную емкость натрия, трубопровод подачи натрия и испытательную секцию, состоящую из твэла, тракта охлаждения твэла, внутренней и внешней трубы корпуса испытательной секции, тракта охлаждения испытательной секции, входного и выходного патрубка натрия. Условия расчета и принятые допущения:

 начальная температура всех элементов расчетной модели составляет 293 К;

 на внешних поверхностях корпуса буферной емкости, трубопровода подачи натрия и внешней трубы корпуса испытательной секции задан тепловой поток, имитирующий процесс работы электронагревателя, в соответствии с коэффициентами плотности теплового потока, указанными на рисунке 3-а;

 диаграмма изменения мощности нагревателей в расчете (рисунок 3-б) соответствует диаграмме изменения мощности нагревателей в эксперименте;

 теплопередача в элементах конструкции осуществляется за счет теплопроводности и конвективного теплообмена; для моделирования фазового перехода в теплофизических свойствах натрия была учтена скрытая теплота плавления [5];

 по высоте расчетной модели учтено действие сил гравитации;

 на внешних поверхностях модели конвективный теплообмен с окружающей средой отсутствует;

- масса натрия в модели составляет около 0,3 кг.

В результате расчета получен график изменения температуры в элементах испытательной секции (рисунок 4).

Расчет процесса заполнения натрием трубопровода подачи и тракта охлаждения твэла испытательной секции представлен на рисунке 5.



Рисунок 4. Изменение температуры в элементах испытательной секции



Рисунок 5. Моделирование процесса заполнения натрием испытательной секции

На момент окончания реализации диаграммы изменения мощности нагревателей получено высотное распределение температуры в модели (рисунок 6).

На следующем этапе проведен теплогидравлический расчет теплового состояния твэла при реализации диаграммы изменения мощности реактора ИГР (рисунок 7-а). Полученное распределение температуры имеет следующий вид (рисунок 7-б).

В ходе расчета определено, что при реализации диаграммы изменения мощности (рисунок 7-а) температура в зонах деления достигает температуры плавления топлива.









 а) диаграмма изменения мощности реактора ИГР при проведении эксперимента

б) распределение температуры твэла на 42 с от начала реализации диаграммы изменения мошности

Рисунок 7. Теплогидравлический расчет теплового состояния твэла



Рисунок 8. Сравнение расчетных и экспериментальных данных с термопар

ОБЗОР РАСЧЕТНЫХ И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ Данных с термопар испытываемого твэла

После проведения исследовательского пуска с испытываемым твэлом были получены экспериментальные данные с термопар, установленных в твэле (рисунок 8).

По результатам проведенного исследовательского пуска с ЭУ следует, что:

 с 21-ой секунды начинается кипение натрия у верхней зоны деления;

 на 26–28 с температура оболочки твэла выходит за пределы измерения термопар (~1500 К), что позволяет судить о возможном плавлении оболочки твэла;

 до момента превышения температуры элементов твэла предела измерения термопар наблюдается совпадение экспериментальных данных с расчетными;

– исходя из совпадения экспериментальных данных с расчетными, можно сказать, что на 32 се-

Литература

- 1. Устройство экспериментальное ПК: пояснительная записка: АК. 21286.00.000ПЗ / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК; утв. В.В. Яковлев – Курчатов, 2017.– инв. №К-54002 от 27.06.2017.
- Подготовка реакторных экспериментов по изучению тяжелой аварии быстрого реактора с натриевым теплоносителем / В.А. Витюк, А.Д. Вурим, В.М. Котов, Г.А. Витюк, Д.С. Иданова // Труды VIII Международной научно-практической конференции «Физико-технические проблемы в науке, промышленности и медицине, Томск, 1-3 июня 2016 года».– Томск: ТПУ, 2016.– С. 29–30.
- Анализ условий безопасного проведения испытаний экспериментального устройства ПК: технический отчет о научноисследовательской работе от 20.09.2017 инв. №11-220-01/1497вн / Филиал ИАЭ РГП НЯЦ РК; утв. А.Д. Вурим. – Курчатов, 2017.
- ANSYS release 14.5 Documentation for ANSYS WORKBENCH [Электронный ресурс]: ANSYS Inc. Электрон. дан. и прогр. – [Б. м.], 2014.
- 5. Чиркин, В.С. Теплофизические свойства материалов ядерной техники / В.С. Чиркин. М.: Атомиздат, 1968. 121–128, 291–294, 237–239 с.

кунде от начала эксперимента происходит плавление верхней зоны деления ~2920 К;

 на момент окончания реализации диаграммы эксперимента получена картина, о характере протекания аварии на ранних стадиях ее развития в быстром реакторе с натриевым теплоносителем.

Заключение

По итогам проведенного внутриреакторного эксперимента были получены результаты измерений температуры элементов экспериментального устройства от установленных термоэлектрических преобразователей. Выполнен анализ и верификация расчетных кодов по полученным экспериментальным данным. В результате получена сходимость результатов расчетов с данными эксперимента, что свидетельствует о правильном выборе методики выполненных расчетов. Полученные результаты имеют практическую значимость при обосновании безопасности современных и концептуальных проектов АЭС с реакторами на быстрых нейтронах.

ЖЫЛУ ТАСЫҒЫШ ЖОҒАЛУ ШАРТЫНДА ӨТКІЗІЛЕТІН ЖЫЛУШЫҒАРҒЫШ ЭЛЕМЕНТТІҢ СЫНАУ БОЙЫНША РЕАКТОРІШІЛІК ЭКСПЕРИМЕНТІ

¹⁾ Н.А. Сулейменов, ²⁾ А.В. Пахниц, ²⁾ А.С. Сураев

¹⁾Д. Серикбаев атындагы ШҚМУ, Өскемен, Қазақстан ²⁾ КР ҰЯО РМҚ «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Осы мақалада реактордың белсенді аймағында ядролық отын балқытпасының таратылуына бланкеттік жерлердің әсерін білу үшін жылдам реактордың жылушығарғыш элементтің қылығы зерттелген. Эксперименттік құрылғының есеп үлгісі әзірленген, реакторішілік экспериметтің қауіпсіздік өткізілу үшін жылуфизикалық есептер орындалған, отынның жоғары байыту жерлерінің бастапқы балқуына жететін реактор қуатын өзгерту кестесі белгіленген. ИГР зерттеу реактор кешенінде үлгілік жылушығарғыш элементімен жабдықталған эксперименттік құрылғысының реакторішілік эксперименті дайындалып өткізілген.

IN-REACTOR EXPERIMENT FOR THE TESTING OF A FAST-REACTOR PILE IN THE CONTIDIONS OF LOSS-OF-COOLANT ACCIDENT

¹⁾ N.A. Suleimenov, ²⁾ A.V. Pakhnits, ²⁾ A.S. Suraev

¹⁾ VKGTU them. D. Serikbaeva, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan ²⁾ RSE NNC RK Branch «Institute of Atomic Energy", Kurchatov, Kazakhstan

In this paper, the behavior of a model nuclear fuel element of a fast neutron reactor was studied in order to study the effect of blanket zones on the distribution of fuel melt throughout the reactor core. A computational model of the experimental device has been developed, thermophysical calculations have been carried out to substantiate the safety of the in-reactor experiment, a diagram of reactor power has been determined, the implementation of which reached the initial stage of melting zones with high fuel enrichment. An in-reactor experiment on a IGR RRC with an experimental device equipped with a model fast-neutron fuel element was prepared and carried out.

УДК 546.621.631

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ФУЛЛЕРЕН-СОДЕРЖАЩИХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ СОРБЦИОННОЙ ОЧИСТКИ ПОЧВ

Муратов М.М., Габдуллин М.Т., Хамитова К.К., Исмаилов Д.В., Керимбеков Д.С., Черноштан А.В., Султангазина М.Н.

Национальная нанотехнологическая лаборатория открытого типа, Казахский национальный университет имени аль-Фараби, Алматы, Казахстан

В последнее время в качестве сорбентов находят применение углеродные материалы, содержащие фуллерены. Целью исследования служило изучение и сравнение сорбционных свойств по отношению к ионам тяжелых металлов фуллеренсодержащих материалов. Это позволит выбрать наиболее эффективный способ получения фуллеренсодержащих сорбентов для использования в процессах очистки объектов окружающей среды. Для нашего исследования были отобраны несколько видов сорбентов полученные из шунгита и графита. Результаты показали, что фуллеренсодержащие сорбенты связывают значительную часть загрязнителей и снижают токсичность почвы. Тем не менее, полной очистки от металлов не наблюдается. Полученные результаты являются основой для дальнейшего изучения сорбционных свойств углеродных наноматериалов и имеют практическое значение в области нанотехнологий, экологии, экотоксикологии, химической технологии неорганических веществ и др.

Введение

За последние 100 лет скорость развития технологий и промышленности увеличилась в несколько раз, что привело к колоссальному росту числа предприятий по всему миру. Очевидно, что с увеличением объемов производства всевозможных товаров растет и техногенное воздействие, оказываемое человечеством на окружающую среду, что приводит к ряду экологических изменений, некоторые из которых уже давно оказывают влияние не только на локальном, но и на мировом уровне.

Одним из результатов активного промышленного воздействия на регион становится накопление тяжелых металлов в окружающей среде, содержание которых нередко во много раз превосходит предельно допустимый уровень. Чаще всего данная проблема связана с недостаточно совершенными технологиями и методами очистки отходов предприятия, которые при попадании в окружающую среду, а главным образом в воду и почву, приводят к ее загрязнению и отравлению. К регионам, наиболее подверженным загрязнению тяжелыми металлами, относятся города и крупные промышленные районы в связи с активной деятельностью тепловых электростанций и автомобильного транспорта. Особо губительное воздействие оказывают золоотвалы, образующиеся в результате деятельности ТЭЦ, так как зола может разноситься ветром на многие километры вокруг, оказывая пагубное влияние на водоемы, реки и почву [1].

Тяжелые металлы являются одним из самых вредных видов загрязнений и, согласно государственным стандартам, занимают второе место по степени опасности, уступая лишь пестицидам. К ним относятся такие элементы как: ванадий, германий, марганец, фтор, никель, цинк, молибден, стронций, ртуть, свинец и др. – в целом, более 40 элементов таблицы Менделеева [2]. В настоящее время негативное воздействие тяжелых металлов не учитывается в полной мере по сравнению с радиоактивными веществами. Поэтому в перспективе они могут стать более опасными из-за избыточного накопления в средах и дестабилизировать экосистемы различных территорий и планеты в целом.

Почва является естественной средой, в которую попадают тяжелые металлы, в том числе из атмосферы и водной среды. Она служит источником вторичного загрязнения приземного воздуха и вод, попадающих из нее в Мировой океан [3]. Из почвы тяжелые металлы усваиваются растениями, которые затем попадают в пищу ввиду увеличения антропогенной нагрузки на почвы, вопрос о быстром и эффективном способе очистке почв от различных загрязнителей является актуальным и открытым. Поэтому большое внимание уделяется поиску универсальных средств очистки почв от загрязняющих веществ природного и техногенного происхождения.

Обзор углеродных сорбентов

Пористые материалы, обладающие высокой удельной поверхностью, используют в качестве сорбентов для широкого ряда веществ. Наибольшую популярность набирают углерод – минеральные сорбенты. Среди них наиболее эффективным способом очистки природных сред от тяжелых металлов выделяют такие углеродные сорбенты, как активированные угли, шунгит, а также внимание уделяется другим фуллеренсодержащим материалам.

Шунгит – это минерал, представляющий собой окаменевшие донные отложения с высоким содержанием углерода в виде фуллеренов - сферических молекулярных структур - в объеме от 0,0001 до 0,001 масс. %. По своей природе шунгит - не что иное как промежуточный продукт тектонических геологических процессов между аморфным углеродом и кристаллическим графитом [4]. Шунгит используется как сорбент в очистке воды и воздуха от органических и неорганических соединений. Также известны его это окислительные свойства, что делает его природный антиоксидантом. Благодаря своим каталитическим свойствам, обеспечивающим разложение адсорбированных органических веществ, возможности восстанавливать сорбционные свойства и способности к переносу широкого спектра микроэлементов и биологически активных веществ, способствующих усилению биологических процессов, есть перспективы использования шунгита как катализатора и энтеросорбента в организме человека и животных. Достаточно полно изучены свойства этого материала, активно взаимодействующего с различными электромагнитными полями (антропогенными высокочастотными, солнечными, геопатогенными, биополями) и снижающее их негативное воздействие, позволяет его использовать в средствах индивидуальной или коллективной защиты [5].

Шунгит относят к ионообменным сорбентам. Кристаллы тонкомолотого шунгита имеют ярко выраженные биполярные свойства благодаря преобладающих в нем процессов ионного обмена - у кристаллов высокий уровень адгезии, благодаря чему способны смешиваться с самыми разными веществами. Кроме этого, шунгит способен адсорбировать не только ионы металлов и различных органических веществ, но и живых существ - бактериальные клетки и патогенных сапрофитов, что связано со структурой его молекул, а именно с молекулами фуллеренов. Углерод в фуллеренах равномерно распределяется в каркасе из мелкодисперсных кристаллов кварца размером 1-10 мкм, что было показано исследованиями ультратонких пластин шунгита с помощью растрового электронного микроскопа с высоким пространственным разрешением (до 0,4 нм) [6].

В научных экспериментах [7] очистка воды шунгитовым сорбентом осуществляется благодаря ионному обмену – одному из видов сорбции ионов, при котором происходит выделение иона из сорбента при поглощении иона из воды. При этом ион, который необходимо адсорбировать из воды, осаждается на сорбенте. Таким образом происходит «замещение» ионов. Так, опытным путем через адсорбцию тяжелых металлов из модельных растворов для шунгита был определен ряд (по убыванию поглощения): Zn > Cu > Ni > Pb > Co.

Согласно исследованию [8] обратное вымывание токсичных элементов из используемых сорбентов в водные растворы не наблюдается. Эксперименты на дафниях и водорослях, используемых в качестве биоиндикаторов ввиду имеющейся чувствительности к загрязнителям, подтвердили, что очищенная сорбентом вода не содержит токсичных соединений.

Большие возможности для использования шунгита в промышленности открываются благодаря наличию в нем фуллереноподобных молекул – фуллеренов. Так, это открывает перспективы для его использования в машиностроении, при производстве различных минеральных добавок и смазочных материалов, в строительстве в качестве кирпича и(или) композита в штукатурных смесях, а также при создании экранирующих помещений, для защиты от воздействия излучений, в электроснабжении, для изготовления красок с электропроводящей поверхностью и др. При этом остается чрезвычайно низкий процент содержания фуллеренов в шунгите, что создает препятствия для настоящего использования и открывает перспективы в изобретении новых технологий обработки и увеличения количества фуллеренов [9].

Сейчас возможно получение синтетических фуллеренов на основе графитовых стержней. Одной из важных особенностей фуллеренов является особое расположение атомов углерода в вершинах молекул, основывающих правильные фигуры. Они образуют правильные многоугольники, полые внутри, способные к переносу внутри различных ионов. Если представить, что в вершинах этого многогранника находятся атомы углерода, то мы получим самый стабильный фуллерен С60. Со времени открытия фуллерена С60 и, особенно, со времени разработки методов получения его в макроколичествах, органическая химия фуллерена приобрела невиданную популярность и превратилась в самостоятельную ветвь. На основе фуллеренов уже синтезировано более 3 тысяч новых соединений. Комбинация фуллерена с представителями множества известных классов веществ открыла для химиков – синтетиков возможность получения многочисленных производных этого соединения [10, 11].

Фуллерены имеют большое значение в будущем для использования в таких сферах, как нанотехнологии, микроэлектроника, космическая и военная отрасли, в машиностроении, производстве различных технических изделий, в металлургии - в производстве сталей и сплавов, строительстве (огнеупорные материалы), изготовлении красок и тонкодисперсных порошков. Возможно также использование фуллеренов в очистке воды. Однако, основное препятствие для использования фуллеренов, например, в медицине и косметологии - это их токсичность, вследствие обработки графитовой сажи бензолом. Опубликованные к настоящему времени результаты исследований влияния фуллеренов и их производных на растительный организм малочисленны и противоречивы [12-20]. Было показано, что фуллерен С60 в концентрации 500 мг/кг редуцирует прирост биомассы проростков кукурузы и сои. Установлен также ингибиторный эффект одной из водорастворимых форм фуллерена [C70(C(COOH)2)4-8] В концентрации 0,005-0,02 мг/мл на рост проростков арабидопсиса. С другой стороны, полигидроксилированный фуллерен [С60(ОН)20] стимулирует прорастание семян, накопление биомассы, а также увеличивает содержание противоопухолевых и антидиабетических соединеинсулина в тканях тропической лианы ний

Мотогдісасharantia [12, 13]. Данные противоречия могут быть обусловлены как видоспецифичностью к действию фуллеренов и физиологическим состоянием исследуемых растений, так и особенностями химической структуры и концентрацией используемых наночастиц. В результате проведенных исследований было установлено, что фуллеренол [C60(OH)24] стимулирует скорость прорастания семян ячменя [20]. Прирост биомассы этиолированных проростков фуллеренол может стимулировать преимущественно за счет активации процесса поступления воды [19, 20].

Между тем, несмотря на широкий интерес к фуллеренам в различных областях, изучение сорбционных свойств по отношению к ионам металлов проводится мало.

Целью исследования служило изучение и сравнение сорбционных свойств по отношению к ионам тяжелых металлов фуллеренсодержащих материалов. Для этого были выделены следующие **задачи**:

 произвести в лабораторных условиях загрязнение модельных образцов почвы солями цинка и свинца известной концентрации;

2) сделать сравнительный анализ сорбционной эффективности различных видов фуллеренсодержащих углеродных сорбентов.

Материалы и методы

Одним из основных направлений научных исследований Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа (ННЛОТ) при КазНУ им. аль-Фараби является создание новых видов материалов на основе углеродных наноструктур, в частности фуллеренов, а также их применение. Командой высококвалифицированных ученых ННЛОТ была создана и разработана методика по получению фуллеренов для практического применения в различных отраслях науки. Была запущена малотоннажная установка по производству фуллеренов на основе дугового метода в среде гелия.

Для нашего исследования были отобраны следующие виды сорбентов: исходная шунгитовая руда (Ши) (ВКО, месторождение Бакырчик), шунгитовый концентрат после процесса флотации (Шф), готовый шунгитовый сорбент (Шс), фуллереновая сажа (Ф), березовый активированный уголь (БАУ) и аптечный активированный уголь (АУ).

Фуллереновая сажа образовалась путем сжигания графитового стрежня в реакторе по синтезу фуллеренов, функционирующего в Национальной нанотехнологической лаборатории открытого типа.

Эксперимент проводили на почвенных вытяжках, обработанных сорбентами. Для этого было осущест-

влено модельное загрязнение почвы соединениями тяжелых металлов. Были взяты соединения цинка (хелат цинка 22 %) и свинца (свинец уксуснокислый 3-водный) ввиду их высоких концентраций в почвах и природной воде.

После интенсивного перемешивания почва была оставлена на 2 недели под вытяжкой для испарения лишней воды. Далее загрязненная почва была разделена на 6 образцов. В каждый образец было добавлено по одному сорбенту: шунгитовая руда, шунгит флотоконцентрированный, шунгитовый сорбент, березовый и аптечный активированный уголь в соотношении 1:10 (4 г на 40 г почвы) и фуллереновая сажа (0,25 г на 40 г сухой почвы).

Через неделю 10 г каждого образца почвы смешали с 50 мл воды, прокрутили на центрифуге и отфильтровали. Затем проводили анализ на общее содержание солей тяжелых металлов на титраторе *Mettler Toledo G20*.

Наиболее эффективным сорбентом в извлечении ионов цинка показал себя АУ, далее ряд по убыванию: АУ – Шф — БАУ- Шс – Ф – Ши. Наилучшая эффективность в сорбции ионов свинца наблюдается у Шф, далее по убыванию: Шф-БАУ – АУ– Ф – Шс – Ши.

Изучение токсичности почвы методом биотестирования было проведено тест-анализом на семенах редиса (Raphanus sativus L.). Семена редиса были замочены в почвенных вытяжках с каждого образца на сутки. После чего были оставлены прорастать на тройном слое фильтровальной бумаги в теплом месте с небольшим количеством воды.

Через неделю произвели подсчет семян, у которых появились ростки, т.е. всхожесть семян. Почва считается токсичной, если процент всхожести семян меньше контрольного на более 20 %. Общее количество всхоженных семян в относительно чистой почве мы приняли за 100 %. На основании данной цифры, мы просчитали количество всхожести семян в других образцах. Таким образом почва стала менее токсична при воздействии флото-концентрированного шунгита, активированного угля и фуллереновой сажи (рисунок 1).

Далее провели эксперимент по проращиванию семян редиса *Raphanus sativus* в субстратах в небольшом парнике. Через две недели начали подсчет проростков и их длину. Содержание токсичных элементов в почве влияет также на длину проростков, снижая их длину в два и более раз. По результатам опыта видно, что снижение токсичности наблюдается при введении шунгитового сорбента, активированного угля и фуллереновой сажи.



Рисунок 1. Всхожесть семян редиса в почвенных вытяжках, загрязненных соединениями цинка (a) и свинца(б), % от контроля



Рисунок 2. Энергия прорастания Raphanus Sativus в почвах, содержащих цинк (а) и свинец (б)

Выводы

1. Результаты показали, что материал из фуллереновой сажи на ряду с известными углеродными сорбентами обладает хорошими сорбционными свойствами. Фуллеренсодержащие сорбенты связывают значительную часть загрязнителей и снижают токсичность почвы. Тем не менее, полной очистки от металлов не наблюдается.

2. Необходимо учитывать, что в исследуемой саже содержание смеси чистых фуллеренов составляет только 4 %. Для увеличения сорбционной способности необходимо производить дальнейшую очистку сажи от примесей, но уже без традиционного применения токсичных элементов (бензол, толуол). Поэтому, на сегодняшний день ННЛОТ работает в данном направлении.

3. Полученные результаты являются основой для дальнейшего изучения сорбционных свойств углеродных наноматериалов и имеют практическое значение в области экологии, экотоксикологии, химической технологии неорганических веществ, а также имеют перспективы развития в области радиоэкологии.

Литература

- 1. Сакиева З.Ж., Крамбаева А.А Уровень загрязнения почв тяжелыми металлами в РК // Вестник КазНТУ. 2015. №4.
- 2. Бингам Ф.Т., Коста М., Эйхенбергер Э. Некоторые вопросы токсичности ионов металлов. М.: Мир, 1993. 368 с.
- 3. Антонова Ю.А., Сафонова М.А. Тяжелые металлы в городских почвах. // Фундаментальные исследования. 2007. №11. С. 43–44.
- 4. Мосин О.В., Игнатов И.И., Природный фуллеренсодержащий минерал шунгит в производстве строительных материалов // Строительные материалы, оборудование, технологии XXI века. – 2013. – №12. – С. 28–31.
- 5. Подчайнов С.Ф. Минерал цеолит умножитель полезных свойств шунгита. ООО «Прицеро П», Москва. 2015. 380 с.
- 6. Хромушин В.А., Честнова Т.В., Платонов В.В., Хадарцев А.А., Киреев С.С. Шунгиты, как природная нанотехнология (обзор литературы) // Вестник новых медицинских технологий, электронный журнал. 2014. №1.
- 7. Лось С.Л., Прохоренко Ф.В., Анищенко Л.Н., Борздыко Е.В., Дополнительная очистка питьевых вод синтетическими и природными веществами // Современный ученый. М. 2017. С. 21–25.
- 8. Панов П.Б, Калинин А.И., Сороколетова Е.Ф., Кравченко Е.В., Плахотская Ж.В., Андреев В.П., Использование шунгитов для очистки питьевой воды // Сибирский экологический журнал. 2014. № 3. С. 485–492.
- 9. Мосин О. В. Новый природный минеральный сорбент шунгит // Сантехника. 2011. № 3. С. 34–36.
- Соколов В. И., Станкевич И. В. Фуллерены новые аллотропные формы углерода: структура, электронное строение и химические свойства // Успехи химии. – 1993. – Т 62. – С. 455.
- 11. Трошин, П. А. Органическая химия фуллеренов: основные реакции, типы соединений фуллеренов и перспективы их практического использования / П. А. Трошин, Р. Н. Любовская / Успехи химии. 2008. Т. 77, № 4. С. 47–56.
- 12. Синяшин, О.Г. Романова И. П. Органические акцепторы на основе производных [60] фуллерена (аналитический обзор) // Вестник РФФИ. 2004. V. 4, № 38. С. 29–65.
- 13. Караулова, Е.Н., Багрий Е.И. Фуллерены: методы функционализации и перспективы применения производных // Успехи химии. 1999. Т. 68, № 11. С. 979 99.
- Ruoff, R.S. Solubility of fullerene C60 in a variety of solvents / R.S. Ruoff, D.S. Tse, M. Malhotra, D.C. Lorents // J. Phys. Chem. - 1993. - V. 97. - P. 3379-3383.
- 15. Скворцевич, Е. Г., Романов Р. В., Стурлис О. В. Биологические эффекты наноструктур углерода // Вестник Санкт-Петербургского университета. Сер. Биология. – 2009. – № 1. – С. 114–120.
- 16. Krustic, P. J., Wasserman E., Keizer P. N. Radical reactions of C60. // Science. 1991. V. 254. P. 1183-1185.
- 17. Buseck P.R., Tsipursky S.J., Hettich R. Fullerenes from the eological Environment. // Science. 1992. 257. P. 215-217.
- Husen, A. Carbon and fullerene nanomaterials in plant system / A. Husen, K. S. Siddiqi //Journal of Nanobiotechnology. 2014. – V. 12. – P. 16–26.
- 19. Юрин В.М., Молчан О.В. Наноматериалы и растения: взгляд на проблему// Труды БГУ. 2015. Т10. С. 9–22.
- Молчан О.В., Обуховская Л.В., Реуцкий В.Г. Влияние фуллеренола на прорастание семян, содержание фенольных соединений и их антирадикальную активность в проростках ячменя // Труды БелГУ. Серия «Физиологические, биохимические и молекулярные основы функционирования биосистем». – 2014. – Т. 9. – С. 56–61.

ТОПЫРАҚ ҚҰРАМЫНАН АУЫР МЕТАЛДАР ИОНДАРЫН СОРБЦИЯЛАУ ҮШІН ФУЛЛЕРЕНҚҰРАМДАС МАТЕРИАЛДАРДЫ ПАЙДАЛАНУ

М.М. Муратов, М.Т. Габдуллин, К.К. Хамитова, Д.В. Исмаилов, Д.С. Керимбеков, А.В. Черноштан, М.Н. Султангазина

Ашық түрдегі ұлттық нанотехнологиялық зертхана,

әл-Фараби атындағы Қазақ Ұлттық университеті, Алматы, Казахстан

Сонғы уақытта құрамында фуллерен бар коміртек материалдар сорбенттер ретінде пайдаланылады. Ауыр металдар иондарына қатысты фуллеренқұрамдас материалдардың сорбциялық қасиеттерін тереңдетіп зерделеу және салыстыру зерттеу мақсаты болып табылады. Бұл қоршаған ортаны тазалау процесінде пайдалану үшін фуллерен бар сорбенттерді алудың ең тиімді әдісін таңдауға мүмкіндік береді. Біздің зерттеулеріміз үшін шунгит пен графиттен алынған бірнеше сорбенттер таңдалды. Нәтижесінде фуллерен бар сорбенттер ластаушы заттардың едәуір бөлігін байланыстырып, топырақтың уыттылығын төмендететінін көрсетті. Дегенмен, металлдардан толық тазарту байқалмайды. Алынған нәтижелер көміртегі наноматериалдарының сорбциялық қасиеттерін әрі қарай зерделеу үшін негіз болып табылады және нанотехнология, экология, экотоксикология, бейорганикалық заттардың химиялық технологиясы салаларында практикалық құндылығы бар және т.б.
USE OF FULLERENE-CONTAINING MATERIALS FOR THE SORPTION OF HEAVY METALS IONS FROM ENVIRONMENTAL MEDIA

M.M. Muratov, M.T. Gabdullin, K.K. Khamitova, D.V. Ismailov, D.S. Kerimbekov, A.V. Chernoshtan, M.N. Sultangazina

National nanotechnology laboratory of open type, Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Recently, carbon materials containing fullerenes have been used as sorbents. The purpose of the study was to explore and compare the sorption properties with respect to heavy metal ions of fullerene-containing materials. This will allow choosing the most effective way of obtaining fullerene-containing sorbents for use in processes of cleaning of environmental objects. For our research, several types of sorbents obtained from shungite and graphite were selected. The results showed that fullerene-containing sorbents bind a significant part of pollutants and reduce the toxicity of the soil. Nevertheless, complete purification from metals is not observed. The obtained results are the basis for further studying the sorption properties of carbon nanomaterials and are of practical importance in the field of nanotechnology, ecology, ecotoxicology, chemical technology of inorganic substances and other.

ADAPTATION PROCESSES IN BIOCOENOSES OF CONTAMINATED PLOTS OF THE SEMIPALATINSK TEST SITE

R.P. Plisak, S.V. Plisak

RGO Institute of Botany and Phytointroduction KN MES RK, Almaty, Kazakhstan

The article presents results of adaptation processes of main types of ecosystems (steppe, meadow, halophytic) and various types of disturbed ecosystems territories of the Semipalatinsk test site (STS). It was found that radiation pollution provokes change of morphological and anatomical structure of plants and leads to formation of some adaptation signs. Formation of adaptation signs of perennials and shrubs is expressed more clearly. Change of morphological and anatomical structure of plants happens more often in meadow (mesophyte) communities and at disturbed areas.

Radiation, as an environmental factor, causes in plants the formation of adaptive signs: changes in growth, development and reproductive function. A plant, like any biological system, adapts to a changing habitat by acquiring adaptive characteristics.

Radiosensitivity of plants depends on their cytological, biological and genetic characteristics, chemical composition and peculiarities of physiological processes. Ionizing training provokes growth retardation, loss of reproductive functions, and sterilization of pollen. Radionuclides, in combination with other ecological factors, cause significant changes in the vegetation cover. There comes a change in the species composition of communities, a change in their structure and biomass, coverage, stratum, direction and speed of successions.

The objects of research are the three main types of ecosystems (steppe, meadow, halophytic) territories of the Semipalatinsk Test Site (STS), formed at the power exposure dose (PED) $10-20 \mu$ R/h and 30-170 (200) μ R/h, as well as various types of disturbed ecosystems PED ($10-20 \mu$ R/h) and $120-1600 \mu$ R/h.

Investigations of widespread zonal (steppe) ecosystems were conducted at the test site "Experimental field". The territory of the test site is the most polluted area at STS. Main polluters of the territory are longliving radionuclides Cs^{137} , Sr^{90} , $Pu^{239,240}$. Content of Cs^{137} is 819 Bq/kg and $Am^{241} - 12$ 386 Bq/kg in surface soil layer.

Investigated ecosystems occupy even gently sloped or flat plains between hills. Soil forming rocks are deluvial-proluvial sandy-skeleton sediments. Soils are light chestnut loamy or light loamy and rare – loamy sandy. They are characterised by not great depth of humus layer (till 30 cm), not great content of humus (till 3.0 %) and sufficient content of potassium and calcium. Soils develop in unfavourable hydrothermal conditions. Type of water regime is leaching. Supply of organic matters is insignificant. Moistening of zonal soils does not exceed 250–300 mm per year in conditions of decertified steppes. Shortage of moistening does not promote significant moving of hot particles or watersoluble ions of radioactive elements.

The main technogenic polluters of the investigated soils are Am^{241} – till 12 386 Bq/kg at the polluted plot

and 13 Bq/kg at the control plot, Eu^{152,154} – 3 Bq/kg at the polluted plot and <1.4 Bq/kg at the control plot, Cs¹³⁷ – 53 Bq/kg at the polluted plot and 29 Bq/kg at the control plot. High concentration of Am²⁴¹ is evidence of soil pollution by α -irradiators. Their content exceeds all permissible limits. Among β -irradiators (Sr⁹⁰, Cs¹³⁷, Co⁶⁰, Eu^{152,154}) high concentration of Eu^{152,154} – 1 957 Bq/kg was revealed. The highest content of radionuclides is marked in surface soil layer (0–2 cm, 0–3 cm). It sharply decreases in lower soil horizons.

Radiation pollution did not affect physical and chemical properties of soils. Part of surface soil layer was removed under decontamination of the territory of test site "Experimental field". It led to reduce of humus layer depth.

At present radioecological conditions following peculiarities of development of investigated xerophyte communities of *Stipa sareptana* + *Artemisia marschalliana* + *A. sublessingiana* + *Festuca valesiaca* (PED 150–170 μ R/H) and of *Stipa sareptana* + *Artemisia sublessingiana* + *A. marschalliana* + *Festuca valesiaca* (PED 10 μ R/H) were revealed:

1. No significant difference in species and ecobiomorphological composition at the polluted and control plots was revealed. Presence of *Ceratocarpus arenarius* at the polluted plot is evidence of strong anthropogenic influence on the territory.

2. Horizontal structure of the investigated community at the polluted plot is more heterogeneous than at the control plot. It is conditioned by continuation of the process of vegetation restoration after destruction by nuclear explosions and taking away of surface soil layer (decontamination of the territory) at the polluted plot. Because of the same reasons degree of total coverage and quantity of species in the community is lower at the polluted plot. Radiation pollution impact on vertical structure of the communities was not revealed.

3. Stimulation of growth of *Stipa sareptana*, increase of average weight of the plant and monocotyledonous plants were revealed at the polluted plot. Overground biomass is correspondingly higher due to the weight of monocotyledonous plants. It is 74.4 % of overground biomass.

4. Radioactive contamination provoked phenologycal displacement of some plants in the investigated community. Reproductive phase of *Artemisia marschalliana* and *A. sublessingiana* started earlier at the polluted plot.

5. Radioactive contamination provoked teratological transformations of *Spiraea hypericifolia*, *Artemisia marschalliana* and *Phlomis tuberosa*.

6. Decrease of rate of decomposition of organic matter in the investigated community was revealed at the polluted plot.

Investigations of meadow ecosystems were conducted in valleys of small rivers of low mountain massif Degelen. The main polluters of the territory are Cs¹³⁷, Sr⁹⁰ and to the smaller extent Am²⁴¹, Co⁶⁰, Eu^{152,154}.

Investigated ecosystems (mesophyte communities developing on meadow soils) develop in low flood-lands and depressions of valley of small river and springs. According to moistening regime meadow soils are in conditions of sufficient or surplus moistening (ground supply and surface moistening). According to soil texture medium loamy and heavy loamy modifications of soil prevail. The heavier soil texture and even distribution of granulemetric elements by vertical profile are typical for soils of polluted plots. It conditions high capacity of cation exchange in soil layer of 0-50 cm. High content of humus (up to 19%) and significant depth of humus horizon (up to 65 cm) are typical for meadow soils. The main polluters of considered meadow soils are Cs¹³⁷-till 3 166 Bq/kg at the polluted plot (till 111 Bq/kg at the control plot). Mainly surface soil layer (0-10 cm) of meadow soil is polluted by radionuclides. Pollution of technogenic radionuclides reaches background values at a depth of 30-50 cm. Surplus moistening of considered meadow soils promotes increase of humus content and dilution of concentration of technogenic radionuclides. It occurs at the expense of their additional dissolution under acidulation of soil solution by organic acids. Factors mentioned above promote radionuclide (Cs¹³⁷, Sr⁹⁰, Co⁶⁰, Pu^{239,240}) absorption by soil. They intensify mobility of radionuclides in system of soil-soil solution.

Following peculiarities of development of the investigated communities of *Calamagrostis epigeios* + *Galatella biflora* + *Sanguisorba officinalis* (PED 150 μ R/H and 10 μ R/H) in present radioecological conditions were revealed:

1. Significant differences in ecobiomorphological composition of plants constituting investigated communities at the polluted and control plots were not revealed.

2. Species diversity is significantly greater at the polluted plot. But it is not possible to separate impact of radiation pollution from impact of other anthropogenic factors in hydromorphous ecosystems. In this case they are: 1) surplus moistening; 2) influence of annual burning out of herbage; 3) demilitarisation of adits conditioned decrease (or decease) of water outflow from the adits. These reasons provoked significant difference in

composition of accompanying species in the communities at the polluted and control plots.

3. Horizontal structure of the investigated community is heterogeneous at the polluted plot. But at the polluted plot heterogeneity of the structure is intensified by influence of above mentioned factors. Besides that, soil surface layer is disturbed in the investigated community on numerous areas. Radiation pollution impact on vertical structure of the communities was not revealed.

4. Growth stimulation of *Calamagrostis epigeios*, *Galatella biflora*, *Sanguisorba officinalis* is revealed at the polluted plot. Weight of one individual of the plants is increased. Weight of monocotyledonous and dicotyledonous plants and correspondingly weight of overground biomass is higher at the polluted plot. At the case range of factors (soil texture, salinization of surface soil layer, presence of carbonates and so on) affects development of overground biomass. But the most important factor is conditions of moistening. They were more favourable at the polluted plot.

5. Radioactive pollution provoked phenological displacement of some plants in the investigated community. Fruiting phase of *Sanguisorba officinalis* started earlier at the polluted plot. Blooming phase of *Galatella biflora* started later at the polluted plot.

6. Radioactive pollution provoked teratological transformations of *Melilotus albus*, *Potentilla virgata*, *Odontites serotina*, *Lepidium latifolium*, *Berteroa incana*.

Community of *Elytrigia repens* + *Inula britannica* (PED 100–120 μ R/H) and com. of *Inula britannica* + *Elytrigia repens* (10–12 μ R/H) were investigated on meadow drying soils. The communities develop on heightened areas of flood-lands of small rivers and springs in conditions of irregular surface flooding and low ground moistening. Texture of the soils is light loamy or sandy loamy. High content of humus is typical for the soils. Depth of humus horizon fluctuates from 34 up to 58 cm.

The main polluters of meadow drying soils are Cs¹³⁷ with 4 130–8 504 Bq/kg at the polluted plot and 45–69 Bq/kg at the control plot. Soils are polluted by radionuclides in surface soil layer (0–10 cm). Content of Cs¹³⁷ decreases till 4 Bq/kg at a depth of 25–35 cm.

Following peculiarities of development of the investigated communities in present radioecological conditions were revealed:

1. No significant difference was revealed in ecobiomorphological composition of plants constituting the communities at the polluted and control plots.

2. Species diversity at the polluted plot is significantly higher than at the control plot. Besides radiation pollution, other factors affect the community. They are appearance of radioactive springs after underground nuclear explosions and cease of water outflow after demilitarisation of adits, burning out of vegetation in valleys of small rivers and radioactive springs, intensive influence on soil surface (road construction, cluttering up by debris and so on). Combined impact of these factors conditioned appearance numerous species (weed annuals and perennials, xerophyte dwarf semishrubs) which are not found at the control plot.

3. Horizontal structure of the investigated communities is heterogeneous at the polluted and control plots. It is more heterogeneous at the polluted plot because of influence of anthropogenic factors mentioned above. Influence of radiation pollution on vertical structure of communities was not revealed.

4. In present radioecological conditions plant coverage was lower at the polluted plot. Quantity of individuals of *Elytrigia repens* and *Inula britannica* per one square meter was lesser at the polluted plot. Weight of monocotyledonous and dicotyledonous plants and the whole overground biomass was lower at the polluted plot.

5. Radioactive pollution provoked phenological displacement of some plants in the investigated communities. Fruiting phase of *Potentilla virgata* started earlier at the polluted plot. Blooming phase of *Achillea asiatica* started later at the polluted plot.

6. Radioactive pollution provoked teratological transformations of *Melilotus albus*, *Potentilla virgata*, *Odontites serotina*, *Lepidium latifolium*, *Berteroa incana*.

Communities with dominance of Achnatherum spleendens, Glycyrrhiza uralensis, Leymus angustus (PED 130–140 μ R/H and at the control 10–12 μ R/H) were investigated on meadow stepping soils. The communities develop on heightened areas of valleys of small rivers in conditions of surface moistening and on depressions between hills under additional moistening and insignificant ground water supplying. Texture of meadow stepping soils is loamy or light loamy. High content of humus is typical for the soils. Depth of humus horizon is significant.

The main polluters of meadow stepping soils are Cs^{137} with 1 053–1 394 Bq/kg at the polluted plot and 25.6–55 Bq/kg at the control plot.

Following peculiarities of development of communities of *Glycyrrhiza uralensis* + *Leymus angustus* + *Achnatherum splendens* at the polluted plot and communities of *Achnatherum splendens* + *Glycyrrhiza uralensis* + *Leymus angustus* at the control plot in present radioecological conditions were revealed:

1. No difference was revealed in ecobiomorphological composition of plants constituting the investigated communities at the polluted and control plots.

2. Species diversity at the polluted plot is signifycantly greater than at the control plot. But years of investigations revealed that burning out of herbage (appeared numerous weed species) and disturbance of soil surface (road construction, cluttering up by debris, digging holes and so on) also promoted species diversity increase.

3. Horizontal structure of the investigated communities is heterogeneous at the polluted and control plots. Heterogeneity of horizontal structure at the polluted plot was strengthened by influence of the factors mentioned above. Impact of radiation pollution on vertical structure of the communities was not revealed.

4. In present radioecological conditions coverage in the investigated communities was lesser at the polluted plot. Quantity and height of individuals of *Achnatherum splendens* per one square meter were greater at the control plot. The greater quantity of individuals and the greater height of *Glycyrrhiza uralensis* were at the polluted plot. Weight of one individual of *Achnatherum splendens* was higher at the control plot and of *Glycyrrhiza uralensis* at the polluted plot. Weight of monocotyledonous plants was higher at the control plot. Weight of overground biomass was greater at the polluted plot. Blooming phase of *Galatella biflora* started later at the polluted plot.

5. Teratological transformations of plants in the investigated communities were not revealed.

Communities of *Leymus angustus* (PED 160 μ R/H and at the control 10–12 μ R/H) were investigated on meadow stepped soils. They develop at over-flood plain terraces of small rivers and valleys between hills in conditions of surface moistening. Ground water supply does not play significant role. Texture of meadow stepped soils is loamy or light loamy. Humus content reaches 15 % and the depth of humus horizon is 32 cm.

The main polluters of the soils are Cs^{137} (612–896 Bq/kg at the polluted plot and 21.3–46 Bq/kg at the control). Soils are polluted by radionuclides in surface layer 0–10 cm.

Following peculiarities of development of com. of *Leymus angustus* in present radioecological conditions were revealed:

1. There is no significant difference in ecobiomorphological composition of the main species constituting the investigated communities at the polluted and control plots. Presence of shrub of *Spiraea hypericifolia* at the polluted plot is conditioned by close to soil surface bedding of dense bedrock.

2. Species diversity at the polluted plot is significantly greater than at the control plot. But in this case repeated burning out of herbage promoted increase of species diversity at the polluted plot. It promoted appearance of many species, especially weeds.

3. Horizontal structure of com. of *Leymus angustus* is heterogeneous at the polluted and control plots. At the polluted plot heterogeneity is strengthened by fires, mechanical disturbance of soil and so on. Impact of radiation pollution on vertical structure of the investigated community was not revealed.

4. Living soil cover in present radioecological conditions is almost the same at the polluted and control plots. Height and weight of one individual of *Leymus angustus* is higher at the polluted plot. Weight of monocotyledonous plants is higher at the polluted plot. Weight of dicotyledonous plants is also higher at the polluted plot. Weight of overground biomass is greater at the polluted plot. Additional moistening greater than at

the control plot together with radiation pollution played significant role in development of the greater height and weight of one individual of *Leymus angustus*, the greater weight of monocotyledonous and dicotyledonous plants and the whole overground biomass in the investigated community at the polluted plot. Significant supply of moisture was formed in soil in the first half of vegetation period because of melted and rain water. Radiation pollution provoked phenological displacement of some plants in the investigated community. Fruiting phase of *Leymus angustus* started earlier at the polluted plot. *Stipa capillata* and *Festuca valesiaca* did not develop reproductive organs.

5. Teratological transformations in communities of *Leymus angustus* at the polluted plot (PED 160 μ R/H) were not revealed.

Halophyte ecosystems occupy saucer-shaped depressions of plains between hills and slopes of sor depressions. Soil forming rocks are deluvial-proluvial sediments. Soils are solonchaks ordinare. They develop in conditions of additional moistening by slope flowing of water from melted snow and mineralised underground waters. Texture of ordinare solonchaks is loamy and light loamy. Type of water regime is permacidous leaching and exhudational. Humus content is 2.0–2.4 %. Depth of humus horizon is 36–40 cm.

Distinctive property of ordinare solonchaks is insignificant content of easy soluble salts.

The main technogenic polluter of investigated soils is Cs^{137} . Its content is 2 256 Bq/kg at the polluted plot and 24.9 Bq/kg at the control plot. Content of other radionuclides reaches: $Eu^{152,154} - 91.1$ Bq/kg at the polluted plot and 3.1 Bq/kg at the control plot, $Am^{241} - 63$ Bq/kg at the polluted plot and 62.1 Bq/kg at the control plot, $Co^{60} - 59$ Bq/kg at the polluted plot and <1.1 Bq/kg at the control plot. Signs of radionuclide impact on physical and chemical properties of soils were not revealed.

Following peculiarities of development of investigated communities of *Halimione verrucifera* + *Halocnemum strobilaceum* (PED – 40–50 and 10– 12μ R/H at the control) in present radioecological conditions were revealed:

1. No difference between species and ecobiomorphological composition of the most of plants constituting investigated communities at the polluted and control plots was revealed. Species diversity is significantly higher at the polluted plot. But ecological conditions of the polluted plot are more dynamic: soils are formed under influence of capillary border of underground waters, underground water level decreases from Spring till Autumn and provokes changes in water and salt regime of soils. Plants with different rhythm of development, ecological type and life form develop in these conditions differently according to soil moisture. Therefore, species composition at the polluted plot is more various. 2. Horizontal structure of the investigated community is heterogeneous at the polluted and control plots. Influence of radiation pollution on vertical structure of the investigated community at the polluted and control plot was not revealed.

3. Satisfactory development of *Halocnemum strobelaceum* was marked at the polluted plot and good and excellent at the control plot. Average height, weight of one individual and average weight of root of one individual of *Halocnemum strobilaceum* is lower at the polluted plot. Weight of underground biomass and weight of dicotyledonous plants is lower at the polluted plot. But the influence of radiation pollution under its low level can't be separated from influence of other ecological factors. In the present case, obviously, the main of them is moisture degree.

4. Phenological displacement of dominating plants was revealed. Fruiting phase of *Halimione verrucifera* and *Halocnemum strobilaceum* started later at the polluted plot.

5. Plants with teratological transformations at the polluted plot (PED 30–45 μ R/H) were not revealed.

Brief comparative analysis of morphological structure of 8 plants (annuals, biennials, perennials, dwarf semishrubs, shrubs) from the polluted and control plots revealed following changes:

1) inhibition of growth (Berteroa incana, Melilotus albus, Kochia sieversiana, Rosa laxa); 2) coiled stem (Phlomis tuberosa); 3) change of direction of stem growth (Lepidium latifolium, Melilotus albus, Phlomis tuberosa); 4) shortening of internodes (Rosa laxa); 5) change of type of branching of stem (Rosa laxa) and dichotomy of stem (Lepidium latifolium, Calamagrostis epigeios); 6) congestence of offshoots (Rosa laxa); 7) change of section of stem (Melilotus albus, Phlomis tuberosa); 8) change of shape of blade (Lepidium latifolium, Kochia sieversiana); 9) change of dimensions of blade (Rosa laxa, Lepidium latifolium, Kochia sieversiana); 10) chlorosis of leafs (Rosa laxa, Lepidium latifolium); 11) wrinkled leafs (Lepidium latifolium); 12) formation of galls precipitation (Artemisia marschalliana, Rosa laxa); 13) disturbance of phyllotaxis (Lepidium latifolium); 14) absence of anthers or stamens (Melilotus albus, Phlomis tuberosa); 15) change of shape of ovary (Melilotus albus).

Following changes of anatomical structure of organs of the investigated plants were revealed: 1) increase of dimensions of primary bark (*Berteroa incana, Melilotus albus, Phlomis tuberosa, Artemisia marschalliana*) or decrease of dimensions of primary bark (*Lepidium latifolium*); 2) decrease of volume of central cylinder (*Lepidium latifolium, Kochia sieversiana*); 3) decrease of dimensions of pithy parenchyma (*Lepidium latifolium, Kochia sieversiana*) or increase of dimensions of pithy parenchyma (*Berteroa incana, Rosa laxa*); 4) great development of phloem elements (*Melilotus albus*); 5) increase of square of conductive bunches (*Kochia sieversiana*) or decrease of square of conductive bunches (*Lepidium latifolium*); 6) increase of dimensions of epidermis cells (*Lepidium latifolium*).

Thus, radiation pollution provokes change of morphological and anatomical structure of plants and leads to formation of following adaptation signs: appearance of coiled stem; change of growth direction and type of branching of stem; congestion of offshoots and shortening internodes; change of stem section, shape of blade and its dimensions; increase/decrease of dimensions of primary bark; increase of dimensions of pithy parenchyma and constituting cells; increase of square of conductive bunches; change of dimensions of epidermis cells. Formation of adaptation signs of perennials and shrubs is expressed more clearly. Change of morphological and anatomical structure of plants happens more often in meadow (mesophyte) communities and at disturbed areas.

СЕМЕЙ СЫНАҚ ПОЛИГОНЫНЫҢ ЛАСТАНҒАН ТЕЛІМДЕРІНДЕГІ БИОЦЕНОЗДАҒЫ БЕЙІМДЕЛУ ҮДЕРІСТЕРІ

Р.П. Плисак, С.В. Плисак

ҚР БҒМ ҒК Ботаника және фитоинтродукция институты РМК, Алматы, Қазақстан

Мақалада, түрлі типтердегі (далалық, жайылымдық, галофитті) экожүйенің, сонымен бірге Семей сынақ полигонының (ССП) аумағындағы бұзылған экожүйенің негізгі типтеріндегі бейімделу үдерістерін зерттеу нәтижелері келтірілген. Радиациялық ластанулар өсімдіктердің морфологиялық және анатомиялық құрылымының өзгеруіне әсер ететіні және бірқатар бейімделу нышандарының пайда болуына алып келетінін анықталды. Көпжылдық және бұта-шілікті өсімдіктердің белгісінің қалыптасуы айқын көрінеді. Өсімдіктердің морфологиялық және анатомиялық құрылымының өзгеруі жайылымдық (мезофитті) қауымдастықта және бұзылған телімдерде жиі орын алатыны белгілі болды.

АДАПТАЦИОННЫЕ ПРОЦЕССЫ В БИОЦЕНОЗАХ НА ЗАГРЯЗНЕННЫХ УЧАСТКАХ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ИСПЫТАТЕЛЬНОГО ПОЛИГОНА

Плисак Р.П., Плисак С.В.

РГП Институт ботаники и фитоинтродукции КН МОН РК, Алматы, Казахстан

В статье приведены результаты исследования адаптационных процессов основных типов экосистем (степные, луговые, галофитные), а также различных типов нарушенных экосистем территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Установлено, что радиационное загрязнение провоцирует изменение морфологического и анатомического строения растений и приводит к образованию ряда адаптационных признаков. Формирование признаков адаптации многолетних и кустарниковых растений выражено более отчетливо. Изменение морфологического и анатомического строения растения растения растений происходит чаще в луговых (мезофитных) сообществах и на нарушенных участках.

СПИСОК АВТОРОВ

Абдухаирова А.Т., 116, 126 Акаев А.С., 66 Амренова А.У., 23 Аскербеков С.К., 52 Аханов А.М., 52, 79 Байбекова Н., 91 Батырбеков Э.Г., 60 Бекмулдин М.К., 66 Бельдеубаев А.Ж., 45 Буртебаев Н.Т., 40, 79 Воронин Е.В., 16 Воронова Н.А., 108, 123 Габдуллин М.Т., 139 Габдуллина А.Т., 23 Гановичев Д.А., 66 Гизатулин Ш.Х., 40, 52, 79 Горбатов И.В., 16 Горин Н.В., 16 Дерявко И.И., 129 Дуйсебаев Б.А., 91 Дуйсенбаева А.Ж., 91 Дукенбаев К., 11 Дюсамбаев Д.С., 40, 79 Дюсембаева М.Т., 85 Есырев О.В., 112 Жаканбаев Е.А., 96 Жаксыбаева А.А., 60 Жолдыбаев Т.К., 91 Жукешов А.М., 23 Жумадилов И., 91 Здоровец М.В., 5, 11 Зубарева Т.И., 112

Исмаилов Д.В., 139 Кабулбек Е.Б., 52 Кадыржанов К.К., 5, 11 Кашикбаев Е.А., 60 Кенжин Е.А., 52 Кенжина И.Е., 5 Керимбеков Д.С., 139 Кирдяшкин В.И., 108, 123 Кириллова Т.Г., 85 Кожахметов Е.А., 45 Козловский А.Л., 5, 11 Коянбаев Е.Т., 45 Купчишин А.А., 123 Купчишин А.И., 108, 112, 116, 120, 123, 126 Максимкин О.П., 101 Мережко М.С., 101 Молдабеков Ж.М., 23 Мукан Ж., 91 Муратов М.М., 139 Мухамеджанова Р.М., 45 Мухамедияров Н.Ж., 85 Мухамедов Н.Е., 129 Насурлла М., 91 Ниязов М.Н., 108, 116, 126 Оракова М.С., 96 Орлов Ю.А., 16 Орлова Н.Ю., 16 Отставнов М.А., 72, 101 Пахниц А.В., 129, 133 Пачурин Д.В., 16 Плисак Р.П., 145

Плисак С.В., 145 Рофман О.В., 72 Садуев Н.О., 91 Садыков А.Д., 60 Садыков Б.М., 91 Салихов Т.К., 27, 34 Салихова Т.С., 27, 34 Сапатаев Е.Е., 45 Сарсенбаева К.Б.,, 96 Серік Қ., 23 Сильнягин П.П., 40, 79 Скаков М.К., 60, 129 Стародумова И.Г., 16 Сулейменов Н.А., 133 Султангазина М.Н., 139 Сураев А.С., 133 Суслов Е.Е., 96 Таипова Б.Г., 112, 120, 126 Тронин Б.А., 116, 120 Тулеушев Ю.Ж., 96 Уета Ш., 40, 79 Хамитова К.К., 139 Ходарина Н.Н., 112 Цай К.В., 72 Чектыбаев Б.Ж., 60 Черноштан А.В., 139 Чихрай Е.В., 52 Шаймерденов А.А., 40, 52, 79 Шаханов К.Ш., 120 Шмыгалева Т.А., 123 Шумская Е.Е., 5 Яр-Мухамедова Г.Ш., 126

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ СТАТЕЙ

Статьи предоставляются в электронном виде (на CD, DVD диске или по электронной почте присоединенным [attachment] файлом) в формате MS WORD и печатной копии.

Текст печатается на листах формата A4 (210×297 мм) с полями: сверху 30 мм; снизу 30 мм; слева 20 мм; справа 20 мм, на принтере с высоким разрешением (300-600 dpi). Горизонтальное расположение листов не допускается.

Используются шрифт Times New Roman высотой 10 пунктов для обычного текста и 12 пунктов для заголовков. Пожалуйста, для заголовков используйте стили (Заголовок 1, 2...) и не используйте их для обычного текста, таблиц и подрисуночных подписей.

Текст печатается через одинарный межстрочный интервал, между абзацами – один пустой абзац или интервал перед абзацем 12 пунктов.

В левом верхнем углу должен быть указан индекс УДК. Название статьи печатается ниже заглавными буквами. Через 3 интервала после названия, печатаются фамилии, имена, отчества авторов и полное наименование, город и страна местонахождения организации, которую они представляют. После этого, отступив 2 пустых абзаца или с интервалом перед абзацем 24 пункта, печатается аннотация к статье на русском языке, ключевые слова и основной текст. В конце статьи, после списка литературы, повторяются блоки «название, авторы, организации, аннотация, ключевые слова» на казахском и английском языке.

Максимально допустимый объем статьи – 10 страниц.

При написании статей необходимо придерживаться следующих требований:

- Статья должна содержать аннотации на казахском, английском и русском языках (130-150 слов) с указанием ключевых слов, названия статьи, фамилии, имени, отчества авторов и полного названия организации, города и страны местонахождения, которую они представляют;
- Ссылки на литературные источники даются в тексте статьи цифрами в квадратных [1] скобках по мере упоминания. Список литературы следует привести по ГОСТ 7.1-2003;
- Иллюстрации (графики, схемы, диаграммы) должны быть выполнены на компьютере (ширина рисунка 8 или 14 см), либо в виде четких чертежей, выполненных тушью на белом листе формата А4. Особое внимание обратите на надписи на рисунке – они должны быть различимы при уменьшении до указанных выше размеров. На обороте рисунка проставляется его номер. В рукописном варианте на полях указывается место размещения рисунка. Рисунки должны быть представлены отдельно в одном из форматов *.tif, *.gif, *.png, *.jpg, *.wmf с разрешением 600 dpi.
- Математические формулы в тексте должны быть набраны как объект Microsoft Equation или MathType. Химические формулы и мелкие рисунки в тексте должны быть вставлены как объекты Рисунок Microsoft Word. Следует нумеровать лишь те формулы, на которые имеются ссылки.

К статье прилагаются следующие документы:

- 2 рецензии высококвалифицированных специалистов (докторов наук) в соответствующей отрасли науки;
- выписка из протокола заседания кафедры или методического совета с рекомендацией к печати;
- акт экспертизы (экспертное заключение);
- сведения об авторах (в бумажном и электронном виде): ФИО (полностью), наименование организации и ее полный адрес, должность, ученая степень, телефон, e-mail.

Текст должен быть тщательным образом выверен и отредактирован. В конце статья должна быть подписана автором с указанием домашнего адреса и номеров служебного и домашнего телефонов, электронной почты.

Статьи, оформление которых не соответствует указанным требованиям, к публикации не допускаются.

Ответственный секретарь к.ф.-м.н. В.А. Витюк тел. (722-51) 3-33-35, E-mail: VITYUK@NNC.KZ

Технический редактор И.Г. Перепелкин тел. (722-51) 3-33-33, E-mail: IGOR @NNC.KZ

Адрес редакции: 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б http://old.nnc.kz/zhurnalvestnik.html

© Редакция журнала «Вестник НЯЦ РК», 2019

Свидетельство о постановке на учет №17039-Ж от 13.04.2018 г. Выдано Комитетом информации Министерства информации и коммуникаций Республики Казахстан

Тираж 300 экз.

Выпуск набран и отпечатан в типографии Национального ядерного центра Республики Казахстан 071100, Казахстан, г. Курчатов, ул. Красноармейская, 2, зд. 054Б





