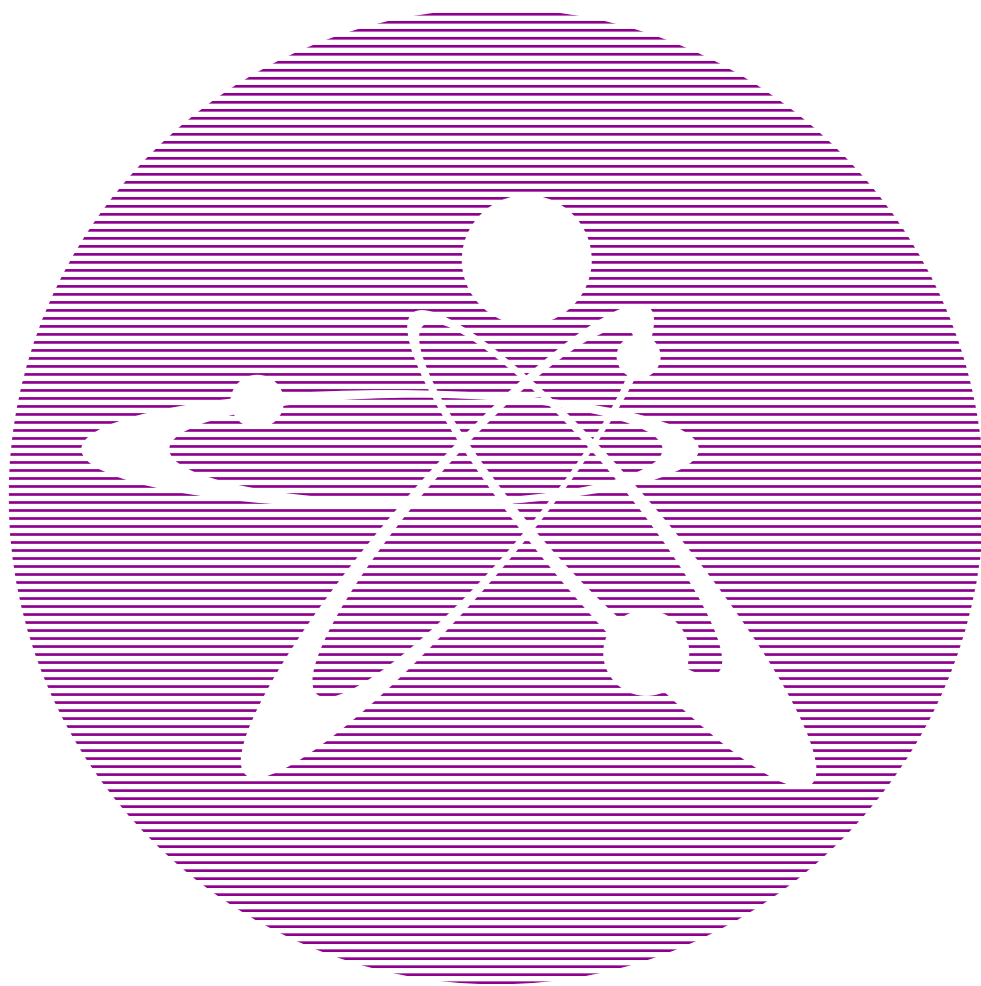


2018
ВЫПУСК 1

ISSN 1729-7516

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА
РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ
ВЕСТНИК



Вестник НЯЦ РК

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ
НАЦИОНАЛЬНОГО ЯДЕРНОГО ЦЕНТРА РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН

ВЫПУСК 1(73), МАРТ 2018

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,
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. ГРАДОБОВЕВ 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(73) ШЫҒАРЫМ, НАУРЫЗ, 2018 ЖЫЛ

NNC RK Bulletin

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

ISSUE 1(73), MARCH 2018

Периодический научно-технический журнал «Вестник НЯЦ РК», решением Комитета по контролю в сфере образования и науки включен в перечень изданий, рекомендованных для публикации материалов:

- по физико-математическим наукам,
- по специальности 25.00.00 – науки о Земле.

СОДЕРЖАНИЕ

СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА КАК СЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ФАКТОРОВ Мукашев К.М., Мурадов А.Д., Умаров Ф.Ф., Яр-Мухамедова Г.Ш.	5
КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ИОННОЙ БОМБАРДИРОВКЕ Умаров Ф.Ф., Джуррахалов А.А., Мукашев К.М.	10
ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТИЕВОЙ КПС НА ОСНОВЕ КАРБОНОВОЙ ТКАНИ, АРМИРОВАННОЙ УНТ Тулубаев Е.Ю., Понкратов Ю.В., Заурбекова Ж.А., Гордиенко Ю.Н., Барсуков Н.И.	20
ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИВГ.1М Ермаков В.А., Серикбаев Б.С., Ильиных С.А., Коровиков А.Г.	28
НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ КАЗАХСТАНА Тажединов И., Аманкулов Ж.М., Жалмукаш У.К., Хусаин Ш.К., Хан О.Г.	31
ВЛИЯНИЕ МЭВ ЭНЕРГИИ ИОНОВ КРИПТОНА НА УПРОЧНЕНИЕ СПЛАВА Ni-Ti Сатпаев Д.А., Полтавцева В.П., Дегтярева А.С.	36
ВЛИЯНИЕ ФЛЮЕНСА ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА НА УПРОЧНЕНИЕ СПЛАВА Ni-Ti Сатпаев Д.А., Полтавцева В.П., Партыка Я.	40
СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНОВ НА КАЧЕСТВО ЭПР СПЕКТРОВ Жумадилов К.Ш., Иванников А.И., Абышев Б.К., Степаненко В.Ф., Хоши М.	44
РЕЗУЛЬТАТЫ ЭПР ДОЗИМЕТРИИ ПО ЗУБНОЙ ЭМАЛИ НАСЕЛЕНИЯ, ПРОЖИВАЮЩЕГО ВБЛИЗИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ЯДЕРНОГО ПОЛИГОНА Жумадилов К.Ш., Иванников А.И., Сарсенова С.М., Степаненко В.Ф., Хоши М.	49
ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛИГОНЕ ЛОБНОР (КИТАЙ) НА НАСЕЛЕНИЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН МЕТОДОМ ЭПР ДОЗИМЕТРИИ Жумадилов К.Ш., Иванников А.И., Степаненко В.Ф., Хоши М.	53
СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОНОВЫХ ДОЗ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭПР МЕТОДОМ ПО ЗУБНОЙ ЭМАЛИ ЖИТЕЛЕЙ ГОРОДОВ СТЕПНОГОРСК И СЕМИПАЛАТИНСК Оразалина И.С., Абышев Б.К., Иванников А.И., Жумадилов К.Ш.	58
ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И НАМАГНИЧЕННОСТИ НЕОБЛУЧЕННОЙ И ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ СТАЛИ X18N9 В ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМАЦИИ И ОТЖИГОВ Максимкин О.П., Нұрғали Е.Е.	61
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАРОЖДЕНИЯ ШЕЙКИ В СТАЛИ 12X18N10T, ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ, МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ Максимкин О.П.	69
ПРОБЛЕМЫ ЧИСТОЙ ВОДЫ НА ТЕРРИТОРИИ ТРАНСГРАНИЧНОГО СЕКТОРА «КАЗАХСТАН-КЫРГЫЗСТАН» И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РЕШЕНИЯ Солодухин В.П., Дженбаев Б.М.	75

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ СТАЛИ 12X18N10T ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е., Кожамбетов Е.А., Кукушкин И.М., Курбанбеков Ш.Р., Миниязов А.Ж., Букина О.С.

84

РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ И СКОРОСТЕЙ НАРАБОТКИ ^3H , ^4He В ЛИТНЕВОЙ КПС ПРИ ЕЕ ОБЛУЧЕНИИ НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

Прозорова И.В., Скаков М.К., Тажибаева И.Л., Понкратов Ю.В., Кульсартов Т.В.

91

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ НА ЭРОЗИЮ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Молдабеков Ж.М., Жукешов А.М., Габдуллина А.Т., Амренова А.У., Серик К.

97

ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДА ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАДА ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЗАРЯДТАЛУ ПРОЦЕСІ

Р.Ж. Амангалиева, А.Е. Әбимолдаева

102

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

Салихов Т.К., Сапиев Е., Салихова Т.С.

105

БИОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЭКОСИСТЕМ АКШАТСКОГО СЕЛЬСКОГО ОКРУГА

Салихов Т.К.

110

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИР ВВР-К С НИЗКООБОГАЩЕННЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ ПОСТЕПЕННОЙ ЗАМЕНЕ ВОДЯНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ НА БЕРИЛЛИЕВЫЙ

Сайранбаев Д.С., Колточник С.Н., Шаймерденов А.А., Накипов Д.А., Кенжин Е.А.

114

НАУКА — ЭТО ОСОБЫЙ, СВОЕОБРАЗНЫЙ МИР ИНТЕЛЛЕКТУАЛОВ

Мукашев К.М.

120

СПИСОК АВТОРОВ.....

125

УДК 539.21; 539.12.04

**СТРУКТУРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КОНСТРУКЦИОННОГО МАТЕРИАЛА
КАК СЛЕДСТВИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ФАКТОРОВ**¹⁾ Мукашев К.М., ¹⁾ Мурадов А.Д., ²⁾ Умаров Ф.Ф., ¹⁾ Яр-Мухамедова Г.Ш.¹⁾ *Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*²⁾ *Казахско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан*

Представлены результаты исследования радиационной повреждаемости нержавеющей стали 10X18H10T-ВД, имеющей условное обозначение ЭП-502. Радиационные свойства стали изучались методом позитронной спектроскопии. Основным структурно-чувствительным параметром послужила вероятность перераспределения аннигиляции позитронов между электронами проводимости и связанными электронами атомов матрицы. Объект исследования был подвергнут комплексному воздействию различных факторов. Основными из них являются обработка в расплаве жидкометаллического литья при температуре 600 °С в течение 1000 часов из отожденного, ненапряженного и напряженного состояний. Следующим этапом исследования было изучение структурных характеристик стали после насыщения водородом из этих же состояний. В последнюю очередь металл подвергнулся облучению электронами (4 МэВ) и реакторными нейтронами при флюенсах 10^{18} и 10^{19} см⁻² при температуре не выше 70 °С с последующей обработкой в расплаве литья. Результаты исследований позволили установить неоднозначность влияния расплавленного литья на радиационную повреждаемость нержавеющей стали и умеренную его агрессивность на процессы корродирования стали.

ВВЕДЕНИЕ

Овладев самым передовым знанием и вооружившись новейшей технологией, одновременно проникнув в океанские глубины и космические просторы, построив цветущие оазисы в одном месте и оставив безжизненные пространства в другом уголке Земли, человечество вступило в XXI век, не имея ни малейшей надежды на беззаботное существование в обозримом будущем. Ускоренное развитие науки и техники при опережающем росте потребностей человечества в новых источниках энергии и материалах с уникальными свойствами привело к резкому изменению ситуации с мировыми запасами сырья и полезных ископаемых. Наиболее характерным в этом плане является постепенное сокращение добычи традиционного органического топлива, запасы которого при нынешнем уровне потребления ограничиваются ближайшими 100–150 годами, и последовательный и систематический переход на освоение ядерной энергетики. Попытка восполнить имеющийся энергетический дефицит за счет нетрадиционных источников (гелиоэнергетика, энергия морских приливов, ветра и др.) не сыграла решающей роли в общем балансе и поэтому основные усилия исследователей были направлены на извлечение внутриатомной энергии сначала за счет управляемой реакции деления ядер, а в последующем – за счет управляемых реакций термоядерного синтеза. По оценкам специалистов только земные ресурсы в случае использования D-D-реакции синтеза могут составить несколько миллиардов лет [1]. К сожалению, чем заманчивее идея обеспечения человечества неограниченным запасом энергии, тем труднее ее практическая реализация. Тем не менее, в настоящее время многие наиболее развитые страны (в том числе и Казахстан) считают своей честью иметь долго-

временную научно-техническую программу, предусматривающую целенаправленные исследования по реализации в начальном этапе управляемой реакции D-T-синтеза. Астрономическое значение требуемой при этом температуры для удержания плазмы и мощный поток нейтронов сопровождения выдвигают на первый план проблему надежности материала первой стенки и других конструктивных элементов термоядерного реактора (ТЯР).

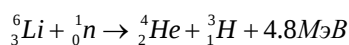
**МЕТОДИЧЕСКИЕ ПРЕДПОСЫЛКИ
ИССЛЕДОВАНИЯ**

После самой крупной в истории человечества техногенной катастрофы, произошедшей на Чернобыльской АЭС, в различных странах мира начались работы по разработке наиболее безопасных конструкций атомных реакторов, хотя эти поиски еще не внесли что-либо новое в существующий порядок путей решения самой проблемы, которые заключаются в следующем. Во-первых, это наращивание количества и эффективности различных защитных и локализирующих систем с максимальной автоматизацией процесса управления реактором, что позволило бы свести к минимуму последствия любой аварии. Во-вторых, разрабатываются такие конструкции атомных реакторов или предлагаются такие научные и инженерные решения самой проблемы, чтобы на основе рационального использования законов природы исключить самую возможность возникновения крупных аварий. Каким бы заманчивым ни был первый подход, ему присущ существенный недостаток – любое наращивание и усложнение связано с удорожанием каждой единицы вырабатываемой энергии. В то же время эти меры не могут устранить возможности появления аварии и ее причин, а в случае отказа, они сами могут стать причинами тяжелых катастроф. Поэтому второй путь более целесообразен.

зен и перспективен, если, разумеется, удастся решить при этом противоречивые, иногда взаимоисключающие задачи. Наиболее важной среди этих задач является проблема выбора теплоносителя первого контура, обеспечивающего отвод тепла со скоростью, необходимой для предупреждения перегрева.

В качестве охладителя могут быть использованы как газообразные, так и жидкие среды, которые должны обладать высоким коэффициентом теплопередачи, низкой стоимостью, малым сечением захвата нейтронов и т.д. Разумеется, в ближайшее время бесспорное преимущество среди жидких теплоносителей сохраняется за водой, но у нее низкая точка кипения, а также она корродирует с металлом. В космических аппаратах и установках специального назначения будущее принадлежит жидкометаллическим охладителям. Уже сейчас некоторые реакторы на быстрых нейтронах используют в качестве теплопередающей среды жидкий натрий, при этом отмечается достаточно высокая безопасность таких установок [1]. Но, тем не менее, натриевым теплоносителям также присущи определенные недостатки, основным из которых является его химическая активность к воде и воздуху, в результате чего возникают тепловые взрывы и натриевые пожары. Эти качества присущи всем щелочным металлам – кандидатам в теплоносители, которые должны обладать еще низкой температурой плавления и высокой точкой кипения. Исходя из этого, наиболее пожаробезопасным считается эвтектический сплав Pb-Bi, лишенный указанных недостатков. Но этим сплавам, как и натрию, свойственна высокая степень наведенной радиоактивности, что усложняет вопросы защиты теплообменника.

Использование термоядерных реакторов в качестве источника энергии требует решения проблемы сырья для производства термоядерного топлива-третия. Считается, что такой реактор должен иметь бланкет-зону, в которой энергия нейтронов превращается в тепловую с одновременным воспроизводством трития по реакции [2]:



Тогда использование Li в качестве охладителя позволит решить одновременно две задачи, разумеется, при условии обеспечения полной безопасности эксплуатации, поскольку при горении Na и Li образуют аэрозоли, опасные для человека и окружающей среды. Кроме того, всем охладителям предъявляется еще одно немаловажное требование – минимальные затраты на его перекачку. С учетом всех этих обстоятельств, для определения пригодности того или иного металла в качестве теплоносителя, Китцес ввел так называемый коэффициент выигрыша при затрате энергии на его перекачку [3]:

$$H = \frac{M^{2.75} \cdot C^3 \cdot K^{0.75} \cdot (\Delta T)^{3.75}}{\rho^{0.75} \cdot \sigma^{3.75}},$$

где M – молекулярный вес; C – теплоемкость; K – теплопроводность; ΔT – произвольный диапазон между точкой плавления и 650 °C; ρ – удельный вес; σ – сечение захвата нейтронов теплоносителем.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В таблице 1 приведены расчетные значения коэффициента выигрыша для наиболее вероятных кандидатов – металлов. Видно, что наилучшим сочетанием свойств обладает тяжелый изотоп ${}^7\text{Li}$, которого в природном Li содержится в количестве 92 %. Если затраты на отделение изотопов оправдывают себя и при условии обеспечения безопасных режимов эксплуатации [4], то ${}^7\text{Li}$ может оказаться наиболее подходящей теплопередающей средой, у которого $T_{\text{пл}} = 179^\circ\text{C}$, $T_{\text{кип}} = 1370^\circ\text{C}$, $\sigma = 0,033$ барн. Следовательно, материал первой стенки, кроме высокой радиационной стойкости к распуханию в поле мощного нейтронного излучения, еще должен обладать не менее высоким антикоррозионным свойством в условиях длительной работы в расплавленном металле.

Таблица 1. Значения коэффициента выигрыша для металлов [3]

Металлы	H	Металлы	H
${}^7\text{Li}$	$2,5 \cdot 10^{20}$	Sn	$4,9 \cdot 10^{11}$
Bi	$6,6 \cdot 10^{16}$	K	$1,5 \cdot 10^{11}$
Pb	$3,7 \cdot 10^{12}$	NaK	$2,4 \cdot 10^{13}$
Na	$2,5 \cdot 10^{13}$	BiPb	$2,6 \cdot 10^{13}$

Поскольку в большинстве случаев в качестве конструкционных материалов ЯЭУ служат нержавеющей сталь, то изучение ее основных характеристик в условиях наиболее приближенных к реальным, представляется своевременным и актуальным. Поэтому в качестве объектов исследования была выбрана аустенитная нержавеющая сталь марки ЭП-502 (10X18Н10Т-ВД), которая была подвергнута облучению электронами ($E = 4$ МэВ) и нейтронами до флюенсов 10^{18} и 10^{19} см $^{-2}$ как из отожженного состояния, так и после обработки в расплавленном Li при температуре 600 °C в течение 1000 часов. Этим же видам воздействий подвергались образцы стали из напряженного, ненапряженного и наводороженного состояний.

Установка для обработки металлов в расплавленном литии представляла систему из различных металлических объемов, предназначенных для загрузки, перекачки, обработки и слива. Рабочие объемы были снабжены термодарами, манометрами, уровнями и устройствами для отбора проб. Жидкий металл перекачивался из одного объема в другой под давлением инертного газа – аргона через фильтр-ловушку со скоростью $v = 1$ м/с.

Исследование аннигиляционных характеристик образцов проводилось методом измерения спектров угловой корреляции при комнатной температуре с последующим извлечением двух основных параметров: $D_F = S_1/(S_2+S_3)$, пропорционального относительно

ной вероятности перераспределения аннигиляции позитронов между электронами проводимости и ионного остова и ширины спектра на половине его высоты FWHM [4], сведенные в таблицу 2, где Φ_{e1} и Φ_{e2} – флюенсы электронов: Φ_n – флюенс нейтронов, равный 10^{18} см^{-2} . Более высокий уровень флюенса нейтронов создавал в стали значительный уровень наведенной радиоактивности, что приводил к значительным искажениям спектра угловых характеристик аннигиляционного излучения, лишившим возможности его практического использования.

Таблица 2. Аннигиляционные параметры стали ЭП-502, прошедшей сложную физико-химическую обработку

Состояние материала	Вид и флюенс облучения, см^{-2}	D_F	ΔD_F , %	FWHM, мрад.	ΔFWHM , %
Облучение из отожженного состояния	0	1,95	—	13,45	—
	$\Phi_{e1}=10^{18}$	2,99	53	11,66	13,3
	$\Phi_{e2}=10^{19}$	3,54	82	10,80	19,7
	$\Phi_{n1}=10^{18}$	4,55	133	10,07	25,1
Облучение после обработки в расплаве лития при $T=600^\circ\text{C}$, $t=10^3$ час.	0	2,42	24	12,10	10,0
	$\Phi_{e1}=10^{18}$	3,61	85	10,55	21,6
	$\Phi_{e2}=10^{19}$	3,98	104	10,79	19,8
	$\Phi_{n1}=10^{18}$	4,67	140	10,39	22,7
Обработка в Li из ненапряженного состояния		2,74	41	11,78	12,4
Обработка в Li из напряженного состояния		2,54	30	12,09	10,1
Насыщение водородом из ненапряженного состояния и обработка в Li		3,18	63	11,90	11,5
Насыщение водородом из напряженного состояния и обработка в Li		3,38	74	12,09	10,1
Погрешность $\pm$		0,01	1,0	0,05	0,1

Для исходного состояния стали характерны следующие значения аннигиляционных параметров: $D_F = 1,95$ и $\text{FWHM} = 13,45$ мрад. Облучение электронами при двух флюенсах приводит к сужению спектра от 13 до 25 % при соответствующем повышении параметра D_F от 53 до 133 %, что является следствием возникновения структурных нарушений, о которых речь шла раньше. Непрерывная тысячасовая обработка стали в расплавленном литии при $T = 600^\circ\text{C}$ также увеличивает параметр D_F при одновременном сужении спектра, но на заметно меньшую величину, чем при электронном и нейтронном облучении. Вероятной причиной этого процесса может быть взаимодействие жидкого металла с твердым телом, конечный результат которого определяется диаграммой состояния. Поскольку изучаемая сталь является многокомпонентной, то установление типа диаграммы с Li, которая зависит от многих причин и, прежде всего, от электроотрицательности металлов и размерных факторов, практически не представляется возможным. Но качественную оценку наблюдаемым явлениям дать можно. Изучение поверхности металлов после обработки в Li в оптическом микроскопе

с увеличением X200 показало присутствие на ней ямок травления, концентрация и размеры которых зависят от многих причин. Следовательно, сталь ЭП-502 в определенной степени подвержена массопереносу в потоке расплавленного лития. На скорость массопереноса могут оказывать влияние температура расплава, длительность обработки, скорость потока и т.д. Но на результаты позитронных исследований при этом оказывает свое влияние не столько сам процесс, сколько его следствие, в результате которого происходит выщелачивание с поверхности образца атомов компонентов. Наиболее легко подверженным выщелачиванию считается никель. Не последнюю роль в процессе взаимодействия расплавленного металла с поверхностью твердого тела играет, очевидно, диффузионное внедрение атомов Li в кристаллическую решетку стали, которые могут занимать как междоузельные положения, так и сегрегировать на границах зерен. В том и другом случае, эти атомы внедрения способны связывать или высвобождать электроны основного металла, вынуждая их образовывать в решетке локализованные состояния. Последние для позитронов оказывают эффект захвата, в результате которого возрастает относительная вероятность аннигиляции с локализованными носителями заряда, что приводит к соответствующему возрастанию параметра D_F и сужению спектра. Правда, реальная концентрация внедренных атомов, следовательно, и влияние их на аннигиляционные характеристики в принципе могли быть значительно больше наблюдаемых, если обеспечить полную смачиваемость жидкости с твердым телом. Но поиск путей увеличения смачиваемости Li с нержавеющей сталью в ходе выполнения этих исследований не ставился. Тем не менее, не трудно заметить умеренную агрессивность Li к сталям этого сорта.

Облучение как ускоренными электронами, так и нейтронами деления после литиевой обработки не намного изменяет аннигиляционные характеристики материала (104 % против 81 % при облучении электронами и 139 % против 133 % при нейтронном) по сравнению с чистым облучением без предварительной обработки в Li. Следовательно, в этом случае присутствие атомов Li как на поверхности, так и внутри решетки не оказывает решающего влияния на повреждаемость металла. Но это совершенно не означает, что роль Li в этом процессе действительно незначительна. Дело в том, что облучение электронами и нейтронами проводилось не в момент обработки образцов в расплавленном металле, что в условиях данного эксперимента практически не осуществимо, а значительно позже. Поэтому относительно небольшое приращение аннигиляционных параметров в данном случае может быть вызвано с образованием в процессе облучения связанного комплекса радиационный дефект - внедренный примесный атом.

Как известно, все элементы конструкции активной зоны реактора в процессе эксплуатации испытывают значительные внутренние напряжения вследствие циклического воздействия высокой температуры, мощного нейтронного потока, а также подвергаются статической, динамической и вибрационной нагрузке как в результате неравномерного энерговыделения по объему, так и из-за различия в величине коэффициента теплового расширения. В связи с этим представляется не менее важным изучение процесса воздействия расплавленного металла на твердое тело из напряженного и ненапряженного состояний, а также до и после наводороживания из этих состояний. Было установлено, что диффузионное проникновение атомов Li в кристалл и образование локализованных состояний из ненапряженного состояния происходит относительно легче, чем из напряженного, что, видимо, связано с остаточными

силами взаимодействия атомов напряженного металла, которые препятствуют проникновению атомов инородного металла. Наоборот, процесс наводороживания напряженного металла снижает (может быть, снимает) внутренние напряжения, созданные внешними силами, и атомы Li относительно легко диффундируют в решетку матрицы, вызывая соответствующее возрастание степени локализованного состояния ее электронов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, изучение воздействия расплавленного лития на нержавеющую сталь выявило ряд интересных моментов, в результате которых установлена неоднозначность его влияния на радиационную повреждаемость металла и умеренная агрессивность жидкого Li на процессы коррождения стали.

ЛИТЕРАТУРА

1. Петунин В.П. Теплоэнергетика ядерных установок. – М.: Атомиздат. 1960 300 с.
2. Левин В.Е. Ядерная физика и ядерные реакторы. – М.: Атомиздат 1979. 400 с.
3. Джесси Рассел. Реактор с жидкометаллическим теплоносителем. – М.: Атомиздат. 1989. 255 с.
4. Мукашев К.М. Физика медленных позитронов и позитронная спектроскопия. – Алматы. 2015. 510с.

КОНСТРУКЦИЯЛЫҚ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ КЕШЕНДІ ФАКТОРЛАРДЫҢ ӘСЕРІ

¹⁾ Қ.М. Мұкашев, ¹⁾ А.Д. Мурадов, ²⁾ Ф.Ф. Умаров, ¹⁾ Г.Ш. Яр-Мухамедова

¹⁾ *Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан*

Тоттануға төзімді 10X18H10T-ВД болаттың радиациялық өңдеулерге байланысты ақаулану дәрежесі кең ауқымды зерттеулерден өткізілген. Материалдың радиациялық қасиеттерін зерттеу үшін позитрондық спектроскопия тәсілі қолданылды. Зерттеу тәсілінің негізгі құрылымдық-сезімтал көрсеткіші ретінде позитронның атом құрамындағы еркін электрондар мен байланысқан электрондар арасында аннигиляция құбылысына қатысу ықтималдығы пайдаланылды. Зерттеу нысаны түрлі факторлардың кешенді әсері арқылы өңдеуден өткізілді. Бірінші кезеңде зерттеу нысаны жасытылған, күйзеліссіз және күйзелісті күйден 600 °C температурада 1000 сағ. ішінде сұйық литийде өңделді. Келесі кезең сондай күйдегі болатты сутекпен қанықтырудан жүргізілді. Соңғы кезеңде болат материал энергиясы жоғары электрондармен (4 МэВ) және реакторлық нейтрондармен 10^{18} және 10^{19} см⁻² флюенспен сәулелендіруден кейін тағы да сұйық литийде өңдеуден өткізілді. Зерттеу нәтижелері балқыған литийдің тоттануға төзімді болаттың радиациялық ақаулануына әртүрлі деңгейде әсері болатындығын және оның коррозиялануына да ықпалын тигізетіні белгілі болды.

STRUCTURAL CHARACTERISTICS OF THE CONSTRUCTION MATERIAL AS THE CONSEQUENCE OF THE IMPACT OF INTEGRATED FACTORS

¹⁾ K.M. Mukashev, ¹⁾ A.D. Muradov, ²⁾ F.F. Umarov, ¹⁾ G.Sh. Yar-Mukhamedova

¹⁾ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan*

The paper presents the results of a study of the radiation damage of stainless steel 10X18H10T-VD, which has the symbol EP-502. Radiation properties of steel were studied by the method of positron spectroscopy. The main structurally sensitive parameter was the probability of redistribution of positron annihilation between conduction electrons and bound electrons of matrix atoms. The object of the study was subjected to a complex effect of various factors. The main ones are melt processing of liquid metal lithium at 600 °C for 1000 hours from annealed, unstressed and stressed states. The next stage of the study was to study the structural characteristics of steel after saturation with

hydrogen from these earthquakes. Lastly, metal was exposed to electrons and neutrons at fluences 10^{18} and 10^{19} cm^{-2} at a temperature of no higher than 70°C . The results of the investigations made it possible to establish the ambiguity of the influence of molten lithium on the radiation damage of stainless steel and its moderate aggressiveness on the corrosion processes of steel.

УДК 537.534

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ НАНОРАЗМЕРНЫХ СТРУКТУР НА ПОВЕРХНОСТИ МОНОКРИСТАЛЛА ПРИ СКОЛЬЗЯЩЕЙ ИОННОЙ БОМБАДИРОВКЕ

¹⁾ Умаров Ф.Ф., ²⁾ Джухраханов А.А., ³⁾ Мукашев К.М.¹⁾ *Казахстанско-Британский технический университет, Алматы, Казахстан*²⁾ *University of Antwerp, Antwerp, Belgium*³⁾ *Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан*

В работе методом компьютерного моделирования исследованы скользящие взаимодействия ионов N^+ , Ne^+ , Ar^+ , Kr^+ , Be^+ и Se^+ с начальными энергиями $E_0 = 0,5\div 10$ кэВ с поверхностью $Cu(100)$, $Ag(110)$, $Si(001)$, $SiC(001)$ и $GaAs(001)$ и образования первично выбитых атомов отдачи. Показано, что в области скользящего рассеяния упругие потери энергии рассеянных ионов существенно меньше, чем неупругие. Установлено, что сравнение энергий рассеянных ионов с экспериментально измеренными энергетическими распределениями позволяет сделать заключение о наличии и величине моноатомных ступенек. Рассчитаны коэффициенты распыления и десорбции, а также угловые, пространственные и энергетические распределения распыленных и десорбированных частиц. Показано, что при скользящем падении ионов на поверхность монокристалла распыленный и десорбированный поток образуют первично выбитые атомы с очень низкой энергией. Исследована диссоциативная и не диссоциативная десорбция адсорбированных молекул и показана возможность интенсивной не диссоциативной десорбции адсорбированных молекул. Рассчитаны пороги распыления по углу скольжения для одно- и двухкомпонентных кристаллов и их зависимости от массы, энергии бомбардирующих ионов и параметров структуры кристалла. Показано, что при скользящей ионной бомбардировке вдоль низкоиндексных направлений кристалла возможно послойное распыление поверхности монокристалла, оптимальное в узком интервале углов скольжения вблизи порогового угла распыления. Определены оптимальные условия для получения распределения имплантированных ионов по глубине с требуемой формой в приповерхностной области кристалла. Предложен высокочувствительный метод послойного анализа кристаллических поверхностей.

Ключевые слова: *скользящие взаимодействия ион-поверхность; рассеяния ионов; упругие и неупругие потери энергии; послойное распыление поверхности монокристалла; послойный анализ поверхности монокристалла; имплантация ионов; компьютерное моделирование.*

ВВЕДЕНИЕ

Использование скользящих углов падения ионов на поверхность кристалла открывает новые перспективы в исследовании тонких слоев вещества, в частности, в исследовании состава, структуры, топографии и потенциальных полей реальных поверхностей, при ионной полировке и контроле ионными пучками [1–5]. В неупругих процессах, сопровождающих взаимодействие ион-поверхность кристалла проявляются, так называемые траекторные эффекты, т.е. процессы возбуждения, ионизации, перезарядки и связанные с ними неупругие потери энергии зависят от характера и особенностей траекторий рассеиваемых частиц [1–3]. В условиях скользящего рассеяния ионов поверхностью монокристалла, наряду с общей тенденцией уменьшения относительных потерь энергии с уменьшением угла рассеяния, существует область углов скольжения, в которой наблюдается их аномальный рост [1]. Природа этих аномально высоких потерь энергии и их вклад в упругие и неупругие потери энергии остается не совсем ясной и не может быть интерпретирована в рамках модели непрерывного потенциала. Ионная бомбардировка поверхности кристалла приводит к образованию на ней радиационно-индуцированных дефектов типа вакансий, атомных ступенек и их кластеров и к формированию рельефа атомного мас-

штаба (< 10 нм). Существует корреляция между типом дефекта, углами блокировки отраженного пучка и энергетическими распределениями рассеянных частиц, что делает возможным определение типа дефекта и его концентрации на поверхности [3, 6]. Информация о местах связывания и ориентации молекул на поверхности интересна с точки зрения молекулярной структуры и важна для понимания химии гетерогенного катализа. Данные о положениях адсорбированных молекул на поверхности также необходимы для подготовки веществ с заданными свойствами в тонкопленочной технологии [7, 8]. Процесс распыления широко используется в современных микро- и нанотехнологиях. Такие процессы как плазменное травление и осаждение методом распыления, использующие ионную бомбардировку при относительно низких энергиях (~ 100 эВ), широко используются в полупроводниковых технологиях [9]. Однако, использование для модификации поверхности ионной бомбардировки под скользящими углами вместо традиционной бомбардировки под углами, близкими к нормали, позволяет расширить интервал энергий вплоть до ~ 10 кэВ [10], уменьшить повреждения (такие как формирование кратеров) [11] и способствовать формированию экстремально гладкой поверхности [12]. Это обусловлено

особенностями процесса рассеяния при скользящем падении ионов на поверхность монокристалла [13].

1 КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Специфика теоретического рассмотрения кратного рассеяния ионов атомами на поверхности твердого тела, связанная с трудностью описания взаимодействия многих частиц, обусловила широкое использование методов моделирования процесса рассеяния на ЭВМ [2, 3, 5]. Построение траекторий ионов, рассеиваемых атомами на поверхности твердого тела, в нашем алгоритме основывается на двух допущениях: 1) рассматриваются лишь парные столкновения ионов с атомами мишени; 2) путь, проходимый ионом между столкновениями, представляется в виде отрезков прямых линий [3]. Для описания взаимодействия частиц использовался универсальный потенциал Циглера-Бирзака-Литмарка [14]. Неупругие потери энергии рассчитывались по формуле Фирсова, усовершенствованной Кишиневским и были включены в кинематику рассеяния [3]. На рисунке 1 показана геометрия скользящего рассеяния и схематическое изображение полуканала на поверхности $\text{Cu}(100)$ вдоль направления $\langle 110 \rangle$ с расположенной на ней прицельной площадкой. Прицельные точки на поверхности кристалла заполняли прямоугольник, стороны которого были разделены на 100 отрезков в плоскости падения пучка (координата I) и 1000 отрезков в перпендикулярном направлении (координата J).

Размеры прицельной площадки составляли $1,28 \text{ \AA}$ (полуширина полуканала) по J -координате и $2,56 \text{ \AA}$ (межатомное расстояние вдоль направления $\langle 110 \rangle$) по I -координате. Расчеты проводились для прицельных точек равномерно покрывающих (координаты I и J) всю область поверхности мишени, где полное число налетающих ионов составляло $5 \cdot 10^4$. Для рассмотрения одновременных и почти одновременных столкновений ионов с атомами смежных цепочек, использовалась процедура, предложенная в работе [15]. При учете тепловых колебаний предполагалось, что атомы мишени колеблются независимо друг от друга и их отклонения от положения равновесия подчиняются распределению Гаусса. Влияние корреляции эквивалентно уменьшению амплитуды колебаний на $\sim 5\text{--}10\%$ в зависимости от рассматриваемого эффекта [3].

Распыление моделировалось в режиме первичного выбивания. Рассматривались только первично выбитые атомы отдачи (ПВА), испускаемые с первых трех поверхностных слоев. Учитывалось наличие на поверхности плоского потенциального барьера. Число налетающих ионов составляло $4 \cdot 10^4$. Каждая новая частица налетала на восстановленную, чистую поверхность. Траектории рассеиваемых ионов и атомов отдачи прослеживались в процессе их замедления до тех пор, пока их энергия не становилась ниже заранее заданной энергии: 25 эВ – для налетающих ионов и поверхностная энергия связи –

для выбитых атомов. Расчеты проводились на кристаллах, включающих до 120 атомных слоев.

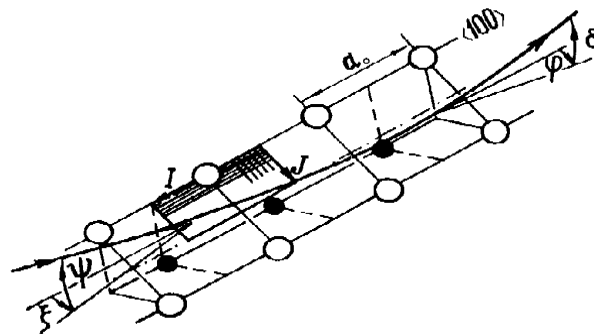


Рисунок 1. Схематическое изображение рассеяния ионов полуканалом на поверхности $\text{Cu}(100)$ и расположенной на ней прицельной площадки. I и J – координаты прицельных точек вдоль и поперек осей полуканала, определяющих число налетающих ионов

Начальная энергия налетающих ионов варьировалась от $0,5$ до 10 кэВ , скользящие углы падения ψ , отсчитываемые от поверхности мишени, составляли $3\text{--}30^\circ$ и азимутальные углы падения ξ , реализуемые вращением мишени относительно нормали к поверхности и отсчитываемые от направления $\langle 100 \rangle$ составляли $0\text{--}180^\circ$. Полярный угол рассеяния θ отсчитывался от направления первичного пучка, полярный угол вылета δ – от поверхности мишени и азимутальный угол рассеяния ϕ – от плоскости падения.

При моделировании процесса десорбции молекул с поверхности монокристалла места адсорбции молекул O_2 соответствовали позициям выше второго слоя с осью O-O параллельной поверхности $\text{Ag}(110)$ вдоль направления $\langle 110 \rangle$ с адсорбционной структурой $c(2 \times 2)$ (рисунок 2). Высота ее центра масс над поверхностной плоскостью составляла $0,094 \text{ нм}$, длина связи O-O – $0,155 \text{ нм}$, энергия связи E_b молекулы O_2 с поверхностью составляла $0,53 \text{ эВ}$ и энергия связи (диссоциации) ϵ молекулы O_2 – 5 эВ .

Необходимость использования компьютерного моделирования обусловлена сложностью траекторий рассеиваемых ионов и атомов отдачи в процессах скользящего рассеяния, послойного распыления и поверхностного каналирования, что препятствует использованию аналитических методов расчетов. Компьютерное моделирование является не только эффективным дополнительным методом повышения информативности результатов эксперимента, но может иметь и самостоятельное значение для выявления новых механизмов процессов ионного рассеяния, распыления и десорбции простых молекул.

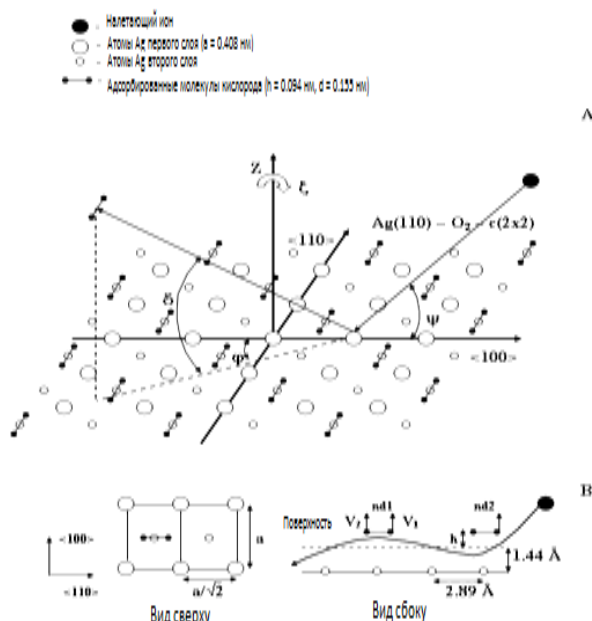


Рисунок 2. Первые два слоя монокристалла Ag(110) с адсорбированными молекулами O_2 и схематическое изображение направления падения иона и распыления молекулы O_2 без диссоциации [8]

2 РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Как было отмечено выше, в неупругих процессах, сопровождающих взаимодействие ионов с кристаллами, проявляются, так называемые траекторные эффекты. В основном, это означает, что неупругие процессы и связанные с ними неупругие потери энергии зависят от фактической траектории рассеянной частицы. Оказалось, что относительная величина аномальных потерь энергии зависит от ориентации кристалла и возрастает с уменьшением начальной энергии ионов. В работе [16] этот эффект был связан с механизмом поверхностного гиперканалирования (ПГК), который преобладает при очень малых углах скольжения.

2.1 Скользящее рассеяние ионов поверхностью монокристалла

В разделе представлены результаты исследования упругих и неупругих потерь энергии и характерных особенностей траекторий ионов, проявляющихся при рассеянии на дискретной атомной цепочке, в полуканале и канале на поверхности монокристалла при малых углах скольжения и рассеяния, а также вклады различных механизмов рассеяния в экспериментально наблюдаемые аномальные потери энергии [3, 18]. Траектории ионов Ag^+ с начальной энергией 15 кэВ, испытывающих скользящее рассеяние на атомных цепочках, в полуканалах и каналах на поверхности Cu(100), прослеживались в самых верхних 10 атомных слоях с помощью компьютерного моделирования.

На рисунке 3 показаны гистограммы энергетических распределений ионов Ag^+ , испытывавших зер-

кальное рассеяние на поверхности Cu(100) $\langle 110 \rangle$ в детектор с угловой апертурой $\pm 0,5^\circ$. Ионы, рассеянные вдоль гребней атомных цепочек вносят вклад в пики, обозначенные цифрой 1. Пики, расположенные слева и обозначенные цифрами 2–4 соответствуют ионам, испытавшим поверхностное гиперканалирование (ПГК) [16]. В случае траекторий типа 4 ионы фокусируются в направлении $\langle 110 \rangle$, точка фокуса лежит на $\sim 0,5$ Å выше плоскости поверхности. При $\psi = 4^\circ$, форма спектра претерпевает существенное изменение вследствие резкого возрастания числа траекторий нового типа 5, и уменьшения вклада траекторий типа 1–4. Из рисунка 3 видно, что ионы с траекториями типа 5 фокусируются поверхностными рядами с точкой фокуса, расположенной немного выше поверхности и распространяются затем расходящимся потоком в направлении стенок полуканала. Траектории типа 5 отличаются по форме и характеру от траекторий ПГК. Резкое возрастание таких частиц наводит на мысль о существовании своеобразного эффекта перефокусировки, который проявляется в выраженном сужении пространственного распределения рассеянных частиц. Интервал углов, в котором наблюдается этот эффект перефокусировки мал ($3,5^\circ \leq \psi < 5^\circ$), так что при $\psi = 5^\circ$ он уже не наблюдается.

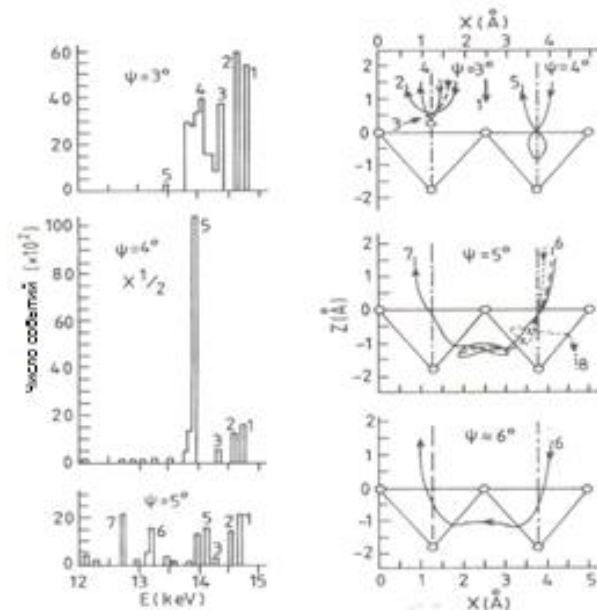


Рисунок 3. Гистограммы энергетических распределений ионов Ag^+ с энергией 15 кэВ, рассеянных зеркально ($\theta = 2\psi$) на поверхности Cu(100) $\langle 110 \rangle$. В правой части изображены наиболее характерные траектории ионов в проекции на поперечную плоскость полуканала $\langle 110 \rangle$

При $\psi = 5^\circ$ в дополнении к пикам 1–5 в спектре появляются новые низкоэнергетические пики 6 и 7. Характер траекторий частиц типа 7 более сложный, чем типа 6. В последнем случае часть траектории в канале короче, частицы фактически его пересекают. По своей форме и общей конфигурации эти траекто-

рии не принадлежат к траекториям, которые типичны для приповерхностного гиперканалирования, которые также наблюдались в наших расчетах. Также существуют траектории типа 8, соответствующие ионам, которые преодолевают потенциальный барьер стенок полуканала, внедряются в более глубокие слои и поэтому не рассеиваются обратно.

На рисунке 4 изображены экспериментальные [18] и рассчитанные [17] зависимости относительных потерь энергии $(E_0 - E)/E_0$ от угла скольжения для ионов Ag^+ с энергией 15 кэВ, рассеянных на поверхности $Cu(100) \langle 110 \rangle$. Кружки – эксперимент, крестики – расчет, 1 – упругие и 2 – неупругие вклады в полные относительные потери энергии. Расчетная кривая была построена усреднением потерь по различным механизмам рассеяния в соответствии с их относительным вкладом в спектр. Как видно из рисунка 4, основной вклад в аномальные потери энергии вносят неупругие потери энергии. Максимум неупругих потерь энергии вносится частицами с траекториями типа 5–7, а также частицами, испытывающими приповерхностное гиперканалирование. Таким образом, в области скользящего рассеяния упругие потери энергии существенно меньше чем неупругие потери. Факт превышения неупругих потерь энергии над упругими для малых углов скольжения ψ обусловлен возрастанием числа столкновений и длины траектории частиц в приповерхностной области, а также отсутствием малых прицельных параметров в процессе рассеяния. Преобладание неупругих потерь энергии должно проявлять себя в эффективности различных неупругих процессов, сопровождающих скользящее рассеяние ионов поверхностью монокристалла.

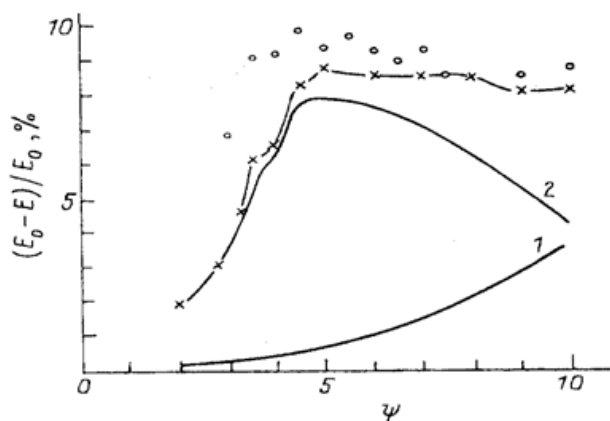


Рисунок 4. Экспериментальные [18] (кружки) и рассчитанные [3, 17] (крестики) зависимости относительных потерь энергии от угла скольжения для $\theta = 2\psi$ и ионов Ag^+ с энергией 15 кэВ, рассеянных поверхностью $Cu(100) \langle 110 \rangle$; упругие (1) и неупругие (2) вклады в полные относительные потери энергии

Ионная бомбардировка поверхности твердого тела приводит к образованию на ней радиационно-индуцированных дефектов типа вакансий и их скопле-

ний, атомных ступенек и кластеров точечных дефектов, а также к формированию на поверхности рельефа атомного масштаба ($< 100 \text{ \AA}$). Концентрация и тип формируемых радиационных дефектов зависит от условий эксперимента и существенно влияют на траектории, угловые и энергетические распределения, а также на число рассеянных частиц. Более того, существует корреляция между типом дефекта, углами блокировки отраженного пучка и энергетическими распределениями рассеянных частиц, что позволяет определить тип дефекта и его поверхностную концентрацию [1, 3, 6, 19].

В работе [20] было оценено число атомных ступенек, формируемых на поверхности монокристалла $Cu(100)$ при $T = 300 \text{ K}$, предварительно нарушенной бомбардировкой ионами Ag^+ с начальной энергией $E_0 = 10 \text{ кэВ}$ и плотностью тока на мишень в интервале $10^{-6} \div 10^{-8} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$. На рисунке 5 изображены энергетические распределения полного числа (ионы + нейтралы) и ионной компоненты частиц аргона, рассеянных поверхностью $Cu(100)$ в направлении $\langle 100 \rangle$ для двух углов падения: $\psi = 7^\circ$ (а) и 23° (б) и угла рассеяния $\theta = 30^\circ$. Частицы, испытывающие квазиоднократное рассеяние на атомах монокристаллических полубесконечных ступенек вносят вклад в пики 1 и 1' в спектре, а частицы, отраженные от атомов ступенек вносят вклад в пики 2 и 2' [20]. Схематически такие траектории показаны в верхней части рисунка 5. Число атомов ступенек оценивалось в соответствии с интенсивностью пиков квазиоднократного рассеяния в энергетическом спектре полного числа рассеянных частиц при $\psi = 7^\circ$ (1) и 23° (1'). На рисунке 5 эти спектры изображены сплошной линией.

Возможность рассеяния на угол $\theta = 30^\circ$ при малых ($\psi < 10^\circ$) и больших ($\psi > 20^\circ$) углах падения обусловлена тем, что бомбардировка вносит нерегулярности в совершенную бесконечную атомную цепочку, так что она становится конечной со ступеньками вверх (а) или вниз (б). Число атомов ступенек образуемых под действием ионной бомбардировки, и оцениваемых по пикам 1 и 1' в энергетическом спектре с точностью $\sim 30\%$, оказалось $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-2}$. Рассчитанные энергии частиц, рассеянных вдоль траекторий 1, 1', 2 и 2' соответствовали экспериментально определенным положениям соответствующих пиков в спектре, а именно: $E/E_0 = 0,84$ и $E/E_0 = 0,92$ (вертикальные сплошные линии на рисунке 5, а, б). Ионы, рассеянные вдоль траекторий 2 и 2' предварительно или после отраженные на атоме ступеньки, испытывали обычно 8–10 столкновений с атомами цепочки. Их пробеги вдоль поверхности примерно составляли $25 \div 30 \text{ \AA}$, и неупругие потери энергии – примерно 20 % от полных потерь. Широкие максимумы 3, 4 и 3', 4' между пиками 1 и 2, а также 1' и 2' в работе [20] не были объяснены. Для объяснения максимумов 3, 4 и 3', 4' в спектрах нами были рассчитаны траектории ионов, рассеянных на поверх-

ности, на которой располагались полубесконечные моноатомные или изолированные ступеньки (атомные фрагменты) различной протяженности l , разделенные частями упорядоченной поверхности длины L . Схематически такие траектории показаны в нижней части рисунка 5. Траектории 3 и 3', вносящие вклад в широкие максимумы 3, 4 и 3', 4' в спектре, формируются двумя смежными ступеньками: частицы проходят под одной из ступенек и затем отражаются от торцевого атома второй ступеньки. Траектории квазидвукратного рассеяния 4 и 4' на торцевых атомах смежных ступенек также вносят вклад в эти максимумы. На рисунке 5 вклады вышеупомянутых траекторий обозначены вертикальными пунктирными линиями. Из расчетов следует, что возрастание числа атомов в первой ступеньке (атомный фрагмент) и соответственно ее удлинение с постоянным расстоянием между ступеньками L приводит к уменьшению энергии ионов, рассеиваемых вдоль траекторий типа 3 и 3'.

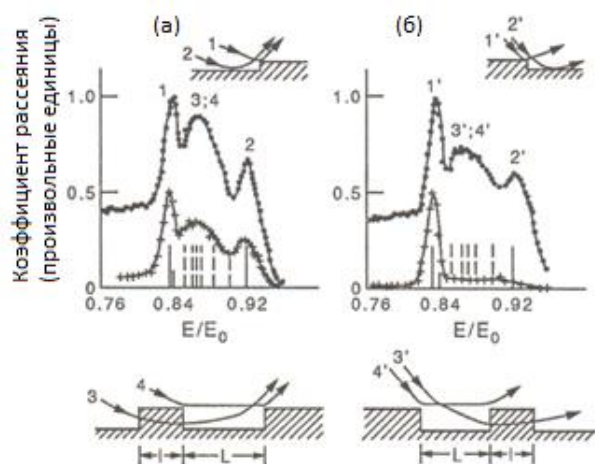


Рисунок 5. Энергетические распределения полного числа (.....) и ионной компоненты (+ + + +) частиц аргона, рассеянных на угол $\theta = 30^\circ$ поверхностью $\text{Cu}(100) \langle 100 \rangle$ при $\psi = 7^\circ$ (а) и 23° (б). Рассчитанные положения энергии в спектре, соответствующие рассеянным ионам, обозначены сплошными и пунктирными вертикальными линиями

Изменение числа атомов в первой ступеньке (атомный фрагмент) от одного до четырех дает возможность получить траектории рассеянных ионов типа 3 и 3' с энергиями, покрывающими весь интервал относительных энергий широкого максимума от $E/E_0 = 0,85$ до $E/E_0 = 0,90$. Наиболее вероятными оказались ступеньки (атомные фрагменты), содержащие два или три атома разделенные частями упорядоченной поверхности длиной $L = 15 \div 45 \text{ \AA}$. Рассеяние на таких ступеньках вносит вклад в область пиков 3, 4 и 3', 4' широкого максимума ($E/E_0 = 0,86 \div 0,88$). Расстояния между атомными ступеньками (фрагментами) варьируются от минимального, равного двум постоянным решеткам $\text{Cu}(100)$, до $\sim 45 \text{ \AA}$. Наличие и величина пиков 2 и 2' в спектре подтверждает существование расстояний между

ступеньками в интервале $\sim 25 \div 45 \text{ \AA}$. Траектории типа 4 и 4' слабо чувствительны (по значению энергии) к расстоянию между ступеньками, но их вероятность существенно уменьшается с ростом L . Интересно отметить, что исчезновение пиков 2', 3' и 4' в ионной компоненте рассеянного пучка при $\psi = 23^\circ$ хорошо согласуется с характером соответствующих траекторий. Выводы относительно пространственной протяженности атомных ступенек и расстояний между ними, полученные с использованием сопряженного потенциала, хорошо согласуются с результатами описанными выше и полученными с использованием универсального потенциала Бирзака-Литтмарка-Циглера.

Таким образом, из сравнения результатов моделирования траекторий и энергий рассеянных частиц с экспериментальными энергетическими распределениями можно сделать заключение, что при бомбардировке поверхности $\text{Cu}(100)$ ионами Ag^+ с начальной энергией 15 кэВ при экспериментальных условиях [20], на поверхности образуются изолированные моноатомные ступеньки (фрагменты), содержащие несколько (от одного до четырех) атомов. Расстояния между ступеньками варьируются от двух постоянных решеток для $\text{Cu}(100)$ до $\sim 45 \text{ \AA}$. Наиболее вероятным является появление ступенек (фрагментов), содержащих два или три атома, разделенные частями упорядоченной поверхности длиной $L = 15 \div 45 \text{ \AA}$. Оценка числа атомных ступенек, рассчитанная нами на основе предлагаемой модели нарушенной поверхности согласуется со значением $\sim 2 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-2}$, полученным в работе [20].

2.2 Десорбция молекул с поверхности монокристалла

Моделировались диссоциативная и недиссоциативная десорбции адсорбированных молекул [8]. Атом или молекула считались десорбированными, если их импульсы после всех возможных столкновений были направлены в сторону вакуума и их энергии были достаточными для преодоления поверхностного потенциального барьера. Для расчетов недиссоциативной десорбции молекул с поверхности монокристалла как димеров, использовалось приближение, подобное «отрывной» модели. В соответствии с этим приближением ион в результате серии коррелированных столкновений может выбить молекулу без разрыва связи между ее атомами, если относительная кинетическая энергия атомов не превышает энергию диссоциации молекулы:

$$E_r^{\text{mol}} = m_2 / 4 (v_1 - v_2)^2 \leq \varepsilon \quad (1)$$

и энергия центра масс достаточна для преодоления энергии связи молекулы с поверхностью E_b :

$$E_c = m_2 / 4 (v_1 + v_2)^2 \geq E_b, \quad (2)$$

где m_2 – масса атома молекулы, $v_{1,2}$ – скорости атомов молекулы. Молекула рассматривалась как десорбированная без диссоциации, если импульс ее центра масс был направлен в вакуум и удовлетворя-

лись условия (1) и (2). Для таких молекул рассчитывались их распределения по полярному δ и азимутальному ϕ углам вылета, а также коэффициент десорбции молекул кислорода без диссоциации. Поведение овалов рассеяния дает возможность определить места адсорбции двухатомных молекул в плоскости поверхности.

Показано, что при скользящей ионной бомбардировке возможна интенсивная десорбция адсорбированных молекул кислорода без диссоциации. На рисунке 6 представлены зависимости коэффициентов десорбции молекул кислорода от энергии налетающих ионов N^+ при угле скольжения $\psi=9^\circ$, бомбардирующих покрытую кислородом поверхность $Ag(110)$. Наблюдается интенсивная десорбция адсорбированных частиц при $E=2$ кэВ. Эта зависимость показывает, что при низких энергиях адсорбированные молекулы обычно десорбируются как молекулы, однако с ростом энергии ($E > 2$ кэВ) вероятность десорбции без диссоциации уменьшается.

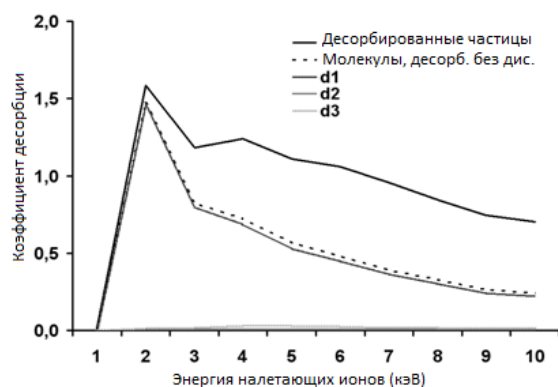
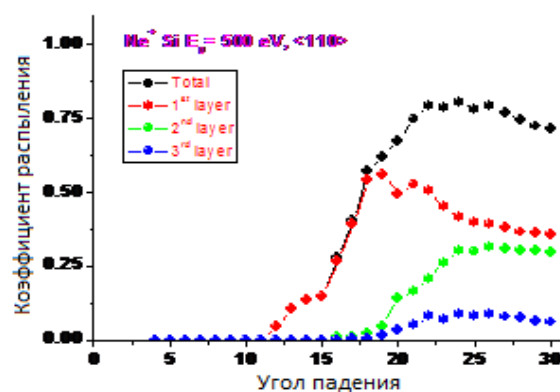


Рисунок 6. Зависимости коэффициентов десорбции молекул кислорода от энергии налетающих ионов N^+ при угле скольжения $\psi=9^\circ$, бомбардирующих покрытую кислородом поверхность $Ag(110)$ [8]

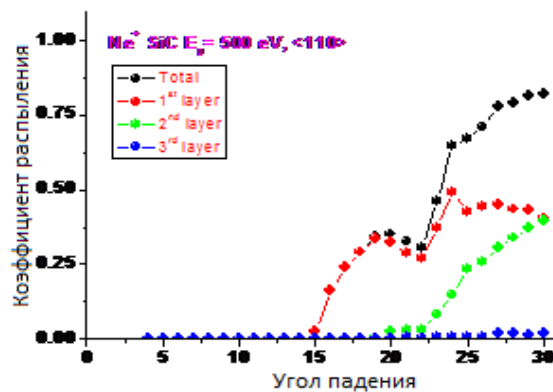
2.3 Послойное распыление поверхности монокристалла

В разделе представлены результаты компьютерного моделирования процесса распыления поверхностей $Si(001)$ и $SiC(001)$ при скользящей бомбардировке ионами Ne^+ с начальными энергиями 0,5–5 кэВ [21, 22]. На рисунке 7, а, б сравнены угловые зависимости коэффициентов распыления поверхностей $Si(001)$ и $SiC(001)$, бомбардируемых ионами Ne^+ с энергией 0,5 кэВ, с вкладом в распыление первых трех поверхностных слоев. Видно, что на всех зависимостях существуют пороговые углы скольжения, при меньших углах распыление не наблюдается. При углах падения, меньших порогового угла налетающие ионы не могут проникнуть в кристалл и распылить атомы мишени. С ростом энергии налетающих ионов пороговый угол смещается в сторону меньших значений угла падения налетающих ионов. При углах падения ψ больших чем пороговый угол, число первично выбитых атомов (ПВА)

вначале растет и достигает своего максимума. Вблизи порогового угла существует плато, так как энергия ионов недостаточна как для продолжительного движения ионов в пределах поверхностных полуканалов, так и для проникновения в более глубокие слои. С ростом начальной энергии это плато исчезает и коэффициент распыления уменьшается при больших ψ . Это уменьшение числа ПВА объясняется частичным проникновением ионов в более глубокие слои и преобладанием каскадного механизма распыления. Очевидно, что относительные вклады каждого слоя в величину полного числа ПВА существенно зависят от угла падения. В интервале углов $\psi = 11\text{--}20^\circ$ для Si, распыление имеет место только с первого слоя.



а)



б)

Рисунок 7. Коэффициенты распыления $Si(001)$ (а) и $SiC(001)$ (б) в зависимости от угла падения бомбардирующих ионов Ne^+

Рассчитаны коэффициенты распыления поверхностей $Si(001)$ и $SiC(001)$, подразделенные на вклады в распыление первых трех слоев поверхности в зависимости от энергии налетающих ионов Ne^+ для $\psi = 10^\circ$. Пороговая энергия распыления для этих случаев составляет примерно 1 кэВ. Оказалось, что основной вклад в полный коэффициент распыления вносит первый слой. Более того, в интервале энергий 0,5–1,5 кэВ распыление происходит только с первого слоя. Дальнейший рост энергии ионов при-

водит к росту вклада второго и третьего слоев. Вклад в распыление с третьего слоя больше, чем со второго слоя, когда атомные ряды второго слоя располагаются непосредственно под первым слоем в направлении $\langle 110 \rangle$. Из полученных результатов следует, что выбором угла падения и начальной энергии возможно добиться послойного распыления поверхности. Таким образом, особенности образования первично выбитых атомов от дачи (ПВА) при скользящем падении ионного пучка на атомно-гладкую поверхность монокристалла способствуют ее послойному распылению. Для реализации механизма послойного распыления необходимо, чтобы часть энергии иона, соответствующая нормальной компоненте его скорости, была бы меньше, чем порог распыления атомов слоя, следующего за поверхностью, то есть $E_i \sin^2 \psi_i < E_d$, где E_i – энергия иона до i -го столкновения, ψ_i – угол между направлением движения иона и осью полуканала до i -го столкновения, E_d – энергия смещения атомов второго слоя (в случае рассмотрения нижней цепочки полуканала). В этих условиях возможно добиться последовательного удаления слоев без нарушения последующего слоя при удалении предыдущего.

2.4 Ионная имплантация в приповерхностные слои монокристалла

В данном разделе представлены результаты компьютерного моделирования процесса ионной имплантации в приповерхностные слои GaAs(001) при бомбардировке ионами Be^+ и Se^+ с начальными энергиями $0,5 \div 10$ кэВ под скользящими углами падения ψ [23, 24]. Поверхность (001) III-V полупроводников является одной из наиболее широко используемых поверхностей полупроводников в процессах как гомо-, так и гетероэпитаксиального роста при изготовлении электронных устройств. Имплантация ионов Be и Se в GaAs(001) под скользящими углами позволяет вводить акцепторные и донорные примеси и ультра мелкие переходы в этот полупроводник. Пробеги имплантированных частиц в поверхностных полуканалах и каналах в этих условиях существенно возрастают и достигают сотен ангстрем благодаря эффекту каналирования.

На рисунке 8 представлены доли ионов Be и Se с начальной энергией 1 кэВ, имплантированных в поверхность GaAs(001) в зависимости от угла скольжения для направлений $\langle 110 \rangle$ и $\langle 1\bar{1}0 \rangle$. Небольшое различие этих зависимостей для двух направлений объясняется различной формой полуканалов в указанных направлениях. Видно, что при углах скольжения, меньших некоторого критического угла имплантация не имеет места. Значение критического угла уменьшается с уменьшением массы налетающего иона. При углах падения, при которых наблюдаются минимумы зависимостей, налетающие ионы интенсивно отражаются стенками полуканалов вследствие эффекта ионной фокусировки. Показано, что в случае скользящих взаимодействий ион-по-

верхность монокристалла основной пик профиля распределения внедренной примеси по глубине существенно мелок. Профили распределения имплантированной примеси зависят от массы иона, ориентации кристалла и угла скольжения. Сравнение профилей показало, что пробеги для ионов Se гораздо более мелкие и полуширина профиля распределения уже, чем для ионов Be. Полученные результаты позволяют подбирать оптимальные условия для получения профилей распределения примесей с требуемой формой в приповерхностной (5–10 атомных слоев) области кристалла.

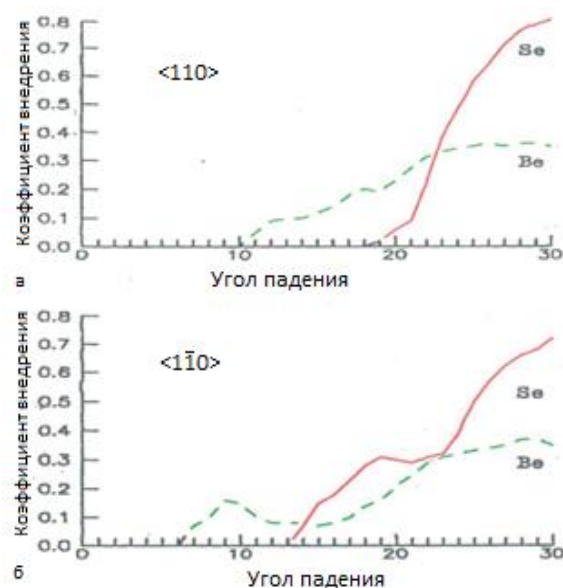


Рисунок 8. Зависимость числа ионов Be и Se с начальной энергией 1 кэВ, имплантированных в поверхность GaAs(001) от угла скольжения ψ . Число налетающих ионов 10^4

2.5 Послойный анализ поверхности при ионной бомбардировке под скользящими углами

Предложенный механизм послойного распыления поверхности монокристалла при бомбардировке под скользящими углами открывает возможность для разработки высокочувствительного метода послойного анализа кристаллических поверхностей. Целью предлагаемого метода является повышение точности и чувствительности элементного и фазового анализа кристаллических твердых тел, а также определения профиля концентрационных распределений имплантированных в твердое тело примесей [25]. Поставленная цель достигается тем, что послойное распыление мишени ионами осуществляют в диапазоне углов скольжения $\psi = 1 \div 5^\circ$, отсчитываемых от поверхности мишени, в диапазоне энергий ионов, верхний предел которой ниже порога распыления атомов поверхности мишени вдоль нормальной составляющей их скорости. При этом в ходе распыления мишень равномерно вращают относительно оси, нормальной к поверхности распыления. Отбор для масс-анализа вторичных частиц осуществ-

влияют по азимуту в угловом интервале $\varphi = 85 \pm 5^\circ$ к направлению бомбардирующего пучка. Перед анализом осуществляют предварительную обработку поверхности тем же пучком до шероховатости поверхности $R_z = 0,05$ мкм. При скользящих углах падения первичного пучка ионы рассеиваются в зеркальном направлении ($\theta = 2\psi$) по отношению к налетающему пучку и они пространственно отделены от первично выбитых атомов отдачи (ПВА) [26]. Вследствие этого увеличивается отношение сигнала к фону, а также обеспечивается возможность в равных условиях определять концентрацию примесей, находящихся не только в узлах кристаллической решетки, но и в ее междоузлиях. С помощью электронной пушки пучком электронов дополнительно ионизовали распыленные в направлении ($\varphi = 85 \pm 5^\circ$) первично выбитые атомы примесных элементов. Рассчитанные энергетические и пространственные распределения ПВА представлены на рисунке 9.

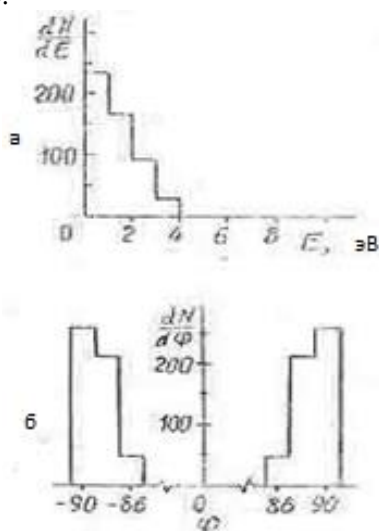


Рисунок 9. Энергетические (а) и пространственные (б) распределения ПВА при скользящей бомбардировке ионами Ar^+ поверхности $Cu(100) < 110 >$.
 $E_0 = 7$ кэВ и $\psi = 5^\circ$

Таким образом, располагая масс-анализатор перпендикулярно относительно плоскости падения пучка ($\varphi = 85 \pm 5^\circ$), мы увеличиваем чувствительность анализа, так как энергетическое распределение ПВА заключено в узком интервале $\sim 1-4$ эВ энергий, что обеспечивало достаточно высокую и примерно равную степень ионизации для всех распыленных частиц. Это позволяло увеличить точность количественного анализа в несколько раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе выполненных исследований можно сделать следующие выводы:

- В области скользящего ионного рассеяния упругие потери энергии значительно меньше неупругих. Преобладание неупругих потерь энергии проявляется в эффективности различных неупругих

процессов, сопровождающих скользящее рассеяние ионов поверхностью монокристалла;

- Показано, что при скользящей ионной бомбардировке поверхности монокристалла возможна интенсивная десорбция адсорбированных молекул без диссоциации;

- Поведение петель рассеяния в зависимости энергии рассеянных ионов от полярного угла вылета дает возможность определения мест адсорбции двухатомных молекул в плоскости поперечной относительно атома мишени;

- Из сравнения результатов компьютерного моделирования траекторий рассеянных частиц с экспериментальными энергетическими распределениями показано, что в условиях бомбардировки поверхности $Cu(100)$ ионами Ar^+ с начальной энергией $E_0 = 10$ кэВ, на поверхности образуются изолированные монокристаллические ступеньки (фрагменты), содержащие несколько атомов (от одного до четырех). Расстояния между ступеньками варьируются от двух постоянных решеток до ~ 45 Å;

- Рассчитаны коэффициенты распыления поверхностей $Si(001)$ и $SiC(001)$ при бомбардировке ионами неона в зависимости от начальной энергии налетающих ионов ($E_0 = 0,5-5$ кэВ), угла падения ($\psi = 3-30^\circ$) и азимутального угла падения ($\xi = 0-180^\circ$). Показано, что возможно эффективное послойное распыление вблизи пороговых углов и энергий распыления;

- Параметры монокристаллов (постоянная решетки, энергия связи и массы атомов) существенно влияют на угловые и энергетические зависимости коэффициента распыления. В общем, коэффициент распыления поверхности $SiC(001)$ больше, чем коэффициент распыления поверхности $Si(001)$;

- Показано, что в случае ионов Be^+ и Se^+ имплантируемых в поверхность $GaAs(001)$ основной пик распределения имплантированных ионов по глубине расположен значительно ближе к поверхности и пробеги ионов Se – значительно короче.

- Полученные результаты позволяют выбирать оптимальные условия для получения распределения имплантированных ионов по глубине с требуемой формой в приповерхностной (5–10 атомных слоев) области кристалла;

- Предложен высокочувствительный способ послойного количественного анализа кристаллических твердых тел на основе разработанного механизма послойного распыления поверхности монокристалла при бомбардировке под скользящими углами.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность и признательность Э.С. Парилису за постановку задач исследований, внимание и поддержку на всех этапах их выполнения, а также Е.С. Машковой и незабвенному В.А. Молчанову за всемерную поддержку и признание наших исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Mashkova, E. S. and Molchanov, V. A. Medium Energy Ion Reflection from Solids. North-Holland Publ., Amsterdam -1985.
2. Eckstein W. Computer simulation of Ion-Solid Interactions. Springer, Heidelberg, -1991.
3. Parilis, E. S., Kishinevsky, L. M., Turaev, N. Yu., Baklitzky, B. E., Umarov, F. F., Verleger, V. Kh., Nizhnaya, S. and Bitensky, I. S. Atomic Collisions on Solid Surfaces. North-Holland Publ., Amsterdam. - 1993.
4. Машкова Е.С., Молчанов В.А. Применение рассеяния ионов для анализа твердых тел. -М.: -1995. Энергоатомиздат.
5. Van Hove M.A. Atomic Scale Structure: from Surfaces to Nanomaterials. Surf. Sci., -2009. -603, -PP.1301-1305,.
6. Begemann, S. H. A. and Boers, A. L. Surf. Sci., -1972. -30. 134.
7. Kapur Sh., Garrison B.J. Chem Phys. -1981.75. 445.
8. Dzhurakhalov A.A., Rahmatov S.E., Yadgarov I.D. Nucl. Instr. and Meth. B 230. -2005. 560.
9. Labanda J. G. C., Barnett S. A.: Sep., J. Electronic Mater. -1997.
10. Dzhurakhalov A. A., Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., B216, -2004. 202.
11. Rzeznik L., Paruch L. Garrison B.J., Postava Z. Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res., B269.-2011.- 1586.
12. Frost F., Fechner R., Flamm D., Ziberi B., Frank W., Schindler A. Appl. Phys. A, -2004.-78.- 651.
13. Umarov F. F., Dzhurakhalov A. A., Teshabaeva N. A., Appl. Surf. Sci., -1998. -125 -226.
14. Ziegler J.F., Biersack J.P., and Littmark U. Stopping and Ranges of Ions in Matters. Pergamon, NewYork. -1983.
15. Robinson, M. T. and Torrens, I. M. Phys. Rev., -1974.- B9,-5008.
16. Evdokimov I.N., Webb R.P., Armour D.G. and Karpuzov D.S. Radiat Eff. -1979. -42. -83.
17. Dzhurakhalov A.A., Umarov, F.F. Nucl. Instr. and Meth. -1998.-B 136-138, -1092.
18. Evdokimov I.N., Mashkova E.S., Molchanov V.A. Dokl.Akad.Nauk SSSR. -1969. -186. -549.
19. Parilis E. S., Turaev N.Yu. and Umarov F. F. Radiat. Eff., 24, 207 (1975).
20. Luitjens S.B., Algra A.J., Suurmeijer E.P.Th.M. and Boers A.L. Surf. Sci. -1980.-100.- 315.
21. Umarov F. F., Dzhurakhalov A. A., Teshabaeva N. A., Appl. Surf. Sci. -1998. -125. -226.
22. Umarov F. F., Dzhurakhalov A. A. Surf. Interface Anal. -2013.-45. – 83.
23. Dzhurakhalov A.A., Umarov F. F. IEEE. -2000. -232.
24. Dzhurakhalov A.A., Ferleger V.Kh., Khakimov S., Surf. Sci. - 1999. -188. – pp.433–435.
25. Груич Д.Д., Морозов С.Н., Пичко С.В., Белкин В.С., Умаров Ф.Ф. и Джурахалов А.А. Авторское свидетельство СССР № 1262594. Способ послойного количественного анализа кристаллических твердых тел, -1986.
26. Shulga V.I. Radiat Eff. -1980. – 51. -1.

ИОНДАРМЕН КӨЛБЕЙ СӘУЛЕЛЕНДІРУ НӘТИЖЕСІНДЕ МОНОКРИСТАЛДЫҢ БЕТТІК ҚАБАТЫНДА НАНОӨЛШЕМДІ ҚҰРЫЛЫМДАРДЫҢ ТУЫНДАУЫН КОМПЬЮТЕРЛІК МОДЕЛДЕУ

¹⁾ Ф.Ф. Умаров, ²⁾ А.А. Джурахалов, ³⁾ Қ.М. Мұқашев

¹⁾ Қазақ-Британ техникалық университеті, Алматы, Қазақстан

²⁾ Антверпен университеті, Антверпен, Белгия

³⁾ Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Бастапқы энергиясы $E_0 = 0,5 \div 10$ кэВ болатын қиғаш түскен N^+ , Ne^+ , Ar^+ , Kr^+ , Be^+ және Se^+ иондарының $Cu(100)$, $Ag(110)$, $Si(001)$, $SiC(001)$ және $GaAs(001)$ монокристалдарының беттік қабатымен әсерлесуінің, соған байланысты, алғашқы ығысқан атомдардың туындауын компьютерлік моделдеу арқылы зерттеу нәтижелері баяндалады. Қиғаш шашырау кеңістігінде шашыраған иондар энергиясының серпімді шығыны серпімсіз шығыннан көп төмен екендігі байқалды. Шашыраған иондардың энергиясын эксперимент нәтижесінде анықталған энергетикалық үлестірулермен салыстыру арқылы моноатомдық сатылардың орын алатынын және олардың мөлшерін анықтауға болады. Тозандата таралған бөлшектердің бұрыштық, кеңістік және энергетикалық үлестірілуі мен тиісті коэффициенттері есептелді. Иондардың монокристалдың беттік қабатына қиғаш түсуі нәтижесінде тозаң түрінде тараған және десорбцияланған бөлшектердің энергиясы өте төмен алғашқы ығысқан атомдар ағынын құрайтыны белгілі болды. Адсорбцияға қатысқан молекулалардың диссоциативті және диссоциативті емес десорбциясы зерттеліп, олардың диссоциативті емес десорбциясы үлесінің қарқындылығының жоғары болу мүмкіндігі көрсетілді. Бір және екі компонентті кристалдар үшін бөлшектердің ығысу бұрышына байланысты тозаңдау табалдырығы табылып, сәулелендіруші иондардың массасына, энергиясына және кристалдың құрылымдық көрсеткіштеріне тәуелділігі анықталды. Қиғаш бағытта иондармен сәулелендіру арқылы сырғанау бұрышының шашырау табалдырығының оптималды аралығында, төменгі индекстік бағыттарда монокристалдың бетін қабат- қабатымен тозаңдатуға болатындығы дәлелденді. Кристалдың беттік қабатына жақын маңда имплантацияланған иондардың әртүрлі тереңдікте қажетті мөлшерде үлестірілу дәрежесін белгілеу шарттары мен жолдары анықталып, беттік аралықты қат-қабат бойынша талдаудың сезімталдығы жоғары әдісі ұсынылды.

Түйін сөздер: ион-беттік қабаттың сырғанай әсерлесуі, иондардың шашырауы, энергияның серпімді және серпімсіз шығыны, монокристалдың беттік кеңістігін қабаттап тозаңдату, монокристалдың бетін қабатпен талдау, иондар имплантациясы, компьютерлік модель.

COMPUTER SIMULATION OF NANO-DIMENSIONAL EDUCATION STRUCTURES ON THE SURFACE OF A MONOCRYSTAL AT THE SLIDE ION BOMBING

¹⁾ F.F. Umarov, ²⁾ A.A. Djurakhalov, ³⁾ K.M. Mukashev

¹⁾ *Kazakh-British Technical University, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *University of Antwerp, Antwerp, Belgium*

³⁾ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

This work deals with the computer simulation of low- and medium energy ($E_0=0.5\div 10$ keV) N^+ , Ne^+ , Ar^+ , Kr^+ , Be^+ и Se^+ ions sliding collisions on the surface of a Cu(100), Ag(110), Si(001), SiC(001) and GaAs(001) solids, and of the accompanying effects, namely, scattering, sputtering and surface implantation. It has been shown that under these conditions the inelastic energy losses become predominant over the elastic ones. The anomalous energy losses observed experimentally at the grazing ion scattering by the single crystal surface were explained. It has been shown that from the correlation of the experimental and calculated energy distributions of the scattered particles, one may determine a spatial extension of the isolated atomic steps on the single crystal surface damaged by the ion bombardment. Results obtained can be also used to study short-range order in alloys undergoing ordering. Dissociative and non-dissociative desorption of adsorbed molecules were simulated. It was shown that at grazing ion bombardment the intensive non-dissociative desorption of adsorbed molecules is possible. A preferential emission of Cu atoms in the case of Cu_3Au (001) surface sputtering is observed. It was shown that in the case of grazing ion bombardment the layer-by-layer sputtering is possible and its optimum are observed within the small angle range of the glancing angles near the threshold sputtering angle. The obtained results allow to select the optimum conditions for obtaining implanted depth distributions with demanded shape in narrow near-surface region (5–10 atomic layers) of crystals. The highly sensitive layer-by-layer analysis method was proposed on the basis of layer-by-layer sputtering mechanism.

Keywords: grazing ion-surface interactions, ion scattering, elastic and inelastic energy losses, sputtering yield, layer-by-layer sputtering, surface implantation, surface channeling, grazing ion bombardment, layer-by-layer analysis of single crystal surface; computer simulation.

УДК 621.039.66

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЛИТИЕВОЙ КПС НА ОСНОВЕ КАРБОНОВОЙ ТКАНИ, АРМИРОВАННОЙ УНТ

Тулубаев Е.Ю., Понкратов Ю.В., Заурбекова Ж.А., Гордиенко Ю.Н., Барсуков Н.И.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

Данная работа описывает технологию изготовления литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной углеродными нанотрубками. В работе описаны все основные этапы изготовления литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ. Приведены микроструктурные и рентгенофазные исследования изготовленного образца литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ, а также определены его плотность и теплопроводность.

Проведенные работы показали, что карбоновая ткань с поверхностью волокон, армированной УНТ, полностью смачивается жидким литием. Разработанная технология в полной мере подходит для изготовления образцов литиевой КПС для дальнейших исследований.

ВВЕДЕНИЕ

Материаловедческие исследования, проводимые в рамках реализации международных программ по созданию термоядерных реакторов ИТЭР и ДЕМО, показали, что одним из наилучших материалов для применения в качестве ОПМ (обращенного к плазме материала) в установках управляемого термоядерного синтеза является жидкий литий и материалы на его основе [1–3]. Использование жидкого лития в качестве плазмообращенного материала особенно перспективно, если литий заключен в так называемую капиллярно-пористую систему (КПС) [4]. Основными преимуществами КПС, по сравнению с твердыми материалами, являются их устойчивость к деградации свойств и способность к самовосстановлению поверхности на основе капиллярных сил в условиях нормального плазменного разряда в установках термоядерного синтеза, а также при срывах плазмы.

Работы по данной тематике также ведутся и на Казахском материаловедческом токамаке КТМ. Установка на данный момент является единственным в мире токамаком, предназначенным для решения задач в области термоядерного материаловедения.

Казахстанскими учеными в сотрудничестве с ведущими в этой области международными научными организациями реализуется масштабный проект по созданию и испытанию макета литиевого дивертора (МЛД), который используется в токамаке КТМ, как один из сменных сегментов приемного диверторного устройства [5]. На рисунках 1–3 показаны некоторые этапы реализации этого проекта.

Особенностью МЛД является то, что в качестве обращенного к плазме материала используется литиевая КПС, которая установлена на приемную поверхность диверторного элемента и изготовлена на основе сетки из нержавеющей стали и вольфрамового войлока.

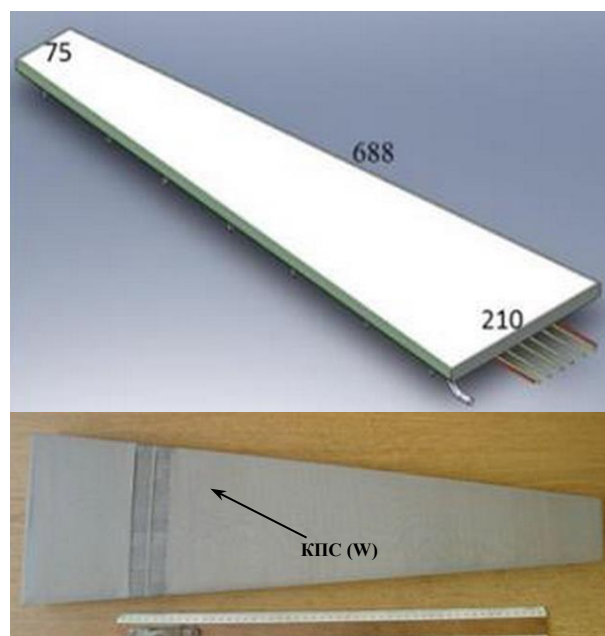


Рисунок 1. Конструктивная схема МЛД и КПС, смонтированная на модели дивертора

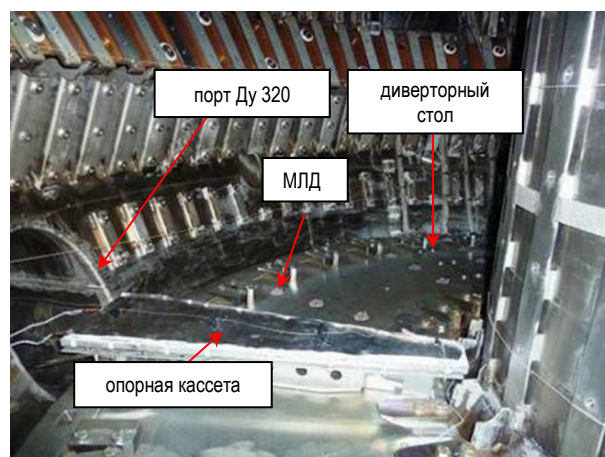


Рисунок 2. Размещение модели на диверторном столе токамака КТМ

Проводимые исследования подтвердили перспективность использования лития и литиевых технологий в установках управляемого термоядерного синтеза. Однако имеющаяся технология изготовления литиевых КПС требует дальнейшего развития с точки зрения оптимизации материала основной матрицы, в которую заключен жидкий литий. Важно определить основные технологические процедуры изготовления литиевых КПС с новым, ранее не применяемым материалом матрицы, таким как карбоновая ткань с синтезированными на поверхности волокон углеродными нанотрубками.

МАТЕРИАЛЫ И ИХ СВОЙСТВА

Литиевые КПС и их свойства

Идея использования жидкого лития в установках термоядерного синтеза получила развитие на основе использования сил поверхностного натяжения в капиллярных каналах, так называемых капиллярно-пористых системах (КПС). Этот композитный материал с жидкой и твердой составляющими может рассматриваться как новый класс материалов для токамаков, что позволит реализовать все преимущества жидких металлов и преодолеть инженерные проблемы при их использовании.

Различные пористые материалы могут служить в качестве основы КПС, но должны отвечать целому ряду специфических и часто противоречивых требований. Структура КПС должна состоять из открытых пор при специальном распределении их размера по сечению материала. Минимальный размер пор на поверхности и достаточно большие поры в теле материала или использование артериальной структуры должны обеспечивать максимальное капиллярное давление при низком гидравлическом сопротивлении, которое определяется соотношением:

$$P_C = 2 \sigma(T) \cdot \cos \theta / R_{\text{эфф}},$$

где θ – краевой угол смачивания, $R_{\text{эфф}}$ – эффективный радиус пор в капиллярной системе.

Капиллярное давление обеспечивает стабильность жидкого металла в условиях МГД-воздействий, предотвращая его разбрызгивание, способствует формированию и самовосстановлению поверхности вакуумной камеры (ВК) в процессе эксплуатации, подпитку и заполнение КПС жидким металлом. Для дальнейшего развития использования литиевых КПС в установках УТС необходимо исследовать возможности применения в качестве матрицы нового материала – карбонового волокна, армированного УНТ.

Углеродные нанотрубки и методы их синтеза

Углеродные нанотрубки представляют собой новый класс углеродных наноматериалов и углеродных каркасных структур со свойствами, которые в значительной степени отличаются от других форм углерода, таких как графит и алмаз.

Основная классификация углеродных нанотрубок проводится по количеству составляющих их

слоев. УНТ делятся на два вида: однослойные и многослойные.

Однослойные – простейший вид нанотрубок. Большинство из них имеют диаметр около 1 нм при длине, которая может быть во много тысяч раз больше. Структуру однослойных нанотрубок можно представить как «обертывание» гексагональной сетки графита (графена), основу которой составляют шестиугольники с расположенными в вершинах углов атомами углерода, в бесшовный цилиндр. Верхние концы трубок закрыты полусферическими крышечками, каждый слой которых составлен из шести- и пятиугольников, напоминающих структуру половины молекулы фуллерена (см. рисунок 3)

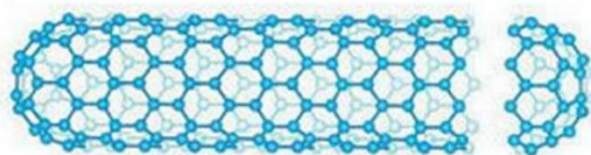


Рисунок 3. Графическое изображение однослойной нанотрубки

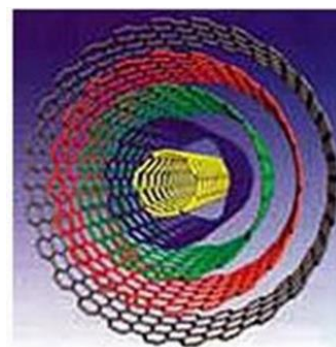


Рисунок 4. Графическое изображение многослойной нанотрубки (модель «матрешка»)

Многослойные – состоят из нескольких слоев графена, сложенных в форме трубки. Расстояние между слоями равно 0,34 нм, то есть такое же, как и между слоями в кристаллическом графите. Используют две модели для описания их структуры. Многослойные нанотрубки могут представлять собой несколько однослойных нанотрубок, вложенных одна в другую (так называемая «матрешка») (см. рисунок 4). В другом случае, один «лист» графена оборачивается несколько раз вокруг себя, что похоже на прокрутку пергамента или газеты (модель «пергамента») [6].

Наиболее распространенными методами синтеза нанотрубок являются электродуговой метод, лазерная абляция и химическое осаждение из газовой фазы (CVD).

Рассмотрев вышеописанные методы синтеза УНТ можно сказать, что в нашем случае для реализации цели исследований, наиболее приемлемым и доступным является CVD-метод.

Взаимодействия жидкого лития с материалами на основе углерода

Для разработки литиевых устройств, работающих в условиях термоядерных реакторов (ТЯР) и созданных на основе капиллярно-пористых систем из карбонового волокна, армированного углеродными нанотрубками, был проведен анализ физико-химических закономерностей взаимодействия жидкого лития с графитом и материалами на его основе. Под «условиями ТЯР» предполагается работа систем, содержащих жидкий литий в условиях вакуума не хуже 10^{-2} Па при температурах в стационарном состоянии до ~ 873 К и кратковременно до ~ 1273 К. Как известно, в системе литий-углерод образуется стабильный карбид Li_2C_2 , имеющий ряд аллотропических превращений (см. рисунок 5).

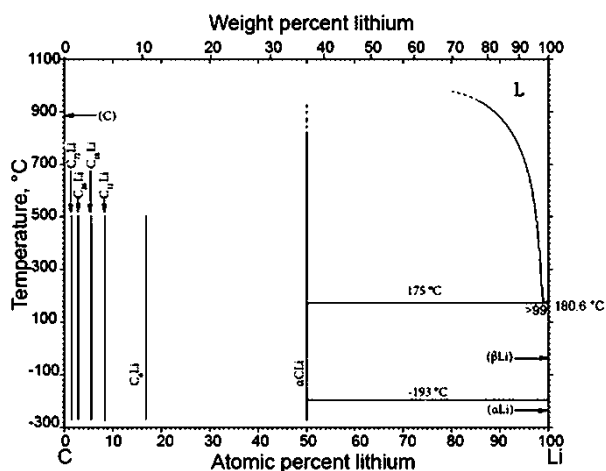


Рисунок 5. Li-C диаграмма состояния углерод – литий [7]

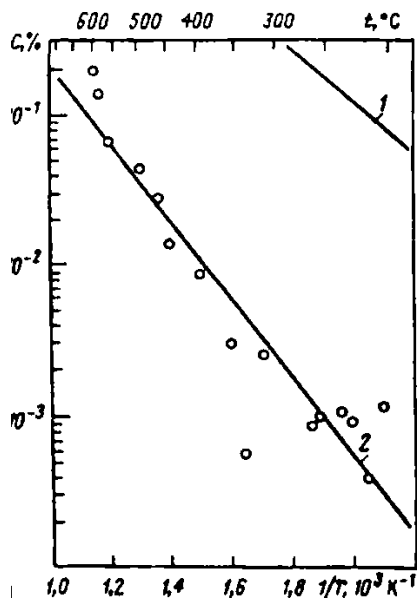


Рисунок 6. Растворимость углерода в литии

Литий с Li_2C_2 образует эвтектику с температурой плавления 438–448 К, в которой содержится около 2,8 % карбида лития [8, 9]. Растворимость углерода

в жидком литии (C, %) в соответствии с приведенной в [8] диаграммой определяется зависимостью:

$$\ln C = 5,772 - 3885 \cdot T^{-1}.$$

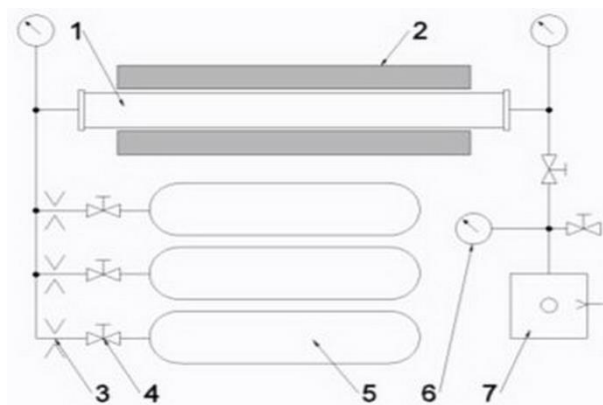
Столь высокие значения растворимости, близкие к растворимости азота в литии, не подтверждаются более поздними данными (см. рисунок 6), результаты которых рекомендуются для использования.

Это дает основание рассчитывать на приемлемый уровень коррозионной совместимости углеродных нанотрубок с жидким литием в условиях ТЯР.

АРМИРОВАНИЕ МАТРИЦЫ КПС УГЛЕРОДНЫМИ НАНОТРУБКАМИ

Установка для синтеза УНТ

Для изготовления матрицы КПС из карбоновой ткани, армированной УНТ, была использована ранее разработанная установка, состоящая из реактора и газораспределительной системы (см. рисунок 7).



1 – резистивная печь; 2 – кварцевый реактор; 3 – игольчатый нагреватель; 4 – вентиль; 5 – емкость с рабочим газом; 6 – датчик давления; 7 – форвакуумный насос

Рисунок 7. Принципиальная схема установки для синтеза УНТ

Реактор состоит из кварцевой трубчатой печи с резистивным нагревом, диапазон рабочих температур от 773 К до 1273 К. В печь помещен проточный кварцевый реактор, оснащенный фланцами KF-25 для создания герметичного рабочего объема с необходимой атмосферой контролируемого состава. Температура печи контролируется термопарой K-типа (хромель-алюмель), расположенной в средней части нагревательной спирали, и регулируется цифровым контроллером температуры OMRON E5CN, который управляет твердотельным реле мощностью 40 А.

Установка позволяет использовать в качестве транспортных газов азот, аргон, гелий из баллонов и водород, получаемый из генератора водорода электролизного типа.

Синтез УНТ на карбоновой ткани

Образец карбоновой ткани с предварительно нанесенным слоем катализатора (см. рисунок 8, а), который представлял из себя наночастицы оксида никеля, был помещен в установку для синтеза УНТ.

Нагрев образца проводился в атмосфере водорода. Во время нагрева за счет восстановления наночастиц оксида никеля происходило образование наночастиц чистого металлического никеля, которые служили в дальнейшем катализаторами для роста УНТ. При достижении 923 К температура была стабилизирована, после чего в реактор напущены пары этилового спирта для синтеза УНТ. Получение паров спирта было реализовано путем направления потока водорода через барботер, заполненный этанолом. Пропускание водорода через барботер продолжалось в течение 15 минут. Ранее проведенные исследования показали, что за это время поверхность каталитических частиц успевает деактивироваться, и рост УНТ прекращается, соответственно, дальнейшее продолжение синтеза не требуется. После завершения процесса печь остывала естественным образом в потоке водорода. После остывания в атмосфере водорода до температуры ниже 423 К изготовленный образец был извлечен из установки (рисунок 8, б).



а)



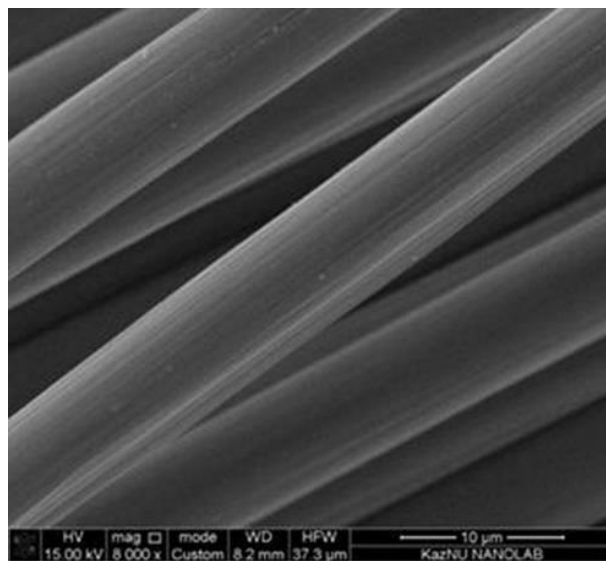
б)

Рисунок 8. Образец матрицы КПС на основе:
(а) – карбоновой ткани без УНТ ткани;
(б) – карбоновой ткани, армированной УНТ

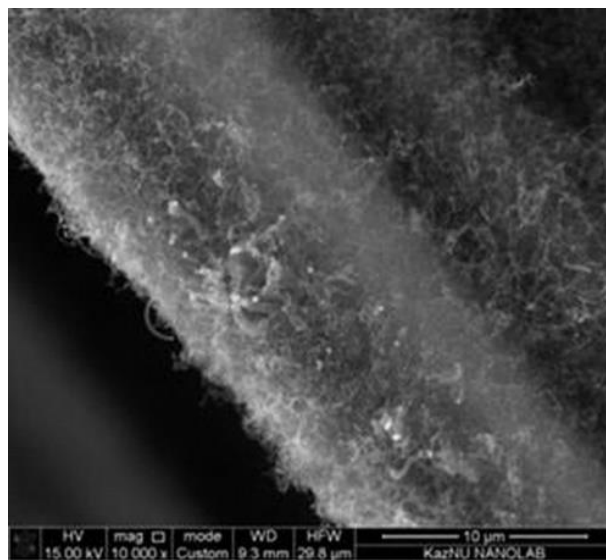
Структура полученного образца была проанализирована методом SEM и рамановским рассеянием (см. рисунки 9, 10). На рисунке 9 показаны электронно-микроскопические снимки ткани до синтеза (см. рисунок 9, а) и ткани после синтеза УНТ (см.

рисунок 9, б). Видно, что ткань до синтеза УНТ являлась чистой, после синтеза на ней появились УНТ.

Рамановские спектры ткани до синтеза (см. рисунок 10, а) показывают наличие двух основных полос D и G, расположенных при частотах 1355 см^{-1} и 1590 см^{-1} соответственно, что характерно для аморфного углерода. В рамановских спектрах ткани после синтеза (см. рисунок 10, б) линии D и G имеют незначительную полуширину, также присутствуют линии 2D и D + G. Пик RBM соответствует радиальным колебаниям (radial breathing mode). Такие спектры характерны для многостенных УНТ.

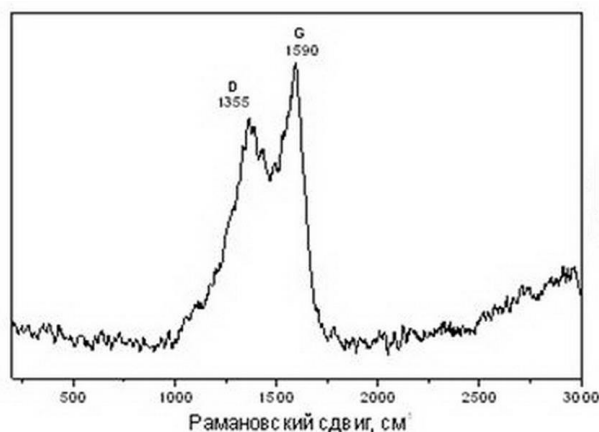


а)

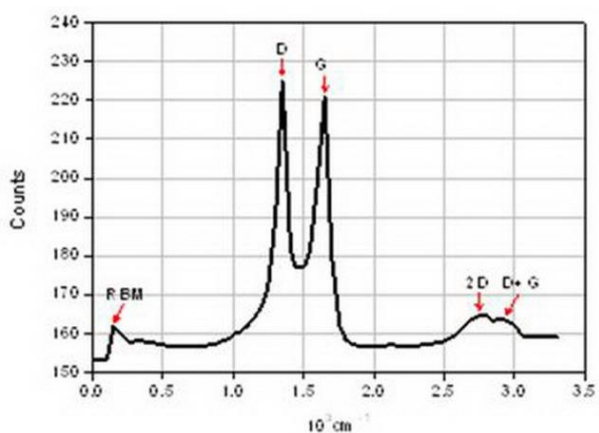


б)

Рисунок 9. SEM снимок ткани без УНТ (а) и с УНТ (б)



а)



б)

Рисунок 10. Рамановский спектр ткани без УНТ (а) и с УНТ (б)

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ОБРАЗЦА ЛИТИЕВОЙ КПС

Устройство для изготовления

Для изготовления образца литиевой КПС было разработано специальное экспериментальное устройство (см. рисунок 11), расположенное на установке ВИКА (см. рисунок 12).

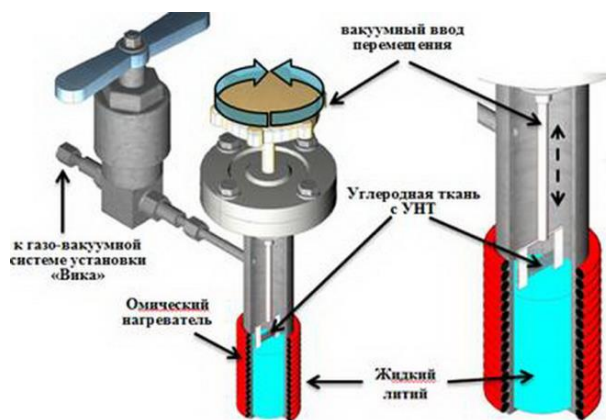


Рисунок 11. Устройство для заливки КПС жидким литием

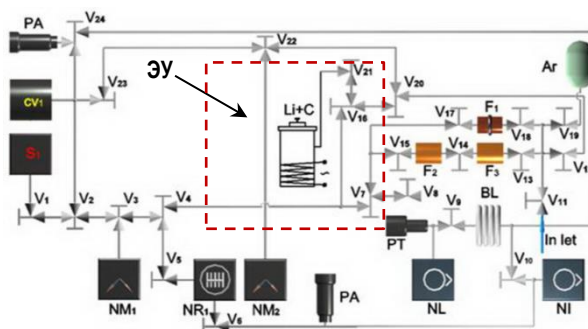


Рисунок 12. Экспериментальное заливное устройство, подсоединенное к газ-вакуумной системе установки ВИКА

Технология изготовления литиевой КПС

Этапы изготовления литиевой КПС были следующими. Сначала образец из карбоновой ткани с синтезированными на поверхности волокон УНТ размером 10×30 мм был закреплен в рамку из нержавеющей стали (см. рисунок 13). Рамка, в свою очередь, крепилась на гермовводе экспериментального устройства (см. рисунок 13). Далее, в соответствии с ранее разработанной технологией, были проведены процедуры изготовления литиевой КПС на основе карбоновой ткани с УНТ, которые заключались в следующем:

- после загрузки очищенного лития и матрицы КПС в экспериментальное устройство, и откачки до давления не выше 10^{-5} Па, при помощи резистивного нагревателя литий был разогрет до температуры 473 К и находился на стационаре в течение часа в условиях непрерывной откачки;

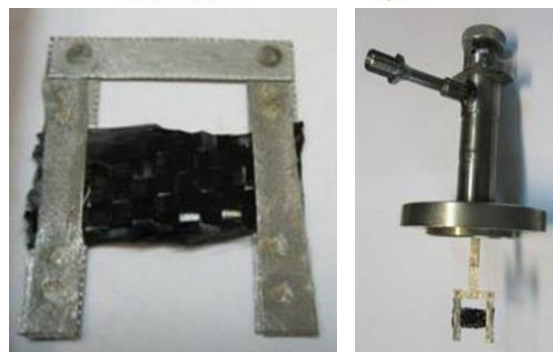
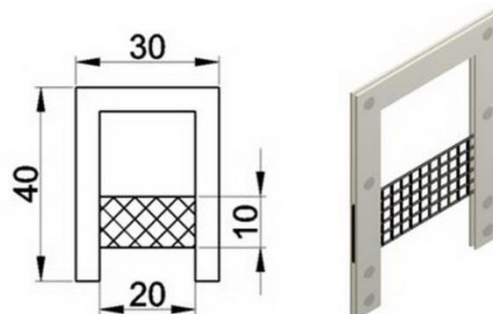


Рисунок 13. Образец, закрепленный в рамку из нержавеющей стали 12X18H10T

- затем литий нагревался до температуры 673 К и при достижении полки при помощи вакуумного ввода перемещения, матрица КПС была опущена в жидкий литий на глубину от 2 до 3 мм и находилась в таком положении в течение 40 минут;
- далее литий нагревался до температуры 773 К и при достижении стационара по температуре находился при таком режиме в течение 20 минут;
- затем литий нагревался до температуры 873 К и при достижении стационара по температуре находился при таком режиме в течение 10 минут;
- после чего, предварительно закрыв откачку, в объем экспериментального устройства был напущен чистый аргон до давления порядка $13,3 \cdot 10^3$ Па и образец был медленно выведен из жидкого лития. Через 10 минут выключался нагрев и происходило естественное остывание экспериментального устройства.

Изготовление опытного образца

В результате проведенных процедур был изготовлен опытный образец литиевой КПС на основе карбоновой ткани с синтезированными на поверхности волокон УНТ (см. рисунок 14).

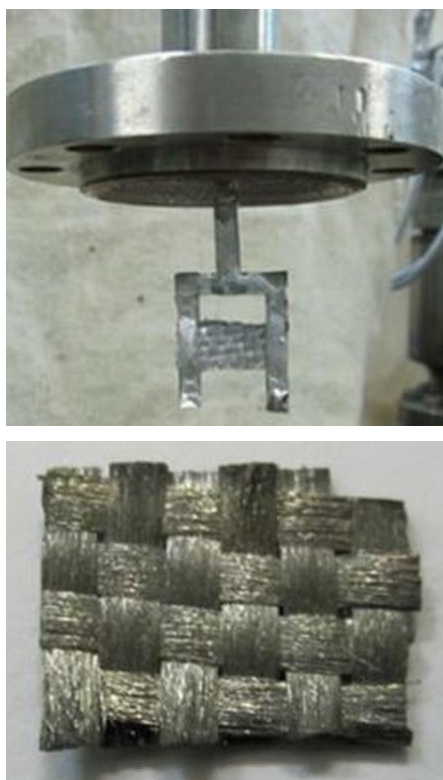


Рисунок 14. Изготовленный опытный образец литиевой КПС

ХАРАКТЕРИЗАЦИЯ ИЗГОТОВЛЕННОГО ОБРАЗЦА ЛИТИЕВОЙ КПС

Микроструктурные исследования

В последующем изготовленный образец был подвергнут исследованию методом электронной сканирующей микроскопии.

Исследования были проведены при помощи электронного сканирующего микроскопа Quanta 200i 3D (FEI Company). На рисунке 15 приведены СЭМ изображения поверхности образца литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ.

Изучение микроструктуры поверхности образцов показало, что матрица из карбоновой ткани с поверхностью волокон, покрытой УНТ, полностью заполнена металлическим литием. Поверхностная структура характеризуется как цельнометаллическая.

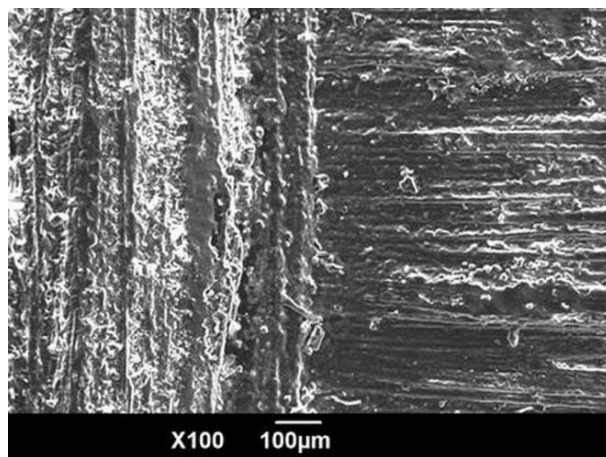


Рисунок 15. Микрофотографии изготовленного образца литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ (увеличение $\times 100$)

Рентгенофазовый анализ

Также в дальнейшем были проведены исследования с целью определения фазового состава изготовленных образцов литиевых КПС. Дифрактограммы были получены на дифрактометре Empyrean с использованием программного обеспечения для обработки и поиска “HighScore”. Для идентификации фазового состава образца по средствам программы для обработки и поиска “HighScore” используется база данных [10]. Одна из полученных дифрактограмм представлена на рисунке 16.

По результатам первоначальных исследований можно сказать, что в образце литиевой КПС обнаружены следующие фазы: металлический литий, диоксид лития, ацетиленид лития двух разновидностей, гидроксид лития и карбонат лития. Надежно идентифицировать присутствие графита в фазовом составе не удалось. В связи с этим были проведены дополнительные рентгенофазовые исследования образцов литиевых КПС на основе углеродной ткани, армированной УНТ. В результате исследований было определено соотношение элементов в данном композитном материале которое составило: $\sim 60\%$ (Li), $\sim 29\%$ (C), $\sim 9,5\%$ (L_2C_2) и менее $1,5\%$ примесей (диоксид лития, гидроксид лития, гидрокарбонат лития, нитрид и нитрат лития, а так же остальные неметаллические примеси).

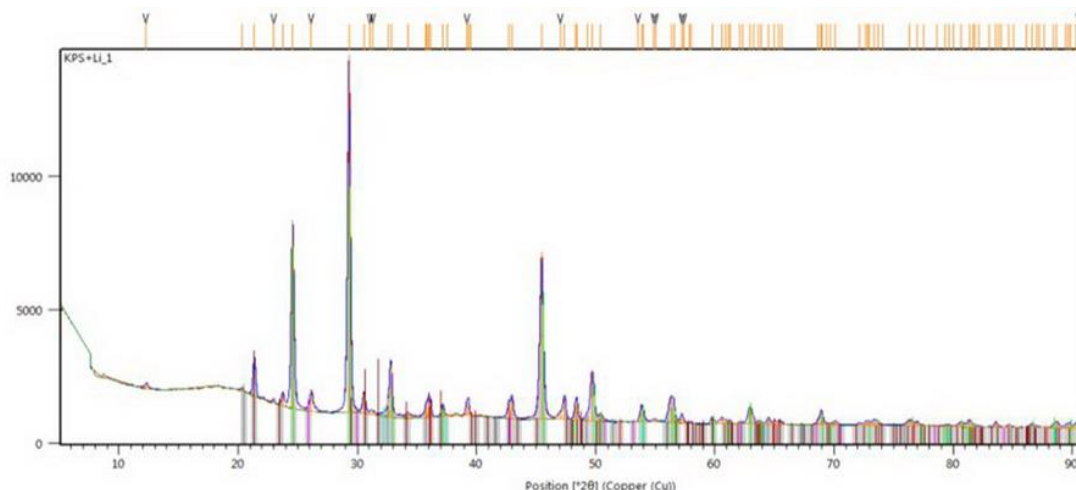


Рисунок 16. Общий вид полученной дифрактограммы

Свойства литиевой КПС, армированной УНТ

В дальнейшем на основании проведенного рентгенофазового анализа были определены основные свойства образца литиевой КПС, такие как плотность и коэффициент теплопроводности.

Очевидно, что в основном состав образцов литиевой КПС определяют объемные доли лития, ацетиленида лития и матрицы из углеродной ткани, армированной УНТ. Плотность литиевой КПС была рассчитана по следующей формуле:

$$\rho_{\text{cps}} = \sum_i \rho_i \frac{\omega_{v_i}}{100\%}, \quad (3)$$

где ρ_i – плотность элемента литиевой КПС, ω_{v_i} – объемная доля i -го элемента литиевой КПС, $i = 1, 2, 3$. Плотность литиевой КПС составила порядка $\sim 0,97 \text{ г/см}^3$.

Одним из важнейших свойств литиевой КПС, определяющим целесообразность ее использования в будущих ТЯР, является коэффициент теплопроводности. Следует отметить, что коэффициент теплопроводности КПС с литием $\lambda(T)$ был рассчитан при использовании двух расчетных моделей – модели параллельных слоев и модели последовательных слоев. В первом случае:

$$\lambda(T) = (1 - \varepsilon)\lambda_k(T) + \varepsilon\lambda_{\text{Li}}(T), \quad (4)$$

где ε – объемная пористость КПС; $\lambda_k(T)$ – коэффициент теплопроводности карбоновой ткани КПС; $\lambda_{\text{Li}}(T)$ – коэффициент теплопроводности лития.

Во втором случае:

$$\lambda(T) = \left((1 - \varepsilon) / \lambda_k(T) + \varepsilon / \lambda_{\text{Li}}(T) \right)^{-1}. \quad (5)$$

Также расчеты проводились для различных фазовых состояний лития, твердого и жидкого. В результате проведенных расчетов определены коэффициенты теплопроводности литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ: с литием в твердой фазе, при $455 \text{ К} - 42,6 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$; с литием в жид-

кой фазе, при $460 \text{ К} - 26,4 \text{ Вт/м} \cdot \text{К}$. Нужно отметить, что из-за высокого значения коэффициента теплопроводности лития, коэффициент теплопроводности литиевой КПС определяется, в основном, объемным содержанием лития в образце, и в этом случае значением коэффициента теплопроводности ацетиленида лития можно пренебречь.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненной работы был проведен литературный обзор, в ходе которого рассмотрены и проанализированы свойства литиевых КПС и принципы их работы, свойства углеродных нанотрубок и методы их синтеза, характер взаимодействия углеродных материалов с жидким литием при различных температурах.

По ранее разработанной технологии, на установке для синтеза УНТ, с использованием CDV-метода, было проведено армирование углеродными нанотрубками матрицы КПС из карбоновой ткани, после чего выполнена характеристика этой матрицы при помощи электронной микроскопии и рамановской спектроскопии. Разработано и создано заливное устройство для изготовления образцов литиевых КПС, разработана и опробована процедура заливки КПС жидким литием. Проведен эксперимент, в результате которого изготовлен опытный образец литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ. С целью характеристики опытного образца были проведены микроструктурные исследования и рентгенофазный анализ литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ, а также определены его плотность и теплопроводность.

Проведенные работы показали, что карбоновая ткань с поверхностью волокон, армированной УНТ, полностью смачивается жидким литием, а разработанная технология в полной мере подходит для изготовления образцов литиевой КПС. В дальнейшем, по разработанной технологии, будут изготавливаться исследовательские образцы литиевой КПС на основе карбоновой ткани, армированной УНТ, с целью

проведения испытаний данного композитного материала в условиях моделирующих режимы эксплуа-

тации установок управляемого термоядерного синтеза.

ЛИТЕРАТУРА

1. FTU results with a liquid lithium limiter. G. Mazzitelli, M.L. Apicella, D. Frigione, G. Maddaluno, M. Marinucci, C. Mazzotta, V. Pericoli Ridolfini, M. Romanelli, G. Szepesi, O. Tudisco Published 25 May 2011 • 2011 IAEA, Vienna Nuclear Fusion, Volume 51, Number 7.
2. NSTX plasma operation with a Liquid Lithium Divertor. H.W. Kugel, J.P. Allain, M.G. Bell, R.E. Bell, A. Diallo, R. Ellis, S.P. Gerhardt, B. Heim, M.A. Jaworski, R. Kaita, J. Kallman, S. Kaye, B.P. LeBlanc, R. Maingi, A. McLean, J. Menard, D. Mueller, R. Nygren, M. Ono, S.F. Paul, R. Raman, et al. Fusion Engineering and Design, Volume 87, Issue 10, October 2012, Pages 1724-1731.
3. Recent lithium experiments in tokamak T-11M. S.V. Mirnov, A.M. Belov, N.T. Djigailo, A.N. Kostina, V.B. Lazarev, I.E. Lyublinski, V.M. Nesterenko, A.V. Vertkov. Journal of Nuclear Materials, Volume 438, Supplement, July 2013, Pages S224-S228.
4. Protection of tokamak plasma facing components by a capillary porous system with lithium I. Lyublinski, A. Vertkov, S. Mirnov, V. Lazarev. Journal of Nuclear Materials, Volume 463, August 2015, Pages 1156-1159.
5. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor for KTM tokamak Igor E. Lyublinski, Alexey V. Vertkov, Mikhail Yu. Zharkov, Vladimir V. Semenov, Sergey V. Mirnov, Vladimir B. Lazarev, Irina L. Tazhibayeva, Gennadiy V. Shapovalov, Timur V. Kulsartov, Alexandr V. D'yachenko, Giuseppe Mazzitelli, Pietro Agostini Fusion Engineering and Design, Volume 88, Issues 9–10, October 2013, Pages 1862-1865.
6. Углеродные нанотрубки: виды и области применения [Электронный ресурс] / Электрон. дан. — М.: Информационно-аналитическое агентство Cleandex, 10.12.2007. — Режим доступа: <http://www.cleandex.ru/articles/2007/12/10/nanotubes-carbon,свободный>. — Углеродные нанотрубки: виды и области применения.
7. Диаграммы состояния двойных металлических систем. Том 1. Под ред. академика РАН Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996 – 728-729 с.
8. Гришин В.К., Глазунов М.Г., Аракелов А.Г. и др. Свойства лития. М.: Металлургиздат, 1963.
9. Шанк Ф.А. Структуры двойных сплавов. Пер. с англ. под ред. И.И. Новикова и И.Л. Рогельберга. М.: Металлургиздат, 1973.
10. Crystallography Open Database (далее – COD. Gražulis, S.; Chateigner, D.; Downs, R. T.; Yokochi, A. F. T.; Quirós, M.; Lutterotti, L.; Manakova, E.; Butkus, J.; Moeck, P. & Le Bail, A.; Crystallography Open Database - an open-access collection of crystal structures, J. Appl. Cryst., 2009, 42, 726-729).

ЛИТИЙЛІ ККЖ-ГЕ КОМІРТЕКТІ МАТЕРІАЛ НЕГІЗІНЕ КОМІРТЕКТІ НАНОТҮТІКШЕЛЕР КҮШЕЙТІЛІММЕН ТЕХНОЛОГІЯСЫН ӘЗІРЛЕУ

Е.Ю. Тулубаев, Ю.В. Понкратов, Ж.А. Заурбекова, Ю.Н. Гордиенко, Н.И. Барсуков

ҚР ҰЯО «Атом энергиясы институты», Курчатов, Қазақстан

Бұл жұмыс сипаттайды дайындау технологиясын литийлі, ККЖ негізінде карбон материал негізіне күшейтіліммен көміртегі нанотүтікшелер. жұмыста сипатталған барлық негізгі кезеңдерін дайындау литийлі ккж негізінде карбон мата арматураланған унт. келтірілген микроструктурные және рентгенофазные зерттеу дайындалған үлгідегі литийлі ККЖ негізінде карбон мата, арматураланған УНТ, сондай-ақ анықталған оның тығыздығы және жылу өткізгіштігі.

Жүргізілген жұмыстар көрсеткендей, карбон қышқылы материал негізіне бетіне талшықтар арматураланған, көміртекті нанотүтікшелер, толық жабылады сұйық литийлі. Әзірленген технология толық көлемде үшін қолайлы үлгілерді дайындау литийлі ККЖ үшін одан әрі зерттеу.

TECHNOLOGY OF DEVELOPMENT THE LITHIUM CPS ON THE BASED OF CARBOXYLIC FABRIC OF REINFORCED CNT

Ye.Yu. Tulubayev, Yu.V. Ponkratov, Zh.A. Zaurbekova, Yu.N. Gordienko, N.I. Barsukov

Branch “Institute of Atomic Energy” NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

This paper describes the technology of development lithium CPS based on carbon fiber reinforced carbon nanotubes. The paper describes all the main stages of development of lithium-based CPS based on the carbon fiber of a reinforced CNT. Microstructural and X-ray phase studies of the manufactured sample of lithium CPS based on carbon fiber reinforced with CNTs are also presented, and its density and thermal conductivity are determined.

The carried out work showed that the carboxylic fabric with the surface of fibers reinforced with CNTs is completely wetted with liquid lithium. The technology developed is fully suitable for the production of lithium CPS samples for further research.

УДК 004.056.53

ИНФОРМАЦИОННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ ИВГ.1М

Ермаков В.А., Серикбаев Б.С., Ильиных С.А., Коровиков А.Г.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В настоящее время растет количество и значение информационных систем (ИС) на предприятиях и, как следствие, должно расти доверие пользователей к их применению. Существует ряд технологий, которые помогают обеспечить безопасность использования ИС. Однако технология сама по себе не решает всех проблем, поэтому существует необходимость в четко определенных политиках безопасности информационных систем, чтобы обеспечить конфиденциальность, целостность, доступность, безотказность и достоверность информации. В данной статье ставится задача защиты информации в измерительной системе реакторной установки ИВГ.1М от несанкционированного доступа. На примере защиты информационной системы раскрывается комплексный подход к защите информации, показано совместное проведение организационных и технических мероприятий. В статье производится анализ информационной системы, ее классификация, определение требований к ее защищенности. На основании анализа определяются специализированные средства защиты, а также организационные мероприятия, применимые к системе. В заключении раскрываются результаты применения данного подхода к защите.

ВВЕДЕНИЕ

С 2010 года и по настоящее время в Институте атомной энергии (ИАЭ) проводятся работы по модернизации ИИС исследовательского реактора ИВГ.1М. На сегодняшний день проведен первый и второй этап модернизации. В опытную эксплуатацию введены: система автоматического управления (САУ), система управления и защиты (СУЗ) и система контрольно-измерительных приборов и автоматики (КИПиА) [1, 2]. В качестве технических средств используются современные программные и аппаратные средства промышленной автоматики на основе микропроцессорной техники зарубежных производителей. Все системы основаны на распределенной архитектуре с использованием передачи данных через локальные вычислительные сети. Разработанные программные средства позволяют вести сбор и регистрацию параметров реактора и его систем, отображение параметров в виде графиков, таблиц, мнемосхем и гистограмм.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ

Сегодня ИС играют ключевую роль в обеспечении эффективной работы на производстве. Повсеместное использование ИС для хранения, обработки и передачи информации делает актуальными проблемы их защиты. Например, каждый день появляются новые вирусы, несущие новые угрозы, такие как потеря или публичное распространение информации.

Под безопасностью понимается защищенность системы от случайного или преднамеренного вмешательства в нее, попыток несанкционированного получения информации, модификации или физического разрушения ее компонентов. Под угрозой безопасности понимаются возможные события или действия, которые могут привести к искажению, несанкционированному использованию или даже к разрушению информационных ресурсов, а также программных и аппаратных средств [3].

Комплекс исследовательских реакторов (КИР) «Байкал-1» является ядерно-опасным объектом в связи с основной деятельностью в области использования атомной энергии. Основой для возникновения угроз в отношении КИР «Байкал-1» является наличие ядерных материалов и источников ионизирующего излучения, что, безусловно, связано с возрастающим интересом к ним со стороны террористических группировок и радикально настроенных экстремистов. ИИС ИВГ.1М является уязвимой в этом плане системой, основные процессы которой заключаются в сборе, регистрации и отображении параметров исследовательского реактора. Последствия угроз информационной безопасности (ИБ) в отношении ИИС могут привести к фальсификации данных, потере зарегистрированной информации и в конечном итоге, экономическим потерям от срыва контрактов и научных программ.

АНАЛИЗ ИНФОРМАЦИОННОЙ СИСТЕМЫ

При проведении комплекса мероприятий по защите информации от несанкционированного доступа для информационной системы сначала необходимо привести аналитическое обследование, а затем реализовать для информации соответствующие требования.

Рассмотрим ИИС реакторной установки ИВГ.1М. Определим исходные данные для данной ИИС, а затем сформулируем и реализуем требования к ее защищенности.

Исходные данные к системе:

- обрабатывает информацию ограниченного пользования;
- обеспечивает многопользовательский режим работы;
- разграничивает права пользователей;
- обеспечивает коллективный режим обработки данных.



Рисунок. Средства обеспечения ИБ

На основе исходных данных должны выполняться следующие требования к ИИС:

- идентификация, проверка подлинности и контроль доступа субъектов к системе, программам, зарегистрированным данным;
- регистрация и учет входа пользователей в систему, запуска программ, изменений полномочий субъектов;
- учет носителей информации;
- регистрация попыток нарушения защиты;
- физическая защита средств вычислительной техники и носителей информации;
- наличие администратора системы;
- наличие средств восстановления программного обеспечения;
- использование сертифицированных средств защиты.

СРЕДСТВА ОБЕСПЕЧЕНИЯ ИБ

В результате проведения анализа ИБ ИИС ИВГ.1М была определена степень защиты данной информационной системы. На рисунке приведена классификация программно-аппаратных средств ИБ, используемых в ИИС ИВГ.1М.

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА ЗАЩИТЫ

Для защиты информационной системы используются специализированные программные средства защиты, позволяющие защитить рабочие станции, контроллеры и систему в целом для:

- идентификации пользователей;
- контроля доступа;
- шифрования информации;
- удаления остаточной (рабочей) информации типа временных файлов;
- тестового контроля системы защиты и др.

Преимущества программных средств: универсальность, гибкость, надежность, простота установки, способность к модификации и развитию.

Разработанное прикладное программное обеспечение (SCADA система – RSView) предусматривает авторизацию пользователей с помощью логина и пароля. Авторизация пользователя осуществляется при запуске системы. Все действия операторов после запуска программного обеспечения записываются в журнал активности.

Для защиты рабочих мест операторов от установки вредоносных программ и несанкционированного скачивания данных отключена возможность использования внешних носителей информации (USB - накопителей).

Дополнительным методом защиты информации является применение резервного копирования важной информации (конфигурации операционной системы и SCADA-системы автоматизированных рабочих мест операторов, копии конфигурации ПО контроллеров и т.д.).

ПРОВЕДЕННЫЕ РАБОТЫ ПО ЗАЩИТЕ ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМЫ

Техническим средствам защиты информации нужна непрерывная организационная поддержка, которая заключается в смене паролей, определении ролей, полномочий, разграничении доступа и т.п. Защита информации – это не разовое мероприятие, это постоянный процесс. Для обеспечения непрерывности работы средств защиты и пресечения несанкционированного доступа к системе безопасности применены следующие меры:

- определен порядок установления уровня доступа пользователей и правила разграничения доступа;
- пользователи ознакомлены с уровнем их полномочий, а также с организационно-распорядительной и рабочей документацией;
- обеспечена охрана объекта, на котором расположена защищаемая система (территория, здание, помещения, оборудование);

– организованы процедуры информационной безопасности: определены ответственные лица и администратор, осуществляющие учет, хранение и выдачу информационных носителей, паролей, ключей, приемку включаемых в ИИС новых программных средств, а также контроль за ходом технологического процесса обработки информации.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Путем проведения организационных и технических мероприятий была достигнута цель в решении задачи информационной безопасности ИИС реакторной установки. Совокупность организационных методов и специализированных средств защиты позволяет оперативно реагировать на угрозы в процессе

хранения, обработки, передачи информации, а также обеспечивать ее доступность и целостность.

Достигнута высокая степень защищенности, соответствующая требованиям стандартов безопасности МАГАТЭ.

Для решения проблемы информационной безопасности необходимо постоянное усовершенствование законодательных, организационных и программно-технических мер. Пренебрежение хотя бы одним из аспектов этой проблемы может привести к утрате или утечке информации, стоимость и роль которой в жизни современного общества приобретает все более важное значение.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коровиков А.Г., Ольховик Д.А., Первый этап модернизации информационно-измерительной системы исследовательского реактора ИВГ.1М. – Вестник НЯЦ РК, 2014 г., вып. 4, с. 5-12.
2. Коровиков А.Г., Ермаков В.А., Серикбаев Б.С., Второй этап модернизации информационно-измерительной системы исследовательского реактора ИВГ.1М. – Вестник НЯЦ РК, 2016 г., вып. 3, с. 140-146.
3. Акимжанов С.А., Коровиков А.Г., Методы повышения информационной безопасности в филиале «ИАЭ» РГП НЯЦ РК. – Вестник НЯЦ РК, 2017 г., вып. 1, с. 138-142.
4. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Instrumentation and Control Systems and Software Important to Safety for Research Reactors, IAEA Safety Standards Series No. SSG-37, IAEA, Vienna (2015).

ИВГ.1М АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ЖҮЙЕСІНІҢ АҚПАРАТТЫҚ ҚАУІПСІЗДІГІ

В.А. Ермаков, Б.С. Серикбаев, С.А. Ильиных, А.Г. Коровиков

ҚР ҰАО «Атом энергиясы институты», Курчатов, Қазақстан

Қазіргі уақытта кәсіпорындарда ақпараттық жүйелердің (АЖ) саны және мағынасы жетіліп келеді және нәтижесі ретінде, тұтынушылардың оларды қолдануға сенімділігі де өсуі тиіс. АЖ пайдалану қауіпсіздігін қамтамасыз етуге көмектесетін бірқатар технологиялар бар. Бірақ, технология өздігінен барлық мәселелерді шешпейді, сондықтан, ақпараттың құпиялылығын, тұтастығын, қолжетімділігін, мүлтіксіздігін және анықтылығын қамтамасыз ету үшін ақпараттық жүйелер қауіпсіздігінің нақты белгіленген саясаттардың қажеттілігі болуда. Осы мақалада рұқсат етілмеген қол жеткізуден ИВГ.1М реакторлық қондырғының өлшеу жүйесінде ақпаратты қорғау міндеті қойылады. Ақпараттық жүйені қорғау үлгісінде ақпаратты қорғаудың кешендік тәсілдемесін ашады, ұйымдастырушылық және техникалық іс-шаралардың бірлесіп жүргізілуі көрсетілді. Мақалада ақпараттық жүйені талдау, оның жіктелуі, оның қорғалуына талаптарды белгілеу жүргізіледі. Талдау негізінде арнайы қорғау құралдары, және де жүйеде қолданылатын ұйымдастырушылық іс-шаралар анықталады. Қорытындысында осы тәсілдемені қорғауға қолдану нәтижелері ашылады.

INFORMATION SECURITY OF INFORMATION AND MEASURING SYSTEM OF THE IVG.1M REACTOR

V.A. Yermakov, B.S. Serikbayev, S.A. Ilinykh, A.G. Korovikov

Branch “Institute of Atomic Energy” NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

Currently, the quantity and importance of information systems (IS) at the enterprises is increasing and user's confidence for their application has to increase as a consequence.

However, technology does not solve all the problems itself, therefore there is a need for well-defined security strategy of IS to ensure privacy, integrity, availability, reliability and adequacy of information. This paper set the task to secure information in measuring system of IVG.1M reactor facility from unauthorized access. Example of information system security opens a complex approach to information security and presents joint organizational and engineering measures. The article performs analysis and classification of information system, determines the requirements for its security. Based on analysis, special means of protection as well as organizational measures applicable for the system are defined. Conclusion reflects results of such approach application for the security.

УДК:618.19.1-616.65.2:615.849.2

НЕКОТОРЫЕ ПЕРСПЕКТИВНЫЕ РАДИОНУКЛИДЫ
В ЯДЕРНОЙ МЕДИЦИНЕ КАЗАХСТАНА¹⁾ Тажединов И., ¹⁾ Аманкулов Ж.М., ²⁾ Жалмукаш У.К., ³⁾ Хусайн Ш.К., ¹⁾ Хан О.Г.¹⁾ Казахский научно-исследовательский институт онкологии и радиологии, Алматы, Казахстан²⁾ Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан³⁾ Медицинский университет Астана, Астана, Казахстан

Необходимо пополнить комплектацию отечественного генератора ^{99m}Tc недостающими реагентами собственного производства, расширяющими методы радионуклидных исследований органов и систем. Необходимо предусмотреть возможность выпуска идеальной диагностической пары для терапевтических РФП, например для ^{131}I , более доступный ^{123}I . Наладить производство кардиомиотропного и тропного к паращитовидным железам (ПЩЖ) радионуклида ^{201}Tl . Из всех методов визуализации сцинтиграфия ПЩЖ является наиболее информативным. Выпуск генератора $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$, в соответствии со сроком эксплуатации, в течение двух лет, обеспечит онкологические клиники опухолетропным РФП, альтернативным дорогостоящим циклотронным радионуклидам.

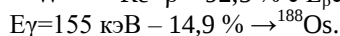
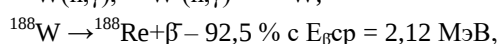
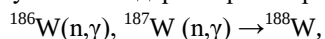
Благодаря производству отечественных радиофармацевтических препаратов (РФП) Институтом ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан (ИЯФ МЭ РК), Ядерная медицина (ЯМ) в Казахстане возрождается. На базе института с 2002 года функционировал стационарный экстракционный генератор ^{99m}Tc , который обеспечивал ^{99m}Tc -пертехнетатом лаборатории радионуклидной диагностики г. Алматы. С 2010 года освоена технология выпуска переносного гель-генератора ^{99m}Tc , благодаря которому функционируют в настоящее время все лаборатории городов Астана, Алматы и Семей. Появилась возможность открытия лаборатории радионуклидной диагностики и в других городах Республики. Благодаря разным реагентам-соединениям, тропным к различным органам и системам, более 70 % радионуклидных исследований выполняются на радиофармпрепаратах, получаемых на основе генератора ^{99m}Tc . В настоящее время препараты для исследования почек с коммерческими названиями «ДТПА- ^{99m}Tc , раствор для инъекций» и «Натрий о-йодгиппурат ^{131}I , раствор для инъекций» с 2008 года прошли все этапы испытания в Казахском НИИ онкологии и радиологии (КазНИИОиР). Остеотропный препарат «МДФ- ^{99m}Tc , раствор для инъекций» и гепатотропный «Фитат- ^{99m}Tc , раствор для инъекций» с 2013 года успешно прошли экспериментальные и клинические испытания. Все эти реагенты в 2018 году пройдут процедуры регистрации.

Пока отечественному генератору ^{99m}Tc необходимые реагенты поставяет фирма «ДИАМЕД» (Россия) с разрешения на разовый ввоз Министерства здравоохранения Республики Казахстан. Из группы самых востребованных, кроме выше указанных трех реагентов, к генератору еще необходимо разработать для перфузионной сцинтиграфии миокарда ^{99m}Tc -метоксиизобутилизонитрил (^{99m}Tc -МИБИ) или ^{99m}Tc -метайодбензилгуанидин (^{99m}Tc -МИБГ), головного мозга – ^{99m}Tc -этиленцистеиндемер (^{99m}Tc -ЭЦД)

или ^{99m}Tc -гексаметилпропиленаминоксим (^{99m}Tc -ГМПАО), легких – ^{99m}Tc -макроагрегаты альбумина человеческой сыворотки крови (^{99m}Tc -МАС) или ^{99m}Tc -микроферы человеческого альбумина (^{99m}Tc -МСА). ^{99m}Tc -МИБИ еще является опухолетропным РФП, а также избирательно накапливаясь, позволяет визуализировать паращитовидную железу (ПЩЖ).

Из-за отсутствия в Республике службы Радионуклидной терапии (РНТ), только единичные пациенты получают эти услуги за рубежом в виде медицинского туризма. В РНТ для лечения метастазов в костях наиболее широко применяется ^{153}Sm -этилендиаминтетраметил фосфонат (^{153}Sm -EDTMP), зрелых форм рака щитовидной железы и тиротоксикоза – ^{131}I [1–5]. В КазНИИОиР экспериментально испытаны и ожидается финансирование клинических испытаний « ^{153}Sm -ЭДТМФ, раствор для терапии» и «Натрия йодид ^{131}I , раствор для терапии», производства ИЯФ МЭ РК. Зарегистрирован в Республике ^{223}Ra , производства Норвегии, под коммерческим названием Ксофиги, посреднической поставкой фирмы Байер (Германия), который применяется для РНТ метастазов в костях кастрат-резистентного рака предстательной железы [6]. Специальная канализация с отстойником для жидких радиоактивных отходов (ЖРО) в основном предназначена для РНТ с β -излучающим ^{131}I , за его богатый спектр γ -излучения, в том числе с относительно высокими (жесткими) $E_{\gamma} \approx 300\text{--}700$ кэВ энергиями.

В РНТ метастазов в костях находит применение фосфатный комплекс генераторного радионуклида ^{188}Re , β -излучатель, его материнский радионуклид получается в ядерном реакторе

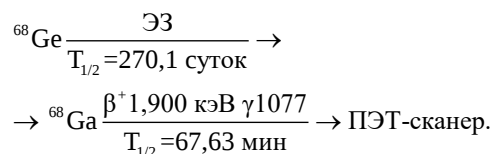
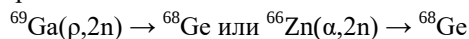


Если сравнить с другим более широко применяемым радионуклидом $^{153}\text{Sm} + \beta - 100 \% \text{ с } E_{\beta\text{cp}} = 0,809$

МэВ у ^{188}Re энергия β -излучения, т. е. его повреждающий эффект, в 2,5 раза мощнее. Период полураспада материнского радионуклида ^{188}W , равный 69,4 суткам, позволяет использовать один генератор ^{188}Re в течение 6–8 месяцев. Его получение из генератора и приготовление РФП по мере надобности производится непосредственно в подразделении ЯМ, лаборатории радионуклидной диагностики или отделения радионуклидной терапии. На основе ^{188}Re можно создать ^{188}Re –золедронат и ОЭДФ – ОксиЭтилиденДиФосфонат для лечения больных с метастазами в кости. А также возможно создание целой группы РФП для внутритканевой, внутрисуставной, системной терапии, как для нужд онкологии, так и ревматологии и даже кардиологии.

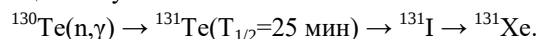
В действующих Санитарных правилах Республики, утвержденных приказом №261 от 27 марта 2015 г., рекомендованных МАГАТЭ, для выпуска вне объекта ЯМ пациентов с введенной в организм радиоактивностью с мощностью дозы гамма-излучения на расстоянии 1 м от пациента составляет не более 20 мкЗв/ч. для ^{131}I , 100 мкЗв/ч. – для ^{153}Sm [7]. Эти показатели позволяют провести радиойодоблацию (РЙА) и РНТ метастазов в костях в амбулаторных условиях. В настоящее время в России в общей сложности имеются 99 активных коек. В нашей Республике, с согласия разрешительных органов, можно начать радиойодоблацию РЙА с радиоактивностью до 185 МБк (50 мКи) и РНТ метастазов рака в кости с $^{153}\text{Sm-EDTMP}$ и ^{223}Ra .

В ЯМ циклотронные позитрон-излучающие радионуклиды все больше укрепляют позиции и несмотря на высокую себестоимость расширяют круг применения в клинической практике. В этом плане перспективным остается генератор $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ [8]. Мишенью обычно служат стабильные изотопы элементов галлия ^{69}Ga или цинка ^{66}Zn . В циклотроне мишени бомбардируются протоном и нейтроном в соотношении 1:2. При этом энергия протона для бомбардировки ^{69}Ga составляет 19 МэВ, для ^{66}Zn – 11 МэВ. В обеих атомных реакциях полученный материнский радионуклид для генератора ^{68}Ge из мишени выделяется благодаря разности химических свойств в первой реакции между ^{69}Ga и ^{68}Ge , во второй – между ^{66}Zn и ^{68}Ge . Полученный материнский радионуклид ^{68}Ge сажают (адсорбируют) в сорбент. Сорбент с ^{68}Ge заправляют в колонку генератора. С момента образования ^{68}Ge идет его распад по типу электронного захвата с $T_{1/2}=271$ суток, превращаясь в ^{68}Ga . Радиофармацевтический препарат представляет собой ДОТА-(Тирозин3) Октреотид (DOTATATE), меченый позитрон-излучающим радионуклидом галлий-68. Применение генераторного ^{68}Ge должно быть намного проще и дешевле, чем циклотронного ^{18}F .



При соблюдении технологии, материнский радионуклид получается с очень высокой, «четыре девятки» – 99,99 % радиоактивной чистотой ^{68}Ge с высоким 97 % выходом дочерного ^{68}Ga . При распаде ^{68}Ga превращается в стабильный ^{68}Zn . Длительный, более 9 месяцев, период полураспада материнского радионуклида позволяет эксплуатировать один генератор в течение двух лет, что экономически выгодно для медицинских учреждений. Опухолетропность элемента Ga известна с работ 1970-х годов по ^{67}Ga [9], который в отношении радионуклидной диагностики некоторых видов опухолей более эффективен, чем ^{18}FDG . У позитрон-излучающего ^{68}Ga с более жесткой энергией $E_{\gamma}=511$ кэВ, почти в пять раз больше выход γ -излучения, чем ^{67}Ga с $E_{\gamma}=93$ кэВ (40 %). К тому же, более эффективные принципы регистрации позитронных эмиссионных камер должны повысить чувствительность радионуклидной диагностики опухолей с ^{68}Ga , чем обычная планарная сцинтиграфия с ^{67}Ga .

В процессе радиойодтерапии (РЙТ) и РНД, а также при оценке эффективности лечения в основном применяется один и тот же радионуклид йода ^{131}I . Реакция получения ^{131}I :



При этом ^{131}I получается в виде водного 0,9 % физиологического раствора Na^{131}I . Радиоактивный ^{131}I в процессе распада превращается в стабильный нуклид ^{131}Xe инертного газа Ксенона, который ни в какие химические связи не вступает и во флаконе или шприце может находиться в растворенном виде. При соприкосновении раствора с воздухом улетучивается. При распаде введенного в организм пациента ^{131}I образовавшийся ^{131}Xe , из тканей диффундирует в венозную кровь и выводится с выдыхаемым воздухом, а какая та часть может выводиться через почки с мочой.

Для диагностики распространенности рака щитовидной железы используется диагностическая радиоактивность ^{131}I , которая накапливаясь в патологических очагах, вызывает эффект «оглушения», развивая резистентность опухоли на введенную лечебную радиоактивность ^{131}I . При длительности периода полураспада $T_{1/2}=8,06$ суток ^{131}I между диагностической и терапевтической процедурами, чтобы переждать период временной резистентности, рекомендуется соблюдать интервал не менее трех суток. Чем короче период полураспада радионуклида диагностического применения, тем короче будет срок интервала. При этом пара радионуклидов считается идеальной, если они одного элемента или одно и то же соединение, меченые радионуклидами разных

элементов. Пара считается идеальной, если диагностический препарат полностью повторяет фармакокинетику терапевтического. Это позволяет, по результатам диагностического исследования, в планировании более точно рассчитать радиоактивность в патологическом очаге и создать математическую модель РНТ [10–14]. Имеются циклотронные радионуклиды йода, γ -излучающие с удобной для гаммакамер энергией $E\gamma=0,159$ (84 %) ^{123}I ($T_{1/2}=13,27$ ч), позитронизлучающие ^{120}I ($T_{1/2}=4,18$ ч) и ^{124}I ($T_{1/2}=1,35$ ч) – для ПЭТ-сканеров [8]. Все эти радионуклиды йода при распаде, не изменяя атомный вес (изобары), превращаются в стабильные нуклиды теллура Te . В экономически развитых странах, обладающих высокими ядерными технологиями, в ЯМ находит применение ^{123}I . Имеются несколько способов получения ^{123}I :

- 1) $^{124}\text{Xe}(\rho, 2n) \rightarrow ^{123}\text{Cs} \rightarrow ^{123}\text{Xe}(\text{ЭЗ}, \beta^+, T_{1/2}=2,1 \text{ ч}) \rightarrow ^{123}\text{I}$,
- 2) $^{127}\text{I}(\rho, 5n) \rightarrow ^{123}\text{Xe}(\text{ЭЗ}, T_{1/2}=2,1 \text{ ч}) \rightarrow ^{123}\text{I}$,
- 3) $^{127}\text{I}(\rho, 5n) \rightarrow ^{123}\text{Xe}(\text{ЭЗ}, \beta^+, T_{1/2}=2,1 \text{ ч}) \rightarrow ^{123}\text{I}$,
- 4) $^{127}\text{I}(\rho, 3n) \rightarrow ^{125}\text{Xe}(\text{ЭЗ}, \beta^+, T_{1/2}=16 \text{ ч}) \rightarrow ^{123}\text{I}$,
- 5) $^{123}\text{Te}(\rho, n) \rightarrow ^{123}\text{I}$.

$^{123}\text{I}(\text{ЭЗ}, E\gamma=159 \text{ кэВ}-84 \text{ \%}) \rightarrow ^{123}\text{Te}$

Из всех реакций наиболее широко применяется технология с ^{123}Te мишенью.

Короткоживущие позитронизлучающие радионуклиды ^{120}I и ^{124}I получают следующим образом:

- $$^{120}\text{Te}(\rho, n) \rightarrow ^{120}\text{I}(\beta^+, \text{ЭЗ}, T_{1/2}=4,18 \text{ ч}) \rightarrow ^{120}\text{Te};$$
- $$^{124}\text{Te}(\rho, n) \rightarrow ^{124}\text{I}(\beta^+, \text{ЭЗ}, T_{1/2}=1,35 \text{ ч}) \rightarrow ^{124}\text{Te}.$$

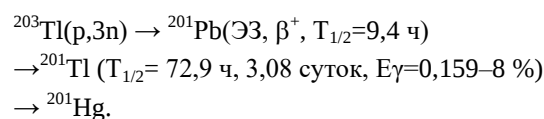
В радиойодтерапии для планирования дозы ^{131}I применяется его диагностическая доза, что на некоторое время вызывает резистентность опухолевых клеток к терапии. Во избежание этого рекомендуется между процедурами выдерживать паузу на 3 суток или же для диагностики использовать короткоживущий радионуклид йода. В ядерной медицине для радионуклидной терапии необходим РФП диагностического назначения, который бы повторял механизм включения терапевтического. Кроме единственного стабильного нуклида ^{127}I , остальные 29 нуклида радиоактивные. Для создания ^{131}I «идеальной пары» могут служить все три радионуклида йода – ^{123}I , ^{120}I и ^{124}I . Широко применяемый в радионуклидном исследовании щитовидной железы $^{99\text{m}}\text{Tc}$ не может служить «идеальной парой», так как он повторяет только неорганическую фазу тиреоидного обмена. Преимущества того или иного радионуклида йода оцениваются ядерно-физическими характеристиками, доступностью технологии, экономической выгодностью и диагностической эффективностью.

В ИЯФ Казахстана конверсия Ядерной технологии уверенно идет в сторону развития народного хозяйства. На наш взгляд в ЯМ интеллектуальный потенциал и технические возможности флагмана ядерной технологии в Республике используются не в полной мере. В свое время, в разработке проекта Цент-

ра Ядерной медицины при ИЯФ участвовали и сотрудники КазНИИОиР. В результате межведомственной переделки из его медицинской части не был построен ни один объект. Население г. Алматы растет и территория расширяется, превращаясь в мегаполис. От дорожных заторов не спасают развязки и объездные дороги. Например, для доставки генератора в КазНИИОиР, который находится в центре города, требуется от 1,5 до 3 часов, это время его самой высокой радиоактивности. При доставке по этой дороге широко применяемый позитрон-излучающий радионуклид ^{18}F с $T_{1/2}=1,83$ ч теряет больше половины дорогостоящего готового $^{18}\text{F-FDG}$.

Расширяющие диагностические применения ПЭТ технологии с использованием очень короткоживущих радионуклидов ^{11}C , ^{13}N и ^{15}O , с $T_{1/2}$ в минутах, ПЭТ-сканеры должны находиться непосредственно вблизи циклотрона. Для эффективного использования нового циклотрона «СЫКЛОН» ИЯФ на 30 МэВ диагностические подразделения ЯМ должны находиться вблизи ИЯФ, а, возможно, и в отделении радионуклидной терапии, т. е. полнокровном Центре ядерной медицины (ЦЯМ). В восточной части города Алматы, растущего вдоль гор, можно обеспечить перевозки с минимальной потерей $^{18}\text{F-FDG}$ от ИЯФ по восточной объездной дороге и по проспекту аль-Фараби. Можно развернуть некоторые объекты ЯМ в областном и городском онкологических диспансерах, которые находятся в этом направлении. Такие возможности имеет Институт педиатрии и детской хирургии, где можно было бы обеспечить услугами ЯМ детский контингент населения города и Республики. В западной части города на базе 1-ой и 7-ой городских больниц необходимы диагностические подразделения ЯМ с расположением циклотрона в одной из них. Такие принципы планировки объектов ЯМ особенно необходимо соблюдать в будущем в городах-миллионниках Астана, Шымкент и Актобе, а также промышленном городе Караганды с его городами-спутниками.

Широко применяемый в перфузионной сцинтиграфии миокарда кардиомиотропный радионуклид ^{201}Tl получается на циклотроне по следующей схеме:



В этой цепочке ядерной реакции промежуточный радионуклид ^{201}Pb , который учитывается в радиоактивную чистоту его дочернего ^{201}Tl . Гамма-излучающий радионуклид ^{201}Tl с $T_{1/2}= 72,9$ ч (3,08 суток) и $E\gamma=0,159$ (8 %) широко применяется в ядерной кардиологии наравне с $^{99\text{m}}\text{Tc-МИБИ}$ [14, 15]. В отличие от последнего, готовый препарат ^{201}Tl можно доставлять в другие города Республики и использовать в любое время суток, например, в экстренных случаях. Кроме того, ^{201}Tl имеет свойство включаться и

визуализировать паращитовидную железу (ПЩЖ) в отдельности или двухизотопным методом, вместе с ^{99m}Tc -пертехнетатом. Из всех методов визуализации ПЩЖ наиболее информативным является скintiграфия [16, 17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Успехи развития Ядерной физики обогащают ЯМ новыми технологиями и методами получения радиоактивных нуклидов, на основе которых создаются новые РФП диагностического и терапевтического назначения. Конверсия ядерной технологии в ЯМ продолжается и количество переходит в качество. В 70-х годах прошлого века впервые из учреждения Ядерной физики полученный радионуклид от генератора короткоживущего изотопа перешел в клиническую медицину. К концу прошлого столетия появились ядерные установки – медицинские циклотроны, которые еще больше упрочили позицию ядерной технологии в медицине. В некоторых развитых странах имеются Медицинские реакторы. Первые генераторы короткоживущих радионуклидов в Казахстане появились в начале 1972 года в КазНИИОиР, первый ПЭТ/КТ с циклотроном – в Республиканском диагностическом центре в г. Астане. В процессе развития ЯМ появляются новые, все более короткоживущие и специфичные РФП, получаемые сложной дорогостоящей технологией, которые по мере совершенствования и распространения становятся доступнее в клинической практике. Эти закономерности должны сохраняться в ЯМ Казахстана. Монополизированные методы диагностики и лечения в престижных клиниках не могут повысить показатели медицинской службы. Развитие ЯМ находится в стадии, позволяющей выбрать самые эффективные методы и размещать экономически выгодно с учетом территории, населения и заболеваемости в Республике. За счет такого экономного подхода можно расширять доступность процедур ЯМ широкому кругу населения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Крылов В.В., Дроздовский Б.Я., Цыб А.Ф. Радионуклидная терапия в паллиативном лечении больных метастазами в кости (обзор литературы) Ж. Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2006, Т. 51, №3, С. 48-54.
2. Цыб А.Ф., Дроздовский Б.Я., Крылов В.В., Кодина Г.Е. Паллиативная терапия оксабиформом ^{153}Sm при метастатических поражениях костей. Ж. Мед. радиол. и радиац. безопасность, 2002, Т. 47, №4, С. 37-42.
3. Markus L., Ralph F., Markus D., Christoph R. Thyroid Hormone Withdrawal in Patients with Differentiated Thyroid Carcinoma: A One Hundred Thirty- Patients Pilot Survey on Consequences of Hypothyroidism and a Pharmacoeconomic Comparison to Recombinant Thyrotropin Administration. THYROID. 2005, V. 15, №10, P. 1147-1155.
4. Furio P., Martin S., Clive H., Gertrud G.B., Ohad C. et al. Post-surgical use of radioiodine (^{131}I) in patients With papillary and follicular thyroid cancer and the issue of remnant ablation: a consensus report. European Journal of Endocrinology. 2005, 153, P. 651-659.
5. Румянцев П.О., Ильин А.А., Румянцева У.В., Саенко В.А. Рак щитовидной железы. //Современные подходы к диагностике и лечению. Москва. Издательская группа «ГЭОТАР-Медиа». 2009, С. 298-316.
6. Neal D. Dhore. Применение радия-223 дихлорида при метастатическом кастрационно-резистентном раке предстательной железы: точка зрения уролога. Перевод на русском языке. UROLOGY. 85 (4), 2015, P. 717-728.
7. Гигиенические нормативы «Санитарно-эпидемиологические требования к обеспечению радиационной безопасности» утвержденный приказом Министерства национальной экономики Республики Казахстан от 27 февраля 2015 года №155. Приложение 5. С.15.

Важным вопросом является перевозка РФП по территории Республики авиа- и железнодорожным транспортом. Для снижения потерь до минимально неизбежных, предназначенные для сохранения жизни людей РФП должны котируются грузом перво-степенной важности [18]. ЯМ является особым методом, требующим слаженной и согласованной работы, начиная от производства, перевозки и кончая введением РФП пациенту. При нарушении работы одного из них растет стоимость РФП, от чего страдают особенно нуждающиеся в услугах ЯМ пациенты.

На начальном этапе развития ЯМ необходимо продолжать тенденцию применения очень короткоживущих радионуклидов в Республике, планировать эффективное расположение ее объектов для экономного использования РФП и в полной мере охватить пациентов с показаниями в услугах ЯМ. За счет экономии средств, снизив себестоимость услуг, можно конкурировать на рынке медицинского туризма.

Выводы

1. Пополнить комплектацию отечественного генератора ^{99m}Tc новыми реагентами собственного производства, расширяющие метод РНД органов и систем.
2. В связи с предстоящим внедрением РНТ в Республике необходимо предусмотреть возможность выпуска идеальной диагностической пары для терапевтических РФП, например, для ^{131}I – более доступный ^{123}I .
3. Наладить производство кардиомиотропного радионуклида ^{201}Tl , обладающего тропностью к ПЩЖ. Важно учесть, что из всех методов визуализации ПЩЖ наиболее информативным является скintiграфия.
4. Необходимо предусмотреть возможность выпуска генератора $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$, со сроком эксплуатации два года, обеспечивающего на этот период опухоле-тропным РФП, который является альтернативным дорогостоящим циклотронным радионуклидам.

8. Богородская М.А., Кодина Г.Е. //Химическая технология радиофармацевтических препаратов. М.: 2010, 461с.
9. Габуния Р.И. Применение цитрата ^{67}Ga в клинической онкологии. Ж. Мед. радиол., 1980, Т. 25, №1, С. 6-10.
10. Наркевич Б.Я., Костылев В.А. Радионуклидная терапия и ее физико-математическое обеспечение. Ж. Мед. физика, 2004, №2 (22), С. 64-71.
11. Наркевич Б.Я., Костылев В.А., Глухов С. Б., Мапука Д.Г., Левчук А.В. Медико-физические основы радионуклидной терапии. Учебное пособие. Москва, 2006, 60 с.
12. Клепов А.Н., Кураченко Ю.А., Левченко В.А., Матусевич Е.С. Применение методов математического моделирования в ядерной медицине. Обнинск, 2006, 202 с.
13. Липанова Н.Н., Клепов А.Н., Наркевич Б.Я. Дозиметрическое планирование и дозовый контроль в радиойодотерапии рака щитовидной железы. //Мед.радиол и радиац. безопасность. 2012, Т.57, №3, С. 53-65.
14. Лишманов Ю.Б., Чернов В.И. 2.4.1. Методы перфузионной сцинтиграфии сердца. Национальное руководство по радионуклидной диагностике. Под редакцией Ю.Б. Лишманова, В.И. Чернова. Томск: STT. 2010, Т. 2, С. 12-46.
15. Лишманов Ю.Б., Чернов В.И. Сцинтиграфия миокарда в ядерной кардиологии. Издательство Томского университета. Томск. 1997, 273 с.
16. Ефимов И.Ю. 2.9.2. Радионуклидная диагностика паращитовидной железы. Национальное руководство по радионуклидной диагностике. Под редакцией Ю.Б. Лишманова, В.И. Чернова. Томск: STT. 2010, Т. 2, С. 282-286.
17. Parathyroid Scintigraphy. A Technologist's Guide. European Association of Nuclear Medicine. Sponsored Bristol-Myers Squibb Medical Imaging. Innovators at Heart. Austria, Venn, 2005, 43 p.
18. Фрейман Э.С., Шупановский В.Д., Калашин В.М. Основы безопасности перевозки радиоактивных веществ. Москва. Энергоатомиздат. 1986, 176 с.

ҚАЗАҚСТАН ЯДРОЛЫҚ МЕДИЦИНАСЫНДА ПЕРСПЕКТИВАЛЫ РАДИОНУКЛИДТЕР

¹⁾ И. Тәжединов, ¹⁾ Ж.М. Аманқұлов, ²⁾ Ұ.Қ. Жалмұқаш, ³⁾ Ш.К. Хусайн, ¹⁾ О.Г. Хан

¹⁾ *Қазақ онкология және радиология ҒЗИ, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан*

³⁾ *Астана медицина университеті, Астана, Қазақстан*

Отандық $^{99\text{m}}\text{Tc}$ -генераторды жабдықтауды түрлі ағзалар мен жүйелерді радионуклидтік диагностикалық зерттеуге арналған өзіміз өндіретін жаңа реагенттермен толықтыру қажет. Терапияға арналған радионуклидтерге қонымды диагностикалық жұп, мысалы ^{131}I -ге сәйкес келетін ^{123}I -ті, өндіру мүмкіндігі бар. Кардиомиотропты және екінші тропты қасиеті бар ^{201}Tl радионуклидін өндіру технологиясын жолға қойып, қалқанша маңы безін көруге болатын ең сенімді тәсіл сцинтиграфияны меңгеру маңызды. Қымбат циклотрондық радионуклидтерге альтернативті, әр $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ генераторы онкологиялық клиникада қатерлі ісікке тропты ^{68}Ga -мен ПЭТ/КТ-сканерлеуді екі жыл қамтамасыз етеді.

SOME PERSPECTIVE RADIONUCLIDES IN THE NUCLEAR MEDICINE OF KAZAKHSTAN

¹⁾ I. Tazhedinov, ¹⁾ Zh. Amankulov, ²⁾ U.K. Zhalmukash, ³⁾ Sh.K. Hussain, ¹⁾ O.G. Han

¹⁾ *Kazakh Institute of Oncology and Radiology, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan*

³⁾ *Astana Medical University, Astana, Kazakhstan*

It is necessary to replenish the kit of the domestic generator $^{99\text{m}}\text{Tc}$ with new reagents, which expand the possibilities of radionuclide examination of organs and systems. It should be possible to release an ideal diagnostic pair for therapeutic radiopharmaceuticals, such as ^{123}I for less affordable ^{131}I . Establishing the production and cardiomyotropic and parathyroid tropic radiopharmaceutical ^{201}Tl is important. Scintigraphy is one of the most informative imaging techniques. $^{68}\text{Ge}/^{68}\text{Ga}$ generator in accordance with the term of operation for two years, provides cancer specific pharmaceutical to oncological clinics, which is an alternative to expensive cyclotron radionuclides.

УДК: 539.104; 538.91

ВЛИЯНИЕ МЭВ ЭНЕРГИИ ИОНОВ КРИПТОНА НА УПРОЧНЕНИЕ СПЛАВА Ni-Ti

¹⁾ Сатпаев Д.А., ¹⁾ Полтавцева В.П., ²⁾ Дегтярева А.С.¹⁾ Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан²⁾ Казахский национальный исследовательский технический университет и.м. К.И. Сатпаева, Алматы, Казахстан

В работе экспериментально изучены закономерности изменения микротвердости и фазового состава сплава Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии в результате облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 93 и 147 МэВ при температуре $\leq 100^\circ\text{C}$. Установлено, что независимо от энергии ионов $^{84}\text{Kr}^{15+}$ в процессе облучения протекает полное радиационно-стимулированное превращение B19' $\rightarrow$ B2. Показано, что упрочнение модифицированных слоев увеличивается с ростом энергии ионов $^{84}\text{Kr}^{15+}$ и определяется твердостью аустенитной фазы NiTi за счет образования упрочняемых радиационно-введенных дефектных структур.

ВВЕДЕНИЕ

В соответствии с техническими возможностями ускорительного комплекса ДЦ-60 (Астана, Казахстан) имеется широкий выбор тяжелых ионов и параметров облучения для радиационной модификации металлических материалов. Проведенные исследования структуры и свойств облученного тяжелыми ионами газовых элементов сплава Ni-Ti при сравнимых параметрах облучения, таких как E, J, Фт, Т показали [1–3], что наиболее перспективным направлением для создания многослойной модифицированной структуры является применение тяжелых ионов криптона и ксенона МэВ энергии и с максимальными значениями заряда ионов и интенсивности тока пучка вследствие радиационно-динамических воздействий [4]. При этом созданные покрытия модифицированных сплавов Ni-Ti обладают довольно высоким уровнем прочностных свойств и, возможно, радиационной стойкостью по отношению к ионизирующим излучениям. Кроме того, модифицированные сплавы Ni-Ti проявляют способность к проявлению эффекта памяти формы в виде мартенситных гистерезисов с повышенными температурными параметрами [5]. Однако остается открытым вопрос об эффективности энергии тяжелых ионов, т.е. ее величины в упрочнении модифицированных слоев в области проективного пробега R_p и в запроективной области ($h > R_p$).

Целью настоящего исследования является изучение особенностей влияния МэВ энергии ионов криптона на упрочнение и фазовый состав модифицированных сплавов Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии с эффектом памяти формы.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали полупромышленный сплав Ni-Ti состава 53,46 вес. % Ni – 46,54 вес. % Ti, состоящий преимущественно из NiTi со структурой B2 (аустенит, ОЦК - решетка), NiTi со структурой B19' (мартенсит, моноклинная решетка) и незначительного содержания Ti, избыточного Ni в виде твердого раствора и технологических частиц, близких по составу к $\text{Ti}_2\text{Ni}(\text{C})$ [2,3]. Перед отжигом образцы сплава Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии вырезали

электроискровой резкой из массивной прокованной пластины поперек направления прокатки. Поверхность образцов подвергали механической шлифовке и последующей полировке на сукне с использованием пасты ГОИ. Качество поверхности оценивали методом оптической металлографии.

Облучение тяжелыми ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 93 МэВ (1,11 МэВ/нукл) и 147 МэВ (1,75 МэВ/нукл.) до флюенса $1 \cdot 10^{19}$ ион/ м^2 при температуре $\leq 100^\circ\text{C}$ осуществляли на ускорителе ДЦ-60 (Астана, Казахстан). Ток пучка J_p , площадь радиационной обработки S и проективный пробег ионов $^{84}\text{Kr}^{15+}$ R_p составляли 150 и 850 нА; $4 \cdot 10^{-4}$ и $9 \cdot 10^{-4}$ м^2 ; 7,38 и 10,1 мкм соответственно при облучении ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 93 и 147 МэВ.

Фазовый состав сплава Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с использованием дифрактометра D8 ADVANCE в геометрии расходящегося пучка и излучения рентгеновской трубки с Cu – анодом. Расчетная глубина РСА - анализа >8 мкм, точность анализа 3,4 %. Степень упрочнения оценивали на основе результатов измерений микротвердости по Виккерсу на микротвердомере «ПМТ-3М» (Россия) в зависимости от приложенной нагрузки в диапазоне $0,098 \pm 4,9$ Н. Точность измерений микротвердости 3–4 %. Толщина исследуемых слоев при каждой приложенной нагрузке определяется глубиной отпечатка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Рентгеноструктурный анализ

Рентгеновские дифрактограммы сплава Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии в необлученном состоянии и после облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с различной энергией приведены на рисунке 1. Как видно из рисунка 1 а, действительно фазовый состав необлученного сплава Ni-Ti состоит преимущественно из NiTi со структурой B2 и NiTi со структурой B19', незначительного содержания Ti и Ni в виде твердого раствора, а также соединения $\text{Ni}_3\text{Ti}_3\text{O}$, которое является основой деформационно-упрочненного слоя [3].

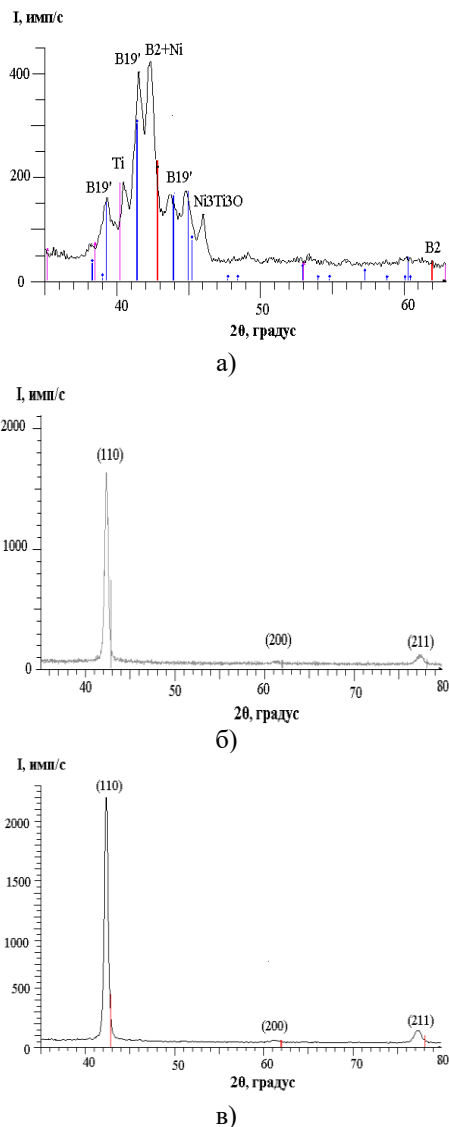


Рисунок 1. Дифрактограммы сплава Ni-Ti до и после облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ различной энергии: (а) – необлученный, (б) – 93 МэВ и (в) – 147 МэВ

Однако под воздействием ионов $^{84}\text{Kr}^{15+}$ происходит изменение фазового состава сплава Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии (рисунки 1, б, в). Как видно из приведенных рисунков, независимо от энергии ионов, на дифрактограммах присутствуют, в основном, рентгеновские линии отражения, принадлежащие фазе NiTi со структурой B2. Это свидетельствует о протекании в процессе облучения высокоэнергетическими ионами криптона полного радиационно-стимулированного превращения $\text{B19}' \rightarrow \text{B2}$ [3, 6, 7] и распыления деформационно-упрочненного слоя [3].

Далее отметим, что интенсивность основной рентгеновской линии отражения (110) фазы NiTi со структурой B2 увеличивается в 4 и 5,5 раз соответственно для ионов криптона с энергией 93 (рисунок 1, б) и 147 МэВ (рисунок 1, в). При этом интенсивность и положение рентгеновских линий отражения

(200) и (211) практически не изменяются. Следовательно, содержание фазы NiTi со структурой B2 увеличивается с ростом МэВ энергии ионов криптона.

Ранее [7] показано, что превращение $\text{B19}' \rightarrow \text{B2}$ полностью завершается при флюенсах облучения $\geq 5 \cdot 10^{19}$ ион/ м^2 в случае ионов $^{84}\text{Kr}^{14+}$ с максимальной энергией 1,75 МэВ/нукл. Тогда как фаза NiTi со структурой B19' еще сохраняется в незначительном количестве после облучения ионами криптона с энергией 280 кэВ до флюенса $5 \cdot 10^{20}$ ион/ м^2 [7].

Измерения микротвердости

Результаты измерений микротвердости сплава Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии в необлученном состоянии и после облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с различной энергией приведены на рисунке 2. В первую очередь следует отметить, что независимо от энергии ионов $^{84}\text{Kr}^{15+}$ наблюдается упрочнение данного сплава как в области проективного пробега R_p (приповерхностный слой), так в запробежной области ($h > R_p$) [2, 3]. При этом на кривых $H_\mu(h)$ наблюдается ярко выраженный максимум в слое до ~ 5 мкм, который с увеличением энергии ионов криптона сдвигается в сторону облученной поверхности. Степень упрочнения в максимуме увеличивается в 1,6 и 2,3 раз после облучения ионами криптона с энергией 93 и 147 МэВ соответственно по сравнению с необлученным сплавом Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии.

Во-вторых, в слое ≥ 6 мкм на всех кривых $H_\mu(h)$ имеет место перегиб, который также сдвигается в сторону облученной поверхности с увеличением энергии ионов $^{84}\text{Kr}^{15+}$. Однако степень упрочнения, наоборот, уменьшается практически линейно независимо от состояния сплавов Ni-Ti.

В третьих, наблюдается уменьшение толщины измеряемого слоя в результате увеличения энергии ионов криптона, что согласуется с повышением степени упрочнения.

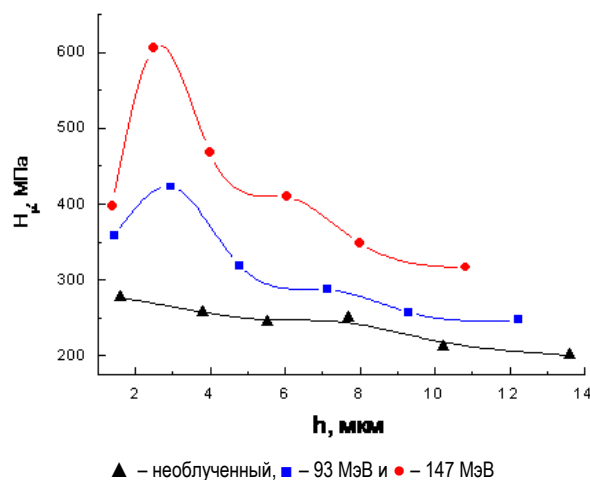


Рисунок 2. Изменение микротвердости от глубины слоев в зависимости от энергии ионов криптона

Величина микротвердости необлученного сплава Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии определяется твердостью мартенситной фазы NiTi со структурой B19', аустенитной фазы NiTi со структурой B2 и деформационно-упрочненного слоя, состоящего из соединения Ni₃Ti₃O. Тогда как вклад в микротвердость облученных сплавов Ni-Ti обусловлен лишь твердостью аустенитной фазы NiTi со структурой B2 за счет образования упрочняемых радиационно-введенных дефектных структур [2, 6, 8].

Таким образом, установлено, что эффективность МЭВ энергии тяжелых ионов криптона в упрочнении модифицированных слоев сплава Ni-Ti в мартенситно-аустенитном состоянии зависит от содержания аустенитной фазы NiTi со структурой B2.

ЛИТЕРАТУРА

- Poltavtseva, V. Peculiarities of structure and hardening of Ni-Ti alloy surface layers formed by $^{84}\text{Kr}^{15+}$ ions irradiation at 147 MeV energy at high temperatures / V. Poltavtseva, A. Larionov, D. Satpaev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V.168. – P.012032.
2. Poltavtseva, V. Radiation hardening of Ni-Ti alloy under implantation of inert gases heavy ions / V. Poltavtseva, A. Larionov, D. Satpaev, M. Gyngazova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V.110. – P.012011.
3. Poltavtseva, V.P. Feature of radiation damage of Ni-Ti alloy under exposure to heavy ions of gaseous elements / V.P. Poltavtseva, S.B. Kislitsin, D.A. Satpaev, T.S. Mylnikova, A.V. Chernyavskii // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V.81. – P.01234.
4. Овчинников, В.В. Радиационно-динамические эффекты. Возможность формирования уникальных структурных состояний и свойств конденсированных сред / В.В. Овчинников // УФН. – 2008. – Т.178, №9. – С.991–1001.
5. Полтавцева, В.П. Особенности влияния флюенса облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ на структуру и свойства сплава Ni-Ti с эффектом памяти формы / В.П. Полтавцева, А.С. Ларионов, Д.А. Сатпаев // Материалы XII Межд. конф. по взаимодействию излучений с твердым телом. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2017. – С.274–276.
6. Полтавцева, В.П. Влияние термического отжига на структурно-фазовые изменения в сплаве Ni-Ti, имплантированном ионами криптона / В.П. Полтавцева, С.Б. Кислицин, С.А. Гынгазов // Известия ВУЗов. Физика. – 2016. – Т.59, №2. – С.3–9.
7. Полтавцева, В.П. Фазовые превращения в сплаве Ni-Ti, имплантированном тяжелыми ионами криптона / В.П. Полтавцева, В.И. Антонюк, В.В. Киреев // Труды 8 Межд. конф. по Фундаментальному и прикладному материаловедению. – Барнаул: Изд-во АлГТУ, 2011. – С.65–69.
8. Полтавцева, В.П. Формирование многослойной модифицированной структуры никелида титана посредством облучения тяжелыми ионами инертных газов / В.П. Полтавцева // Тезисы XI Межд. конф. «Ядерная и радиационная физика. – Алматы: РГПИЯФ, 2017. – С.240.

Ni-Ti ҚОРЫТПАСЫНЫҢ БЕРІКТЕЛУІНЕ КРИПТОН ИОНДАРЫНЫҢ МЭВ ЭНЕРГИЯСЫНЫҢ ҰҚПАЛЫ

¹⁾ Д.А. Сатпаев, ¹⁾ В.П. Полтавцева, ²⁾ А.С. Дегтярева

¹⁾ ҚР ЭМ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²⁾ Қ.И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Алматы, Қазақстан

Жұмыста ≤ 100 °C температурада 93 және 147 МэВ энергиялы $^{84}\text{Kr}^{15+}$ иондарымен сәулелендіру нәтижесінде мартенситті-аустениттік күйдегі Ni-Ti қорытпасының микроқаттылығы мен фазалық құрамының өзгеру заңдылықтары эксперименттік зерделенген. Сәулелендіру барысында $^{84}\text{Kr}^{15+}$ иондарының энергиясынан тәуелсіз толық радиациялық ықпалданған B19'→B2 түрленуі өтетіні анықталды. $^{84}\text{Kr}^{15}$ иондарының энергиясының өсуімен модификацияланған қабаттардың беріктелуі ұлғаятыны көрсетілді және беріктелген радиациялық-енгізілген ақаулық құрылымның түзілуі есебінен болған NiTi аустениттік фазасының қаттылығымен анықталады.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сплаве Ni-Ti в результате облучения ионами криптона с различной МэВ энергией обнаружено:

– Упрочнение с максимумом в приповерхностном слое и его уменьшение в заповрежденной области сплава Ni-Ti, степень которого увеличивается с ростом энергии ионов криптона.

– Протекание в процессе облучения полного радиационно-стимулированного превращения B19'→B2.

– Упрочнение определяется твердостью аустенитной фазы NiTi за счет образования упрочняемых радиационно-введенных дефектных структур.

EFFECT OF MeV ENERGY OF CRYPTON IONS ON Ni-Ti ALLOY HARDENING

¹⁾ D.A. Satpaev, ¹⁾ V.P. Poltavtseva, ²⁾ A.S. Degtyareva

¹⁾ *Institute of Nuclear Physics ME RK, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *Kazakh National Research Technical University after K.I. Satpaev, Almaty, Kazakhstan*

The patterns of changes in microhardness and phase composition of Ni-Ti alloy in the martensitic-austenite state have been experimentally studied as a result of irradiation with ${}^{84}\text{Kr}^{15+}$ ions with the energy of 93 and 147 MeV at the temperature of ≤ 100 °C. It was established that irrespective of the energy of ${}^{84}\text{Kr}^{15+}$ ions, a complete radiation-stimulated B19'→B2 transformation occurs during irradiation. It was shown that hardening of the modified layers increases with the energy of ${}^{84}\text{Kr}^{15+}$ ions and it is determined by hardness of NiTi austenite phase due to formation of the hardened radiation-introduced defective structures.

УДК: 539.104; 538.91

ВЛИЯНИЕ ФЛЮЕНСА ОБЛУЧЕНИЯ ВЫСОКОЭНЕРГЕТИЧЕСКИМИ ИОНАМИ КРИПТОНА НА УПРОЧНЕНИЕ СПЛАВА Ni-Ti

¹⁾ Сатпаев Д.А., ¹⁾ Полтавцева В.П., ²⁾ Партыка Я.¹⁾ Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан²⁾ Люблинский технический университет, Люблин, Польша

В работе экспериментально изучены закономерности изменения микротвердости и фазового состава сплава Ni-Ti в аустенитном структурно-фазовом состоянии в зависимости от флюенса облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 147 МэВ. Установлено, что упрочнение с максимумом в области проективного пробега R_p и в запробежной области ($h > R_p$) увеличивается с ростом флюенса облучения вплоть до $5 \cdot 10^{19}$ ион/м². Показано, что причиной упрочнения является образование радиационно-введенных упрочняемых дефектных структур. В процессе облучения до максимального флюенса также характерно формирование наноразмерных частиц мартенситной R-фазы и уменьшение содержания фазы NiTi со структурой B2 вследствие радиационных воздействий.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из перспективных направлений формирования многослойной модифицированной структуры сплавов на основе никелида титана с эффектом памяти формы является облучение тяжелыми ионами инертных газов МэВ – энергии и с максимальными значениями заряда ионов и интенсивности тока пучка [1–4]. В работах [1, 3–5] показано, что изменение структуры и физико-механических свойств модифицированных слоев зависит от фазового состава сплава Ni-Ti и параметров облучения, таких как M, Z, E, J, Фт, $T_{\text{обл}}$. Установлено [1, 3, 5], что упрочнение поверхности сплава Ni-Ti в однофазном состоянии и его разупрочнение для двухфазного состояния после облучения ионами $^{40}\text{Ar}^{8+}$ и $^{84}\text{Kr}^{15+}$ при сравнимых параметрах A/Z, E/нукл, Фт, J, T связаны с преобладающим вкладом накопления наноструктурных дефектов и процессами распыления/ионной полировки поверхности, радиационно-стимулированным превращением B19'→B2 соответственно. Однако независимо от фазового состава сплава Ni-Ti имеет место упрочнение в области проективного пробега R_p и в запробежной области ($h > R_p$). При этом модифицированные сплавы Ni-Ti проявляют способность к проявлению эффекта памяти формы в виде мартенситных гистерезисов с повышенными температурными параметрами [4].

Целью настоящего исследования является изучение особенностей влияния флюенса облучения ионами криптона с энергией 147 МэВ на упрочнение и структуру модифицированных сплавов Ni-Ti с эффектом памяти формы в аустенитном структурно-фазовом состоянии.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследовали сплав Ni-Ti в аустенитном структурно-фазовом состоянии – однофазный сплав Ni-Ti со структурой B2 (аустенит). Образцы данного сплава получали в результате отжига в вакуумной ($\sim 10^{-4}$ Па) печи в течение 1 ч при 230 ± 3 °C образцов полупромышленного двухфазного сплава Ni-Ti состава 53,46 вес.% Ni – 46,54 вес.% Ti [1]. Двухфазный

сплав Ni-Ti состоял преимущественно из NiTi со структурой B2 (аустенит, ОЦК - решетка), NiTi со структурой B19' (мартенсит, моноклинная решетка) и незначительного содержания Ti, избыточного Ni в виде твердого раствора и технологических частиц, близких по составу к $\text{Ti}_2\text{Ni}(\text{C})$ [2–4]. Перед отжигом образцы двухфазного сплава Ni-Ti вырезали электроискровой резкой из массивной прокованной пластины поперек направления прокатки. Поверхность образцов подвергали механической шлифовке и последующей полировке на сукне с использованием пасты ГОИ. Качество поверхности оценивали методом оптической металлографии.

Облучение тяжелыми ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ с энергией 147 МэВ (1,75 МэВ/нукл.) до флюенсов $1 \cdot 10^{18}$, $1 \cdot 10^{19}$ и $5 \cdot 10^{19}$ ион/м² осуществляли на ускорителе ДЦ-60 (Астана, Казахстан) при температуре ≤ 100 °C. Площадь радиационной обработки составляла $\sim 1 \cdot 10^{-4}$ м². Проективный пробег ионов $^{84}\text{Kr}^{15+}$ $R_p = 10,1$ мкм.

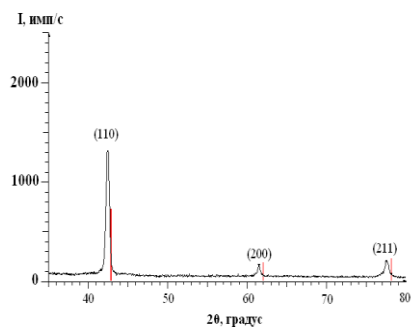
Фазовый состав сплава Ni-Ti исследовали методом рентгеноструктурного анализа (РСА) с использованием дифрактометра D8 ADVANCE в геометрии расходящегося пучка и излучения рентгеновской трубки с Cu – анодом. Расчетная глубина РСА-анализа > 8 мкм, точность анализа 3,4 %. Степень упрочнения оценивали на основе результатов измерений микротвердости по Виккерсу на микротвердомере «ПМТ-3М» (Россия) в зависимости от приложенной нагрузки в диапазоне $0,098 \pm 4,9$ Н. Точность измерений микротвердости 3–4 %. Толщина исследуемых слоев при каждой приложенной нагрузке определяется глубиной отпечатка.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

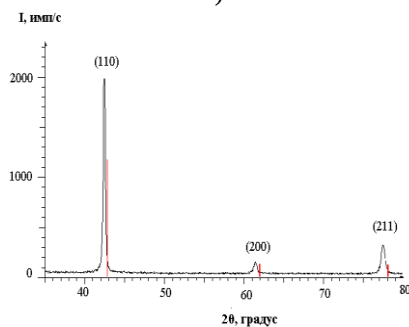
Рентгеноструктурный анализ

Как видно из рисунка 1, на дифрактограммах однофазного сплава Ni-Ti, независимо от флюенса облучения, присутствуют в основном рентгеновские линии отражения, принадлежащие фазе NiTi со структурой B2 (аустенит). Однако по сравнению с

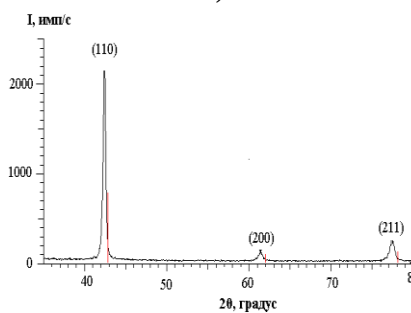
необлученным однофазным сплавом Ni-Ti (рисунок 1, а) интенсивность основной рентгеновской линии отражения (110) увеличивается не пропорционально с ростом флюенса облучения. Так, интенсивность данной линии отражения увеличивается в 1,5 (рисунок 1, б), 1,6 (рисунок 1, в) и 1,15 раз (рисунок 1, г) после облучения до флюенсов $1 \cdot 10^{18}$, $1 \cdot 10^{19}$ и $5 \cdot 10^{19}$ ион/ м^2 соответственно.



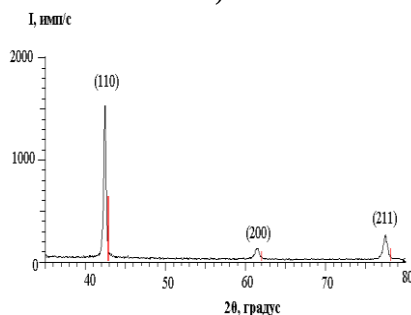
а)



б)



в)

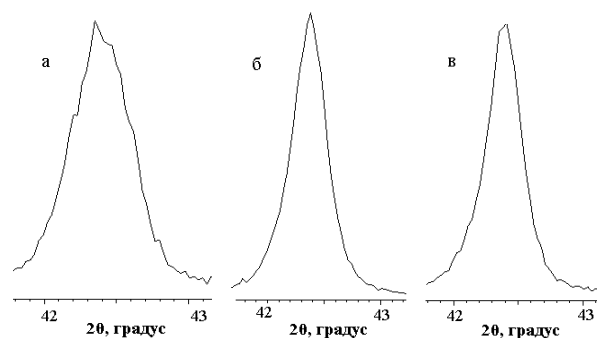


г)

а – необлученный, б – $1 \cdot 10^{18}$, в – $1 \cdot 10^{19}$ и г – $5 \cdot 10^{19}$ ион/ м^2

Рисунок 1. Дифрактограммы сплава Ni-Ti до и после облучения при различных флюенсах

Кроме того, обнаружено расщепление рентгеновской линии отражения (110) в случае необлученного однофазного сплава Ni-Ti и после облучения до максимального флюенса (рисунок 2). Известно [6, 7], что расщепление данной линии отражения является одним из рентгеновских признаков, свидетельствующих о формировании наноразмерных частиц мартенситной R-фазы вследствие радиационных или термических воздействий. На основании полученных данных можно заключить следующее. Образование мартенситной R-фазы происходит в процессе получения однофазного сплава Ni-Ti как следствие термического воздействия при отжиге двухфазного сплава. В результате воздействия высокоэнергетических ионов криптона содержание мартенситной R-фазы уменьшается ниже чувствительности метода рентгеноструктурного анализа или исчезает совсем (рисунок 2, б) и вновь восстанавливается в процессе облучения до максимального флюенса (рисунок 2, в).



а – необлученный; б – $1 \cdot 10^{18}$ и $1 \cdot 10^{19}$; в – $5 \cdot 10^{19}$ ион/ м^2

Рисунок 2. Фрагменты дифрактограмм линии (110) фазы B2 до и после облучения до различных флюенсов

Результаты расчета по программам RTP и WinFit параметров PCA – параметра кристаллической решетки a , размера кристаллитов $R_{(110)}$, деформации решетки ε , содержания $S_{(110)}$ и уширения линии $B_{(110)}$ фазы NiTi со структурой B2 необлученного и облученного до различных флюенсов однофазного сплава Ni-Ti приведены в таблице. Отметим, во-первых, что рассчитанные параметры PCA изменяются не пропорционально с ростом флюенса облучения. Во-вторых, по сравнению с необлученным однофазным сплавом Ni-Ti в результате воздействия высокоэнергетических ионов криптона наблюдается увеличение параметров a , $R_{(110)}$ и уменьшение параметров ε , $S_{(110)}$ и $B_{(110)}$.

Увеличение параметра кристаллической решетки облученного однофазного сплава Ni-Ti свидетельствует о ее расширении, связанном в основном с образованием радиационно-введенных дефектов (см. таблицу). Причем максимальное расширение решетки происходит в результате облучения до флюенса $1 \cdot 10^{19}$ ион/ м^2 , а минимальное в случае максимального флюенса. Тогда как степень уменьшения содер-

жания фазы NiTi со структурой B2 составляет 1,7, 1,25 и 1,4, а степень укрупнения ее кристаллитов 1,8, 1,2 и 1,4 после облучения до флюенсов $1 \cdot 10^{18}$, $1 \cdot 10^{19}$ и $5 \cdot 10^{19}$ ион/м² соответственно. Следовательно, можно сделать вывод, что основной вклад в уменьшение содержания фазы NiTi со структурой B2 при облучении высокоэнергетическими ионами криптона обусловлен процессом укрупнения ее кристаллитов.

Таблица. Параметры PCA сплава Ni-Ti до и после облучения до различных флюенсов

Фт, ион/м ²	a, нм	R ₍₁₁₀₎ , нм	ε, 10 ⁻⁵ , отн. ед.	S ₍₁₁₀₎ , FWHM	B ₍₁₁₀₎ , 2θ
Необл.	0,30126	18,5	457	0,452	2,575
$1 \cdot 10^{18}$	0,30139	32,8	241	0,261	1,916
$1 \cdot 10^{19}$	0,30158	22,7	343	0,362	1,988
$5 \cdot 10^{19}$	0,30134	25,9	305	0,323	1,994

Отметим, что ранее [8] обнаружен эффект измельчения кристаллитов фазы NiTi со структурой B2 и кристаллитов мартенситной фазы NiTi со структурой B19' под воздействием высокоэнергетических ионов криптона в двухфазном сплаве Ni-Ti. При этом наблюдался рост деформации ОЦК – кристаллической решетки и ее уменьшение для моноклинной кристаллической решетки. В работе [8] также показано, что уширение/сужение рентгеновских линий основных фаз двухфазного сплава Ni-Ti является следствием конкуренции двух радиационно-обусловленных процессов – деформация кристаллической решетки и измельчение/укрупнение кристаллитов фаз.

В случае однофазного сплава Ni-Ti, как видно из таблицы, сужение рентгеновской линии B₍₁₁₀₎ сопровождается укрупнением кристаллитов фазы NiTi со структурой B2 и уменьшением деформации ОЦК – кристаллической решетки, степень которых зависит от флюенса облучения. Однако степень сужения рентгеновской линии B₍₁₁₀₎ практически одинакова – $1,29 \cdot 10^{18}$, $1,29 \cdot 10^{19}$ и $1,34 \cdot 10^{19}$ ион/м². На основе анализа расчетных данных (таблица) показано, что для более низких флюенсов облучения вклад в сужение рентгеновской линии B₍₁₁₀₎ обусловлен конкуренцией R_{макс} и ε_{мин} или R_{мин} и ε_{макс}, тогда как для максимального флюенса – конкуренцией R_{ср} и ε_{ср}.

Измерения микротвердости

Результаты измерений микротвердости сплава Ni-Ti в необлученном состоянии и после облучения до различных флюенсов приведены на рисунке 3. Видно, что независимо от флюенса облучения наблюдается упрочнение сплава Ni-Ti как в области проективного пробега R_p (приповерхностный слой), так в запробежной области (h > R_p). При этом в слое толщиной до ~5 мкм характерно упрочнение с мак-

симумом, степень которого увеличивается в 1,4; 1,6 и 2,5 раза после облучения до флюенсов $1 \cdot 10^{18}$, $1 \cdot 10^{19}$ и $5 \cdot 10^{19}$ ион/м² соответственно по сравнению с необлученным сплавом Ni-Ti. Кроме того, с увеличением флюенса облучения происходит сдвиг максимума в сторону облученной поверхности.

Далее отметим, что на глубинах ≥ 5,5 мкм степень упрочнения уменьшается при всех флюенсах облучения, тем не менее, в конце проективного пробега R_p и в запробежной области сплав Ni-Ti все еще остается упрочненным (рисунок 3). Однако увеличение степени упрочнения в этой области не происходит в случае максимального флюенса.

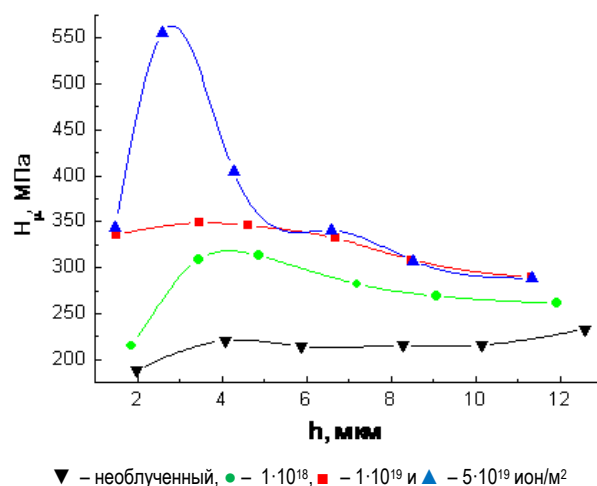


Рисунок 3. Изменение микротвердости от глубины слоев в зависимости от флюенса облучения

Таким образом, на основе сравнения полученных данных PCA и микротвердости можно сделать вывод о том, что эффект упрочнения сплава Ni-Ti обусловлен образованием радиационно-введенных упрочняемых дефектных структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В сплаве Ni-Ti в результате облучения высокоэнергетическими ионами криптона до различных флюенсов наблюдаются следующие эффекты:

- Упрочнения приповерхностного слоя и в запробежной области сплава Ni-Ti независимо от флюенса облучения. Показано, что данный эффект связан с образованием радиационно-введенных упрочняющих дефектных структур.

- Формирования наноразмерных частиц мартенситной R-фазы NiTi и уменьшения содержания фазы NiTi со структурой B2 вследствие радиационных воздействий.

- Не пропорциональной зависимости микротвердости и параметров рентгеноструктурного анализа от флюенса облучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Poltavtseva V. Peculiarities of structure and hardening of Ni-Ti alloy surface layers formed by $^{84}\text{Kr}^{15+}$ ions irradiation at 147 MeV energy at high temperatures / V. Poltavtseva, A. Larionov, D. Satpaev // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2017. – V.168. – P.012032.
2. Полтавцева, В.П. Влияние термического отжига на структурно-фазовые изменения в сплаве Ni-Ti, имплантированном ионами криптона / В.П. Полтавцева, С.Б. Кислицин, С.А. Гынгазов // Известия ВУЗов. Физика. – 2016. – Т.59, №2. – С.3-9.
3. Poltavtseva, V. Radiation hardening of Ni-Ti alloy under implantation of inert gases heavy ions / V. Poltavtseva, A. Larionov, D. Satpaev, M. Gyngazova // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2016. – V.110. – P.012011.
4. Poltavtseva, V.P. Feature of radiation damage of Ni-Ti alloy under exposure to heavy ions of gaseous elements / V.P. Poltavtseva, S.B. Kisilitsin, D.A. Satpaev, T.S. Mylnikova, A.V. Chernyavskii // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering. – 2015. – V.81. – P.01234.
5. Полтавцева, В.П. Особенности влияния флюенса облучения ионами $^{84}\text{Kr}^{15+}$ на структуру и свойства сплава Ni-Ti с эффектом памяти формы / В.П. Полтавцева, А.С. Ларионов, Д.А. Сатпаев // Материалы XII Межд. конф. по взаимодействию излучений с твердым телом. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2017. – С.274-276.
6. Полтавцева, В.П. Фазообразование в сплаве Ni-Ti при последовательном воздействии ионов криптона и сильнофокусированного электронного пучка / В.П. Полтавцева, Н.Н.Коваль, С.Б. Кислицин, В.И. Антонюк // Материалы X Межд. конф. По взаимодействию излучений с твердым телом. – Минск: Изд. Центр БГУ, 2013. – С.211-213.
7. Лотков, А.И. Влияние старения на температуру начала мартенситного превращения в интерметаллиде NiTi / А.И. Лотков, В.Н. Гришков, С.В. Анохин, А.И. Кузнецов // Известия вузов. Физика. – 1982. – №10. – С.11-16.
8. Полтавцева В.П. Фазовые превращения в сплаве Ni-Ti, имплантированном тяжелыми ионами криптона / В.П. Полтавцева, В.И. Антонюк, В.В. Киреев // Труды 8 Межд. конф. по Фундаментальному и прикладному материаловедению. – Барнаул: Изд-во АлГТУ, 2011. – С.65-69.

Ni-Ti ҚОРЫТПАСЫНЫҢ БЕРІКТЕЛУІНЕ ЖОҒАРЫ ЭНЕРГИЯЛЫ КРИПТОН ИОНДАРЫМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРУ ФЛЮЕНСІНІҢ ҰҚПАЛЫ

¹⁾ Д.А. Сатпаев, ¹⁾ В.П. Полтавцева, ²⁾ Я. Партыка

¹⁾ ҚР ЭМ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²⁾ Люблин техникалық университеті, Люблин, Польша

Жұмыста энергиясы 147 МэВ болатын $^{84}\text{Kr}^{15+}$ иондарымен сәулелендіру флюенсіне байланысты аустениттік құрылымдық-фазалық күйдегі Ni-Ti қорытпасының микроқаттылығы мен фазалық құрамының өзгеру заңдылықтары экспериментті түрде зерделенді. Сәулелендіру флюенсінің өсуімен бірге проективтік жүгіру жолы (R_p) және жүгіру жолынан тыс ($h > R_p$) аймақтарында максимум беріктелу $5 \cdot 10^{19}$ ион/м² мәніне дейін ұлғаятыны анықталды. Беріктелу себебі радиациялық-енгізілген беріктелетін ақаулық құрылымдардың түзілуі екендігі көрсетілді. Максималды флюенске дейін сәулелендіру процесі барысында мартенситтік R-фазаның нанокөлемді бөлшектері қалыптасады және радиациялық әсерлердің салдарынан B2 құрылымды NiTi фазасының мөлшері азаяды.

EFFECT OF THE FLUENCE OF HIGH-ENERGY CRYPTON IONS IRRADIATION ON Ni-Ti ALLOY HARDENING

¹⁾ D.A. Satpaev, ¹⁾ V.P. Poltavtseva, ²⁾ J. Partyka

¹⁾ Institute of Nuclear Physics ME RK, Almaty, Kazakhstan

²⁾ Lublin University of Technology, Lublin, Poland

The patterns of changes in microhardness and phase composition of Ni-Ti alloy in the austenitic structural-phase state have been experimentally studied depending on the fluence of irradiation with $^{84}\text{Kr}^{15+}$ ions with the energy of 147 MeV. It was established that hardening with a maximum in the range of the projected range R_p and in the out-of-range region ($h > R_p$) increases with the growth of the irradiation fluence up to $5 \cdot 10^{19}$ ion/m². It was shown that the reason of hardening is formation of the radiation-introduced hardened defective structures. The formation of nano-sized particles of the martensitic R-phase and the decrease in NiTi phase content with the B2 structure are also characteristic in the process of irradiation up to maximum fluence due to radiation effects.

УДК 621.039 614.8.086.52

СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНОВ НА КАЧЕСТВО ЭПР СПЕКТРОВ

¹⁾ Жумадилов К.Ш., ²⁾ Иванников А.И., ¹⁾ Абышев Б.К., ²⁾ Степаненко В.Ф., ³⁾ Хоши М.

¹⁾ Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²⁾ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, Обнинск, Россия

³⁾ Университет Хиросимы, Хиросима, Япония

В статье приведены результаты исследования степени влияния излучения мобильных телефонов на формирование спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и электромагнитного шума на примере измерений образцов зубных эмалей для диапазона низких доз. С этой целью были получены спектры облученных зубных образцов. Спектры десяти образцов, облученных в номинальных дозах 0, 100, 200, 300 и 500 мГр парами, регистрировались в разное время с мобильным телефоном, и без него. Мобильный телефон был расположен вблизи резонатора спектрометра ЭПР. Специальное программное обеспечение применялось для извлечения радиационно-индуцированного сигнала (РИС) из полного спектра ЭПР и определения его интенсивности. Как было упомянуто выше, для изучения влияния сигнала мобильного телефона на сигнал ЭПР в этом исследовании, радиационный сигнал (РИС) (стандартное отклонение (SD)) будет оцениваться фоновым сигналом и остаточной суммой. Эти параметры были получены для одиночных измерений и как среднее для четырех повторных измерений.

ВВЕДЕНИЕ

Мобильные телефоны используют электромагнитное излучение в микроволновом диапазоне с частотами между 300 МГц (0,3 ГГц) и 300 ГГц [1]. В этом исследовании использовался мобильный телефон с технологией множественного доступа с кодовым разделением (CDMA). Это позволяет использовать цифровую модуляцию, называемую расширенным спектром, которая распределяет голосовые данные по очень широкому каналу псевдослучайным образом с использованием псевдослучайного кода пользователя или ячейки [2].

Целью исследования является оценка влияния мобильного телефона на примеси спектров электронного парамагнитного резонанса (ЭПР) и чувствительности спектрометра. Диапазон ЭПР обусловлен частотой или длиной волны микроволнового источника спектрометра. Эксперименты ЭПР часто проводятся в X-диапазоне с частотой микроволн 10 ГГц. Коэффициентом, определяющим чувствительность спектрометра, является отношение сигнал / шум. Из литературы [3] имеется несколько типов шумового сигнала, таких как шум детектора, клистрон-шум, шум усилителя и т.д., а также в этом исследовании радиационный сигнал (РИС) (стандартное отклонение), фоновый сигнал и остаточная сумма. Эти три параметра отвечают за качество спектров ЭПР и за чувствительность спектрометра, который пропорционален отношению амплитуды сигнала к амплитуде шума на рекордере. Также эти параметры были исследованы в дневное и вечернее время с мобильным телефоном и без него. Мобильный телефон располагался вблизи резонатора спектрометра ЭПР.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Гранулы зубной эмали, полученные из разных образцов зубов, смешивали и после поделили на

аликвоты по 100 мг. Полученные 10 аликвот облучали дозами 0, 100, 200, 300, 500 мГр соответственно источником ⁶⁰Co в Университете Хиросимы [4–7]. Стандартное отклонение дозы облучения оценивается как 3 %.

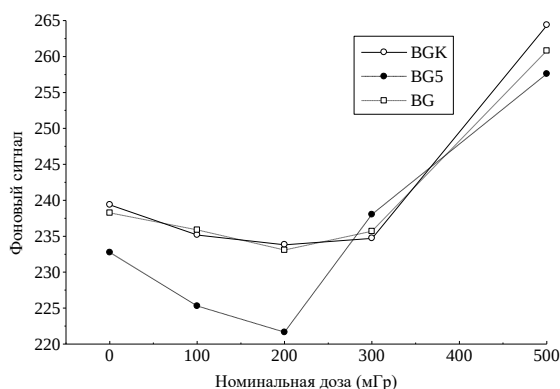
Измерения ЭПР проводились по меньшей мере через десять дней после облучения и подготовки образца, так что все переходные радиационно-механические сигналы исчезли или пришли в равновесное состояние [8]. Все измерения проводились при стабилизированной комнатной температуре 21 °C с использованием спектрометра ЭПР в X-диапазоне JEOLJES-FA100, оснащенного цилиндрической моделью резонатора EV-UCX2 с цилиндрической формой TE011 с высоким Q-фактором, и с использованием параметров регистрации спектра аналогичными ранее опубликованным [9, 10].

Специально разработанное компьютерное программное обеспечение [11–13] использовалось для извлечения радиационно-индуцированного сигнала (РИС) из полного спектра ЭПР и определения его интенсивности (или амплитуды пика-пика). Спектр ЭПР облученной эмали был разделен на РИС и фоновый сигнал (BGS), применяя нелинейную аппроксимацию модельного спектра, описывающего РИС и BGS в аналитической форме. Процедура обработки спектра была применена с описанием BGS асимметричной узкой составляющей и широкой составляющей, состоящей из суперпозиции гауссовских производных функций. Для всех эмалевых спектров использовалось окно шириной 3,0 мТл (левая граница окна фитинга была равна –1,0 мТл и правая граница +2,0 мТл по отношению к максимальному значению BGS) [14–17].

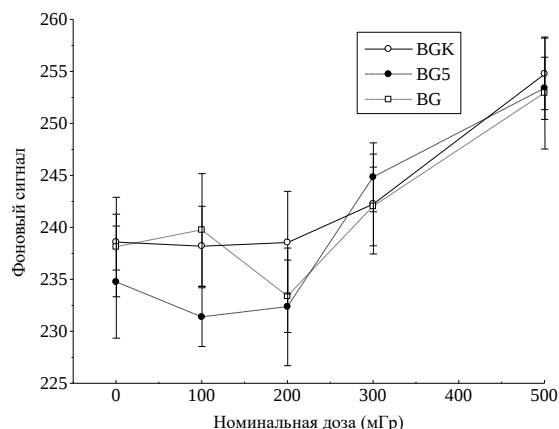
РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Спектры десяти образцов, облученных в номинальных дозах 0, 100, 200, 300 и 500 мГр, регистри-

ровались в разное время и с мобильным телефоном, и без него: 1) в течение дня с 9 до 17 часов; 2) в течение дня с 9 до 17 часов с мобильного телефона. После 17 часов и в субботу и воскресенье с 9 до 17 часов (это не предполагает, что никакой шумовой сигнал не способствовал спектрам). Этот выбор был обусловлен различными условиями и влиянием шума в дневное время и после 17 часов, в субботу и воскресенье (когда нагрузка снижается). Местоположение телефона было, как обычное положение при использовании спектрометра ЭПР оператором, т.е. рядом с резонатором.



а)



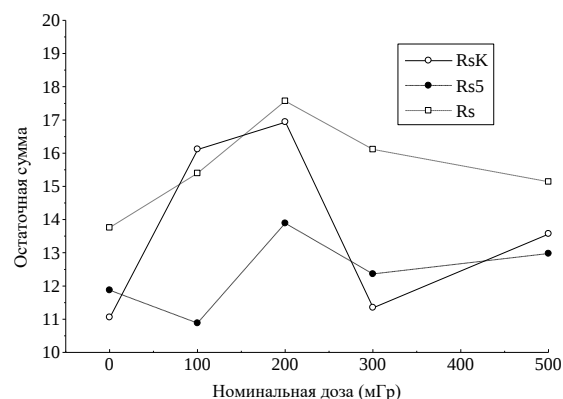
б)

BGK – фооновый сигнал для условий измерений с мобильным телефоном; BG5 – фооновый сигнал для условий измерений после 17 часов без мобильного телефона; BG – фооновый сигнал для условий измерений от 9 до 17 часов без мобильного телефона

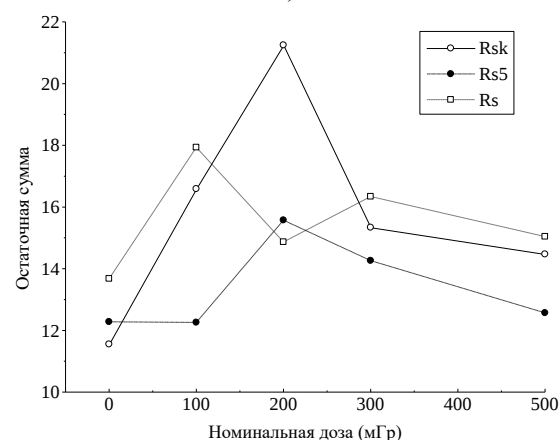
Рисунок 1. Зависимость фонового сигнала от номинальной дозы: (а) – для одиночных спектральных измерений; (б) – для средних четырех повторных спектральных измерений.

Как было упомянуто выше для изучения влияния сигнала мобильного телефона на сигнал ЭПР в этом исследовании, радиационный сигнал (RIS) (стандартное отклонение (SD)) будет оцениваться фооновым сигналом и остаточной суммой. Эти параметры были получены для одиночных измерений и как среднее для четырех повторных измерений. На рисунке 1 показан фооновый сигнал из образцов эмали для

разного времени измерения с мобильным телефоном и без него. Из этого рисунка для одиночного измерения (рисунок 1, а) самый низкий фоновый сигнал был обнаружен после 17-часовых спектров, для измерения дневного времени и для измерений с сигналом мобильного телефона почти одинаковый и только для дозы 500 мГр с фоновым сигналом мобильного телефона выше. Для среднего из четырех повторных спектров (рисунок 1, б) изменения были обнаружены для всех точек (кроме 300 мГр) для измерения после 17 часов. Более высокий фоновый сигнал для всех точек для измерений с мобильным телефоном (кроме 100 мГр).



а)



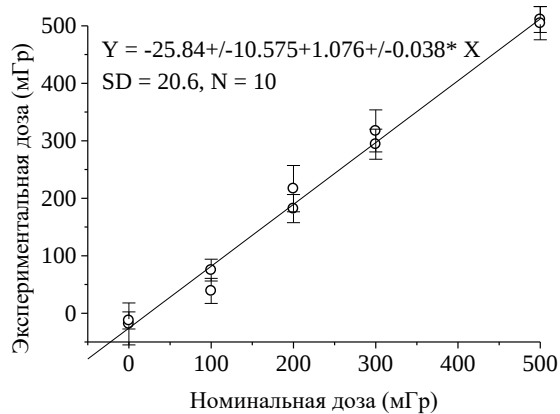
б)

RsK – остаточный сигнал для условий измерений с мобильным телефоном; Rs5 – остаточный сигнал для условий измерений после 17 часов без мобильного телефона; Rs – остаточный сигнал для условий измерений от 9 до 17 часов без мобильного телефона

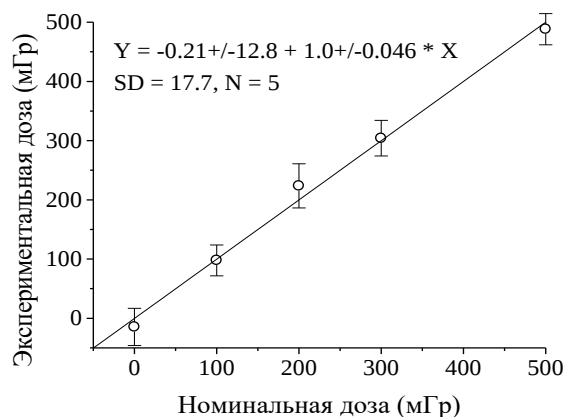
Рисунок 2. Зависимость остаточной суммы от номинальной дозы: (а) – для измерений в одном спектре, (б) – для средних четырех повторных спектральных измерений

Качество фильтрации спектров при обработке характеризуется остаточным сигналом, полученным путем вычитания модельного спектра из экспериментального. Интенсивность этого сигнала характеризуется остаточной суммой, которая получается из среднеквадратичной амплитуды остаточного сигнала. Остальная сумма численно характеризует шумы

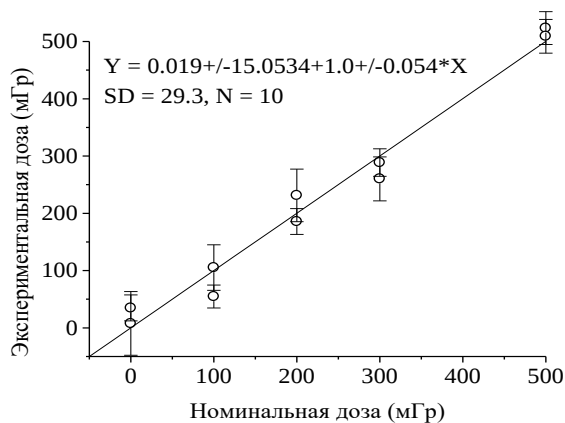
**СТЕПЕНЬ ВЛИЯНИЯ ИЗЛУЧЕНИЯ МОБИЛЬНЫХ ТЕЛЕФОНОВ
НА КАЧЕСТВО ЭПР СПЕКТРОВ**



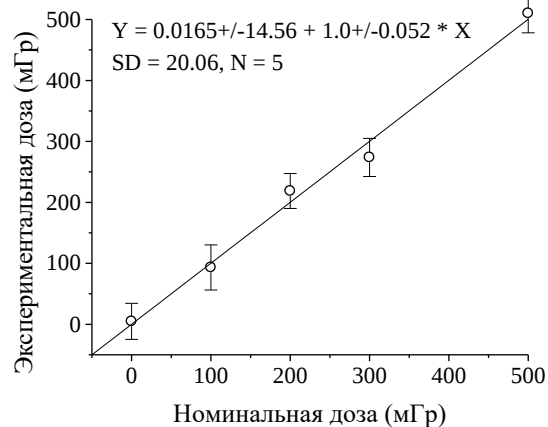
а)



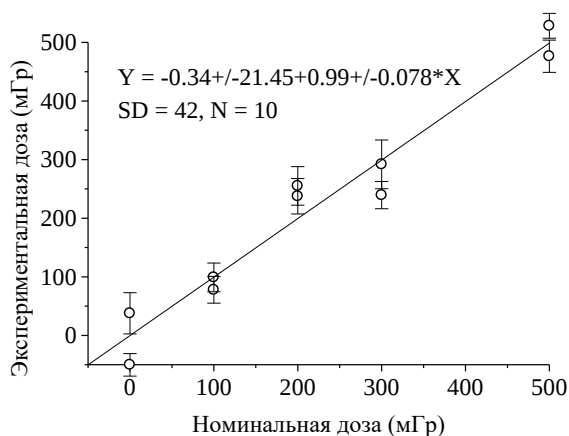
а)



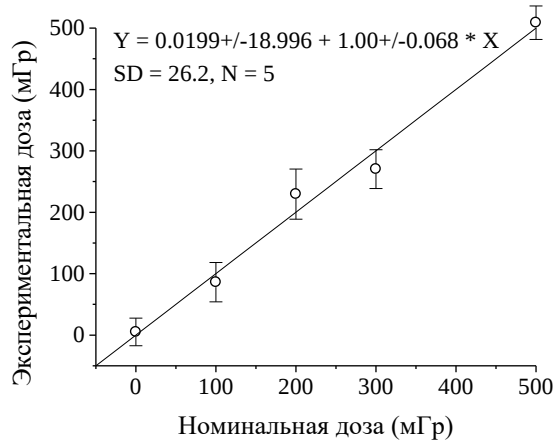
б)



б)



в)



в)

Рисунок 3. Зависимость экспериментальной дозы от номинальной дозы для измерения одиночного спектра: (а) – для условий измерения после 17 часов без мобильного телефона; (б) – для условий измерения от 9 до 17 часов без мобильного телефона; (в) – для условий измерений с помощью мобильного телефона

в остаточном сигнале, а также вызвана неполным соответствием модели экспериментальному спектру. Зависимости остаточной суммы от времени накопления, измеренных для различной дозы, показаны на рисунке 2.

Рисунок 4. Зависимость экспериментальной дозы от номинальной дозы для четырех повторных спектральных измерений: (а) – для условий измерения после 17 часов без мобильного телефона; (б) – для условий измерения от 9 до 17 часов без мобильного телефона; (в) – для условий измерений с помощью мобильного телефона

Для одиночных спектральных измерений (рисунок 2, а) и для средних четырех повторных спектральных измерений нельзя сказать о высоком влиянии мобильного телефона, потому что некоторые результаты для измерений с мобильным телефоном

выше результатов во время дневных измерений без мобильного телефона. И только измерения после 17 часов приводят к уменьшению шумового сигнала.

Для определения влияния RIS на измерения одиночных спектров (рисунок 3) и RIS для четырех повторных спектральных измерений (рисунок 4) оценка стандартного отклонения (SD) для условий измерения после 17 часов без мобильного телефона (рисунки 3, а и 4, а); для условий измерения от 9 до 17 часов без мобильного телефона (рисунки 3, б и 4, б); для условий измерений с помощью мобильного телефона (рисунки 3, в и 4, в). Из этих цифр SD для измерений с мобильным телефоном выше измерений без мобильного телефона и после 17 часов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Pozar, David M. Microwave Engineering Addison-Wesley Publishing Company. ISBN 0-201-50418-9). - 1993.
2. Comparison of mobile phone standards. <http://en.wikipedia.org/wiki/>. - 2011.
3. Poole C.P. Electron spin resonance: comprehensive treatise on experimental techniques. - 2nd edition. Wiley, New York - 1983.
4. Ivannikov A.I. et al. Individual dose reconstruction among residents living in the vicinity of the Semipalatinsk Nuclear Test Site using EPR spectroscopy of tooth enamel // Health Phys. - 2002. - Vol. 83. - P. 183-196.
5. Ivannikov A.I. et al. Dental enamel EPR dosimetry: comparative testing of the spectra processing methods for determination of Radiation induced-signal amplitude // Health Phys. - 2010. - Vol. 98. - P. 345-351.
6. Tielewuhun E. et al. Spectra processing at tooth enamel dosimetry: analytical description of EPR spectrum at different microwave power // Radiat. Meas. - 2006. - Vol. 41. - P. 410-417.
7. Zhumadilov K. et al. ESR dosimetry study on population of settlements nearby Ust-Kamenogorsk city, Kazakhstan // Radiat. Environ. Biophys. - 2009. - Vol. 48. - P. 419-425.
8. IAEA Report. Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. Report of a coordinated research project // IAEA-TecDoc-1331. - Vienna. - 2002.
9. Hoshi M. et al. Interlaboratory comparison of tooth enamel dosimetry on Semipalatinsk region: Part 1, general view // Radiat. Meas. - 2007. - Vol. 42. - P. 1005-1014.
10. Ivannikov A.I. et al. Interlaboratory comparison of tooth enamel dosimetry on Semipalatinsk region: Part 2, Effects of spectrum processing // Radiat. Meas. - 2007. - Vol. 42. - P. 1015-1020.
11. Ivannikov A.I. et al. EPR Tooth Enamel Dosimetry: Optimization of the Automatic Spectra Deconvolution Procedure // Health Phys. - 2001. - Vol. 81(2). - P. 124-137.
12. Ivannikov A.I. et al. Optimization of recording conditions for the electron paramagnetic resonance signal used in dental enamel dosimetry // Radiat. Prot. Dosim. - 2002. - Vol. 100. - P. 531-538.
13. Zhumadilov K.S. et al. Tooth enamel EPR dosimetry: selecting optimal spectra registration parameters and effects of sample mass on sensitivity // J. Radiat. Res. - 2005. - Vol. 46. - P. 435-442.
14. Tanaka K. et al. Study on influence of X-ray baggage scan on ESR dosimetry for SNTS using human tooth enamel // J. Radiat. Res. - 2006. - Vol. 46. - P. 435-442.
15. Zhumadilov K. et al. Results of tooth enamel EPR dosimetry for population living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site // Radiat. Meas. - 2007. - Vol. 42. - P. 1049-1052.
16. Zhumadilov K. et al. Measurement of absorbed doses from X-ray baggage examinations to tooth enamel by means of ESR and glass dosimetry // Radiat. Environ. Biophys. - 2008. - Vol. 47. P. 541-545.
17. Toyoda S. et al., ESR Measurements of Background Doses in teeth of Japanese Residents // Radiat. Meas. - 2011. - Vol. 46. - P. 797-800.

ҰЯЛЫ ТЕЛЕФОН СӘУЛЕЛЕРІНІҢ ЭПР СПЕКТРІНІҢ САПАСЫНА ӘСЕР ЕТУ ДӘРЕЖЕСІ

¹⁾ К.Ш. Жумадилов, ²⁾ А.И. Иванников, ¹⁾ Б.К. Абышев, ²⁾ В.Ф. Степаненко, ³⁾ М. Хоши

¹⁾ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университет, Астана, Қазақстан

²⁾ А.Ф. Цыба атындағы МРЗО – ФМБМ «ҰМРЗО» Ресей Денсаулық сақтау министрлігінің филиалы, Обнинск, Ресей

³⁾ Хиросима Университеті, Хиросима, Жапония

Мақалада ұялы телефонның электрондық парамагниттік резонанс спектрінің қалыптасуына және төменгі доза қатарындағы тіс эмалінің үлгілерін өлшеу кезінде электромагниттік шу есебіндегі тигізетін әсерінің зерттеу нәтижелері көрсетілген. Осы мақсатта сәулелендірілген тіс үлгілерінің спектрі алынды. Номиналды дозамен

(0, 100, 200, 300 және 500 мГр) сәулендірген он үлгілердің спектрі әр түрлі уақытта және ұялы телефонмен, телефонсыз тіркелді. Ұялы телефон ЭПР спектрометрінің резонаторына жақын орналастырылған. ЭПР толық спектрінен радиациялық индукцияланған сигналды алу үшін және оның қарқындылығын анықтау үшін арнайы компьютерлік бағдарлама қолданылған. Жоғарыда айтылғандай, ұялы телефон сигналының ЭПР сигналына әсерін зерттеу үшін радиациялық сигнал (RIS) (стандартты ауытқу (SD)) фондық сигналмен және қалдық сомамен бағаланады. Бұл параметрлер жалғыз өлшемде және орта есеппен төрт рет қайталанатын өлшем үшін алынды.

THE DEGREE OF INFLUENCE RADIATION FROM MOBILE PHONES ON THE QUALITY OF EPR SPECTRA

¹⁾ K.Sh. Zhumadilov, ²⁾ A.I. Ivannikov, ¹⁾ B.K. Abyshev, ²⁾ V.F. Stepanenko, ³⁾ M. Hoshi

¹⁾ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

²⁾ *MRRC named after A.F. Tsyba – a branch of the FSBI «NMRCR» of the Ministry of Health, Obninsk, Russia*

³⁾ *Hiroshima University, Hiroshima, Japan*

The results of the investigation of the effect of mobile phone radiation on the formation of electron paramagnetic resonance (EPR) spectra and electromagnetic noise on the example of measurements of dental enamel samples for the low dose range are presented. To this end, spectra of irradiated dental samples were obtained. The spectra of ten samples irradiated in nominal doses of 0, 100, 200, 300 and 500 mGy in pairs were registered at different times with and without a mobile phone. The mobile phone was located near the resonator of the EPR spectrometer. Specially software was used to extract the radiation-induced signal (RIS) from the full EPR spectrum and determine its intensity. As mentioned above to study the effect of the mobile phone signal on the EPR signal in this study, the radiation signal (RIS) (standard deviation (SD)) will be estimated by the background signal and the residual amount. These parameters were obtained for single measurements and, on average, for four repeated measurements.

УДК 621.039 614.8.086.52

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭПР ДОЗИМЕТРИИ ПО ЗУБНОЙ ЭМАЛИ НАСЕЛЕНИЯ, ПРОЖИВАЮЩЕГО ВБЛИЗИ СЕМИПАЛАТИНСКОГО ЯДЕРНОГО ПОЛИГОНА

¹⁾ Жумадилов К.Ш., ²⁾ Иванников А.И., ¹⁾ Сарсенова С.М., ²⁾ Степаненко В.Ф., ³⁾ Хоши М.

¹⁾ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²⁾ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, Обнинск, Россия

³⁾ Университет Хиросимы, Хиросима, Япония

В статье приведены результаты оценки поглощенной дозы вследствие испытаний на Семипалатинском испытательном ядерном полигоне населения проживающего в следующих населенных пунктах: Долонь, Мостик, Бодене методом ЭПР дозиметрии по зубной эмали.

ВВЕДЕНИЕ

В период с 1949 по 1962 год на полигоне Семипалатинска (СИП) было проведено 125 ядерных испытаний (в том числе 25 наземных ядерных испытаний). 29 августа 1949 года был произведен первый ядерный взрыв, который принес загрязнение радиоактивными осадками огромной территории к северо-востоку от эпицентра. Радиоактивное пыльное облако переносилось ветром, и его постепенное осаждение образовывало несколько следов радиоактивных выпадений [1, 2]. Нет данных, описывающих динамику осаждения радиоактивной пыли из облака в области, прилегающей к СИП. Это очень сложная процедура для восстановления индивидуальных и коллективных доз облучения, полученных местным населением.

ЭПР дозиметрия является одним из полезных инструментов для реконструкции дозы [3]. Этот метод может ретроспективно определять дозы облучения через более чем 40 лет после события воздействия. ЭПР измеряет количество стабильных радикалов, создаваемых радиационным воздействием в зубной эмали.

В исследовании участвовали группа ученых из Казахстана, Японии и России. Целью этой работы является определение доз облучения, получаемых населением сел, расположенных вблизи СИП (включая Долонь, Мостик и Бодене, расположенные вблизи следа радиоактивных осадков, сформированного в результате наиболее опасного ядерного испытания 1949 года [4, 5] и г. Курчатов, г. Семипалатинск) при помощи ЭПР дозиметрии по зубной эмали, полученных из образцов зубов собранных в этих селах и городах.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

С 2000 по март 2005 года было отобрано 112 образцов зубов по медицинским показаниям у взрослых жителей сел Долонь, Мостик, Бодене, городов Курчатова и Семипалатинска, которые находятся на расстоянии от 70 до 150 км от СИП. Однако 13 образцов зубов были отклонены из-за недостаточного количества эмали. Еще 11 зубов были собраны в качестве контроля у населения села Кокпекты (400 км к востоку от испытательного полигона), которое не

подвергалось радиоактивному воздействию. По той же причине позже были отклонены три образца из вышеприведенных одиннадцати.

Эмаль была механически отделена от дентина, при помощи твердосплавных зубных боров и разделялись алмазным резцом. Дентин осторожно удаляли, охлаждая водой, чтобы предотвратить нагрев образца, который может вызвать дополнительный ЭПР сигнал и существенно изменить его форму [3]. Эмаль была измельчена кусачками на гранулы диаметром 0,5–1,5 мм. Два разных образца были приготовлены из щечной и языковой частей каждого зуба.

Образцы эмали для калибровки дозы были приготовлены из моляров, собранных у населения села Кокпекты. Порошок зубной эмали, полученный из разных зубов, перемешивали и разделили на аликвоты по 100 мг. Аликвоты облучали дозами 0, 100, 200, 300, 500 и 1000 мГр соответственно источником ⁶⁰Со в Университете Хиросимы [6].

Измерения проводились по меньшей мере через десять дней после облучения и подготовки образца, чтобы все переходные и механические сигналы исчезли или пришли в равновесное состояние [3]. Измерения проводились в X-диапазоне на ЭПР-спектрометре JEOL JES-FA100 при стабилизированной комнатной температуре 21 °С. Спектрометр был оснащен цилиндрическим резонатором модель TE011 с высоким Q-фактором ES-UCX2. Параметры регистрации спектра были такими же, как и ранее опубликованные [7].

Специально разработанное компьютерное программное обеспечение [8] использовалось для извлечения радиационно-индуцированного сигнала (RIS) из полного спектра ЭПР и определения его интенсивности. Эта процедура способна конструировать полный спектр облученной эмали в RIS и фоновый сигнал (BGS) путем применения нелинейного метода наименьших квадратов [9] модельного спектра к экспериментальному. Процедура обработки спектра применялась в режиме с описанием BGS двумя компонентами, состоящими из суперпозиции гауссовских производных функций. Для всех спектров использовалось окно шириной 3,0 мТл (левая граница окна установки составляет –1,0 мТл, а пра-

вая граница +2,0 мТл по отношению к максимально-
му значению BGS) [7, 10].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Дозы для жителей Семипалатинска и города Курчатова были включены в этот отчет из опубликованных данных [11]. Наибольшие дозы 1300 мГр от Мостика и 2800 мГр от Семипалатинска нуждаются в дополнительном исследовании и не включены в настоящий анализ. Экспериментально определенная доза считалась состоящей из двух вкладов: доза от естественного радиационного фона, накопленная в течение срока службы зубной эмали, и доза, полученная в результате ядерных испытаний (избыточная доза). Последний вклад представляет интерес для реконструкции настоящих доз. Интенсивность RIS была преобразована в дозу, поглощенную эмалью D_{en} (выраженной в мГр), калиброванную с использованием гамма-источника ^{60}Co .

Время жизни зубной эмали было получено путем вычитания среднего возраста формирования для данной позиции зуба от возраста человека в момент измерения. Возраст формирования зубной эмали определялся в соответствии с опубликованными данными [3].

Для жителей Долони поглощенные дозы находились в диапазоне от -24 ± 37 до 496 ± 55 мГр. Образцы, приготовленные с языковой стороны и с щечной стороны молярных зубов (5–8), были выбраны для использования при реконструкции дозы. Для некоторых доз были получены отрицательные значения. Это связано с тем, что измерения проводились вблизи порога чувствительности метода. Естественно, что некоторые из значений становятся отрицательными в зависимости от их статистического распределения, определяемого из-за ошибок эксперимента. Отрицательные дозы, вероятно, являются результатом недооценки неопределенности оценки дозы. Уникальным источником может быть индивидуальное изменение фоновой компоненты дозы, которое оценивается по измерениям контрольных образцов, собранных в других селах.

Для всех образцов избыточные дозы рассчитывались по формуле:

$$D_{ex} = D_{en} - TA \cdot D_b,$$

где: D_{en} – доза, рассчитанная по автоматической программе, в мГр; TA – возраст эмали зубов, лет; D_b – фоновая доза, 0,8 мГр/год [10, 12].

Неопределенность определения дозы (E_r) определялась на основе полуэмпирической формулы, аналогичной представленной в [12].

На рисунке показаны индивидуальные определения избыточной дозы для разных лет образования эмали.

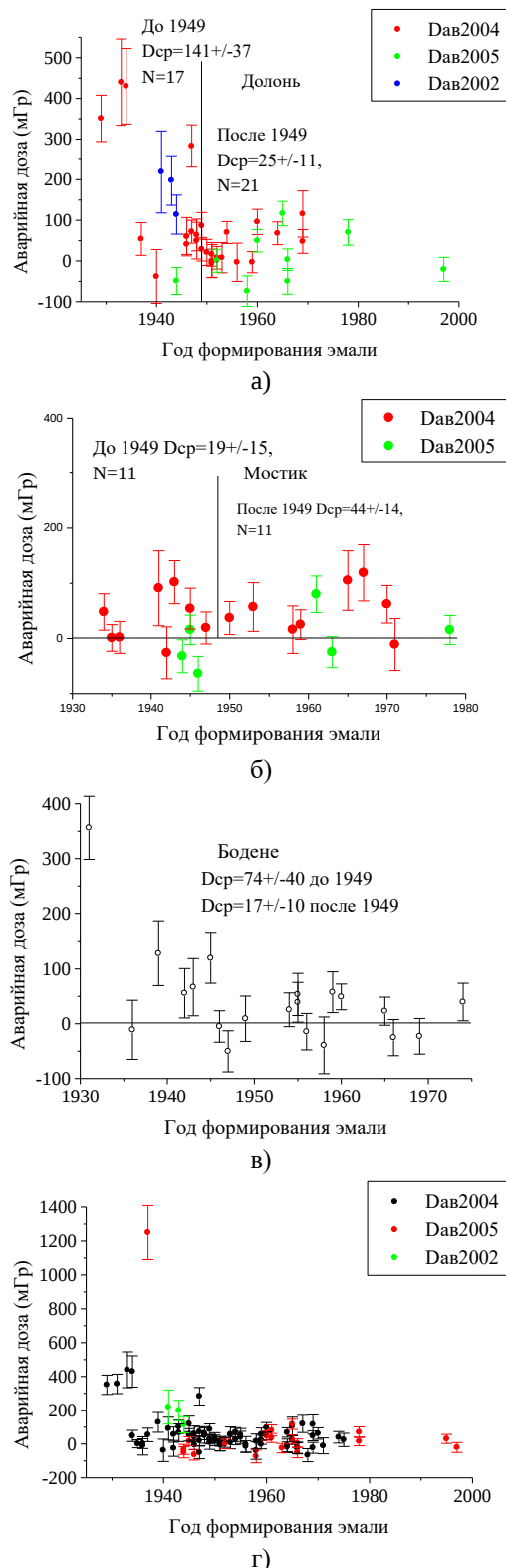


Рисунок. Превышение дозы в эмали по сравнению с годом образования эмали для Долони (а), Мостика (б), Бодене (в), Семипалатинска и Курчатова (г).

Примечание: средняя избыточная доза $D_{ав}$ (мГр); D_{ex2002} – избыточная доза, измеренная в 2002 году, D_{ex2004} – избыточная доза, измеренная в 2004 году, D_{ex2005} – избыточная доза, измеренная в 2005 году

Увеличенная доза была определена для одного образца, сформированного до 1949 года, соответствующего периоду наиболее загрязняющего окружающую среду ядерного испытания. Средняя избыточная доза для эмали, образовавшаяся до 1949 года для Долони, составляет $141 \pm 45,5$ мГр (рисунок (а)), для эмали, образовавшейся после 1949 года, средняя доза составляет 25 ± 11 мГр. Для Мостика избыточная доза до 1949 года составляет 19 ± 15 , а после 1949 года 44 ± 14 (рисунок (б)). Для Бодене избыточная доза до 1949 года составляет 74 ± 40 , а после 1949 года 17 ± 10 (рисунок (в)). Для Курчатова избыточная доза до 1949 года составляла 11 ± 20 , а после 1949 года 9 ± 27 (рисунок (г)), а для Семипалатинска избыточная доза 1949 года составляет 135 ± 31 , а после 1949 года 74 ± 35 (рисунок 1 (г)). Основная масса избыточных доз находится около порога чувствительности метода.

Для контрольных образцов избыточные дозы составляют от -66 ± 39 до 24 ± 39 мГр, для Долони от -74 ± 38 до 440 ± 106 мГр, для Мостика от -64 ± 32 до 119 ± 51 , для Бодене от -50 ± 38 до 356 ± 58 мГр, для Курчатова от -47 ± 85 до 56 ± 42 , а для Семипалатинска от 0 ± 46 до 268 ± 79 . Низкие дозы были обнаружены для группы с эмалью, образованной после 1962 года, с окончанием атмосферных ядерных испытаний. Дозовые значения для группы, имеющей эмаль, образованную до 1962 года, согласуются с оценками, основанными на официальных зарегистрирован-

ных данных, свидетельствующих о высоких уровнях осадков в период 1949–1962 годов. Экспериментально измеренные индивидуальные дозы можно сравнить с данными реконструкции дозы, которые были показаны в предыдущей публикации [4, 5], а для Долони это было около 0,5 Гр.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Индивидуальные поглощенные дозы определялись для жителей разных деревень и для жителей города Семипалатинска. Наиболее высокие дозы были измерены в Долони для жителей, чья эмаль была сформирована до 1949 года. Они согласуются с тем, что это село расположено ближе к оси радиоактивного следа.

Следует отметить, что количество исследованных образцов недостаточно для окончательных выводов об уровне воздействия на население по результатам ЭПР дозиметрии. Необходимо исследовать больше образцов зубной эмали, сформированных до 1949 года, для жителей, постоянно находящихся в пострадавших районах в период испытаний.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность за финансовую поддержку из средств Министерства образования и науки Республики Казахстан (на 2018–2020 гг. по грантовому финансированию субъектов научной и/или научно-технической деятельности по проекту ИРН AP05135470).

ЛИТЕРАТУРА

1. Deriglasow, V. I., Gorin, V. V., Maltzev, A. L., Matuschenko, A. M., Safonov, F. F. and Smagulov, S. G., 1991. Radiological situation at Semipalatinsk test site bordering regions of the Kazakh SSR. Bulletin of the Public information center by atomic Energy (CNII atominform) N4: 46-52. Moscow. Russia. (in Russian).
2. Dubasov, U.V., Matuschenko, A.M., Filonov, N.P., et al., 1993. Semipalatinsk Test Site: estimation of radiological consequences Bulletin of the Public information center by atomic Energy (CNII Atominform). Special issue. Moscow. Russia. (in Russian).
3. IAEA Report, 2002. Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. Report of a coordinated research project. IAEA-TECDOC-1331. Vienna.
4. Imanaka, T., Fukutani, S., Yamamoto, M., Sakaguchi, A., Hoshi, M., 2005. Width and Center-axis Location of the Radioactive Plume That Passed over Dolon and Nearby Villages on the Occasion of the First USSR A-bomb Test in 1949. J. Radiat. Res. 46 (4), 395-399.
5. Stepanenko, V.F., Hoshi, M., Dubasov, Yu.V., Sakaguchi, A., Yamamoto, M., Orlov, M., Bailiff, I.K., Ivannikov, A.I., Skvortsov, V.G., Kryukova, I.G., Zhumadilov, K.S., Apsalikov, K.N., Gusev, B.I., 2006. A gradient of radioactive contamination in Dolon village near SNTS and comparison of computed dose values with instrumental estimates for the 29 August, 1949 nuclear test. J. Radiat. Res. 47, A149-A158.
6. Ivannikov, A.I., Skvortsov, V.G., Stepanenko, V.F., Tikunov, D.D., Fedosov, I.M., Romanyukha, A.A., Wieser, A., 1997. Wide-scale EPR retrospective dosimetry: Results and problems. Radiat. Prot. Dosim. 71, 175-180.
7. Zhumadilov, K.S., Ivannikov, A.I., Skvortsov, V.G., Zhumadilov, Zh.S., Endo, S., Tanaka, K., and Hoshi, M., 2005. Tooth enamel EPR dosimetry: selecting optimal spectra registration parameters and effects of sample mass on sensitivity. J. Radiat. Res. 46 (4), 435-442.
8. Ivannikov, A.I., Trompier, F., Gaillard-Lecanu, E., Skvortsov, V.G. and Stepanenko, V.F., 2002. Optimization of recording conditions for the electron paramagnetic resonance signal used in dental enamel dosimetry. Radiat. Prot. Dosim. 100, 531-538.
9. Ivannikov, A.I., Skvortsov, V.G., Stepanenko, V.F., Tikunov, D.D., Takada, J., Hoshi, M., 2001. EPR Tooth Enamel Dosimetry: Optimization of the Automatic Spectra Deconvolution Procedure. Health Phys. 81 (2), 124-137.
10. Ivannikov, A., Zhumadilov, K., Tieliewuhan, E., Jiao, L., Zharlyganova, D., Apsalikov, K.N., Berekenova, G., Zhumadilov, Zh., Toyoda, Sh., Miyazawa, C., Skvortsov, V., Stepanenko, V., Endo, S., Tanaka, K. and Hoshi, M., 2006. Results of EPR Dosimetry for Population in the Vicinity of the Most Contaminating Radioactive Fallout Trace After the First Nuclear Test in the Semipalatinsk Test site. J. Radiat. Res. 47, A39-A46.
11. Ivannikov, A.I., Zhumadilov, Zh., Gusev, B.I., Miyazawa, Ch., Jiao, L., Skvortsov, V.G., Stepanenko, V.F., Takada, J. and Hoshi, M., 2002. Individual dose reconstruction among residents living in the vicinity of the Semipalatinsk Nuclear Test Site using EPR spectroscopy of tooth enamel. Health Phys. 83 (2), 183-196.

12. Zhumadilov, K., Ivannikov, A., Apsalikov, K.N., Zhumadilov, Zh., Toyoda, Sh., Zharlyganova, D., Tieliewuhan, E., Endo, S., Tanaka, K., Miyazawa, C., Okamoto, T. and Hoshi, M., 2006. Radiation Dose Estimation by Tooth Enamel EPR Dosimetry for Residents of Dolon and Bodene. J. Radiat. Res. 47, A47-A53.

**СЕМЕЙ ЯДРОЛЫҚ ПОЛИГОНЫ МАҢЫНДА ТҰРАТЫН ТҰРҒЫНДАР ТІСІ
ЭМАЛІНІҢ ЭПР ДОЗИМЕТРИЯСЫ ҚОРЫТЫНДЫЛАРЫ**

¹⁾ К.Ш. Жумадилов, ²⁾ А.И. Иванников, ¹⁾ С.М. Сарсенова, ²⁾ В.Ф. Степаненко, ³⁾ М. Хоши

¹⁾ *Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан*

²⁾ *А.Ф. Цыба атындағы МРФО – Ресей денсаулық сақтау министрлігі «ҰМРЗО» ФМБМ филиалы, Обнинск, Ресей*

³⁾ *Хиросима университеті, Хиросима, Жапония*

Мақалада Дөлен, Мостик, Бөдене елді мекендері тұрғындарының Семей ядролық сынақ полигонында жүргізілген сынақтар салдарынан жұтылған дозасын тіс эмалі бойынша ЭПР дозиметрия әдісімен бағалаудың қорытындылары келтірілген.

**THE RESULTS OF EPR DOSIMETRY ON TOOTH ENAMEL OF THE POPULATION
LIVING NEAR THE SEMIPALATINSK NUCLEAR TEST SITE**

¹⁾ K.Sh. Zhumadilov, ²⁾ A.I. Ivannikov, ¹⁾ S.M. Sarsenova, ²⁾ V.F. Stepanenko, ³⁾ M. Hoshi

¹⁾ *L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan*

²⁾ *MRRC named after A.F. Tsyba – a branch of the FSBI «NMRCR» of the Ministry of Health, Obninsk, Russia*

³⁾ *University of Hiroshima, Hiroshima, Japan*

The results of an estimation of the absorbed dose after tests on the Semipalatinsk nuclear test site of the population living in the following settlements are shown in the article: Dolon, Mostik, Bodene by the method of EPR dosimetry on tooth enamel.

УДК 621.039 614.8.086.52

ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛИГОНЕ ЛОБНОР (КИТАЙ) НА НАСЕЛЕНИЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН МЕТОДОМ ЭПР ДОЗИМЕТРИИ

¹⁾ Жумадилов К.Ш., ²⁾ Иванников А.И., ²⁾ Степаненко В.Ф., ³⁾ Хоши М.

¹⁾ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²⁾ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, Обнинск, Россия

³⁾ Университет Хиросимы, Хиросима, Япония

В статье приведены результаты оценки влияния испытаний на китайском ядерном полигоне Лобнор на население сел Урджар, Маканчи и Таскескен, расположенных недалеко от Китайско-Казахстанской границы по зубной эмали людей (методом ЭПР дозиметрии), проживающих в этих селах.

Ключевые слова: ЭПР-дозиметрия, зубная эмаль, доза радиации, полигон Лобнор.

Электронно-парамагнитная резонансная (ЭПР) дозиметрия по зубной эмали человека применялась для получения индивидуальных поглощенных доз жителей сел Маканчи, Урджар и Таскескен, расположенных вблизи казахстанско-китайской границы (примерно на расстоянии 400 км к юго-востоку от Семипалатинского испытательного ядерного полигона (СИП) и примерно на расстоянии 1000 км от места испытаний ядерного оружия Лобнор (Китай)). Вследствие наземных и атмосферных ядерных испытаний (1964–1981 гг.) на полигоне Лобнор, люди, проживающие в этих поселениях, подвергаются воздействию радиоактивных осадков. Образцы зубов были извлечены по медицинским показаниям в ходе обычного стоматологического осмотра. Кокпекты был выбран в качестве контроля, как населенный пункт, который не подвергался радиоактивному воздействию и находится на расстоянии 400 км к юго-востоку от СИП. Определено, что избыточные дозы, полученные после вычитания вклада естественного фонового излучения, не превышают 92 мГр для жителей Маканчи. Для жителей Урджара избыточная доза составляла 243 мГр. Для жителей Таскескена максимальная избыточная доза была определена как 95 мГр.

ВВЕДЕНИЕ

База испытаний ядерного оружия Лобнор расположена в Малане, Синьцзянская автономная область Китая (см. рисунок). С 1964 по 1996 годы Китай провел 45 ядерных испытаний на полигоне Лобнор, включая 22 атмосферных и поверхностных испытания. Испытания на поверхности были проведены 16 октября 1964 года, 28 декабря 1966 года и 18 ноября 1971 года. Испытательный участок является самым большим в мире, занимающим площадь более 100000 км². Лобнор делится на четыре испытательные зоны, три для подземных испытаний и один для атмосферных. В настоящее время используются только две зоны, которые занимают площадь около 200 км². Ограниченная информация доступна по выпадениям осадков на местности после испытаний [1]. Воздушные шары использовались для отслежи-

вания траектории обломков мусора, а для контроля за уровнем излучения использовались бортовые и наземные приборы. Оценки экспозиции проводились на подветренной территории на расстоянии 800 км. Оценки внешних воздействий в городах или населенных пунктах в пределах 400–800 км испытательного полигона в провинции Ганьсу составляли от 0,02 до 0,11 мЗв, в среднем около 0,04 мЗв для трех испытаний, на которые приходилось более 90 % дозы от всех китайских испытаний [1].

На юго-востоке Восточно-Казахстанской области, в селах Маканчи, Урджар и Таскескен около казахстанско-китайской границы, было обнаружено, что в период с 1963 по 1981 год в радиоактивных осадках содержались короткоживущие радионуклиды, такие как ^{103,106}Ru, ^{141,144}Ce и ⁹⁵Zr, ⁹⁵Nb [2]. Основными источниками этих радионуклидов явились ядерные испытания на поверхности земли и атмосферные ядерные испытания (1964–1981 годы) на ядерных объектах Лобнор в Китае. С тех пор люди, проживающие в этих населенных пунктах казахстанско-китайской границы, как полагают, подвергаются серьезному воздействию радиоактивных осадков [3, 4]. Такая ситуация побудила нас более детально изучить нынешнее положение уровней радиоактивного загрязнения и распространения долгоживущих радионуклидов после ядерных взрывов в районе казахстанско-китайской границы.

Следует отметить, что общее внешнее гамма излучение от основных дозообразующих взрывов (1966, 1967 и 1973 гг.) составляло 371 мГр, 334,6 мГр и 384 мГр для населения Маканчи, Урджара и Таскескена соответственно [4].

В предыдущем исследовании [2] уровни и распределение изотопов ¹³⁷Cs и Pu измерялись для более чем 100 образцов почвы по 46 пунктам, собранных вдоль дорог и некоторых населенных пунктов, связывающих Алматы с городом Семипалатинск вдоль Казахстанско-китайской границы. Базовый уровень радиоактивного загрязнения в этих районах важен, особенно в свете возможного неблагоприятного воздействия на здоровье человека.



Рисунок. Расположение Семипалатинского ядерного полигона, ядерного полигона Лобнор и поселения Маканчи, Урджар, Таскескен

В этом исследовании был применен метод ЭПР дозиметрии с целью оценки поглощенной дозы населения сел, расположенных вблизи границы с Китаем. Этот метод может ретроспективно определять дозы облучения в течении более 40 лет после события воздействия. ЭПР измеряет количество стабильных радикалов, создаваемых радиационным воздействием в зубной эмали.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В исследовании участвовали группа ученых из Казахстана, Японии и России. Целью этой работы является определение доз облучения, полученных населением сел вблизи казахстанско-китайской границы (в том числе Маканчи, Урджар и Таскескен, расположенных вблизи Китая) по ЭПР дозиметрии в образцах зубных эмалей, полученных из образцов зубов, собранных в этих населенных пунктах.

За последний период на основании медицинских указаний у взрослых жителей сел Маканчи, Урджар и Таскескен, расположенных на расстоянии от 100 до 200 км от казахстанско-китайской границы, были собраны 30 образцов зубов. 6 образцов зубов были отклонены из-за недостаточного количества эмали. 13 образцов зубов были молярами (положение от 6 до 8), 11 образцов зубов были премолярами (позиция 4–5), а 1 образец был резцом (позиция 2). Для резца использовалась только языковая часть. 8 образцов зубов были собраны в качестве контроля у

населения села Кокпекты (400 км к востоку от СИП), который не подвергался какому-либо радиоактивному загрязнению.

Эмаль была механически отделена от дентина с использованием твердосплавных зубных боров и алмазный резец. Дентин осторожно удаляли при помощи бормашины на низких оборотах, чтобы предотвратить нагрев образца, что может вызвать дополнительный ЭПР сигнал и существенно изменить форму сигнала [5, 6]. Эмаль была измельчена при помощи кусачек на гранулы диаметром 0,5–1,5 мм. Два образца были приготовлены из языковой и щечной частей каждого зуба.

Образцы для калибровки дозы были приготовлены из моляров, собранных в селе Кокпекты. Гранулы, полученные из разных зубов, смешали и разделили на аликвоты по 100 мг. Аликвоты облучали дозами 0, 100, 200, 300, 500 и 1000 мГр соответственно источником ^{60}Co в Университете Хиросимы, Япония [7, 8].

Измерения проводились в X-диапазоне на ЭПР-спектрометре JEOL JES-FA100 при стабилизированной комнатной температуре 21 °C. Спектрометр был оснащен цилиндрическим резонатором модель TE011 с высоким Q-фактором ES-UCX2. Параметры регистрации спектра были такими же, как и ранее опубликованные [9].

**ОЦЕНКА СТЕПЕНИ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИСПЫТАНИЙ НА ПОЛИГОНЕ ЛОБНОР (КИТАЙ)
НА НАСЕЛЕНИЕ РЕСПУБЛИКИ КАЗАХСТАН МЕТОДОМ ЭПР ДОЗИМЕТРИИ**

Таблица. Результаты определения дозы для населения Маканчи, Урджара и Таскескена

Код образца	Дата формирования эмали	Позиция зуба	Щечная сторона			Языковая сторона			D_{ex} (мГр)	r	Населенный пункт
			(мг)	D_{en} (мГр)	er	(мг)	D_{en} (мГр)	r			
57	1948	5	12,8	95	4	18,5	97	4	51	8	Маканчи
60	1941	5	2,7	84	7	2	98	8	40	7	Маканчи
61	1947	7	2	138	8	01,1	94	5	70	9	Маканчи
62	1942	5	5,2	145	5	6,5	139	6	92	0	Маканчи
63	1942	6	6,6	93	5	1	130	7	61	8	Маканчи
65	1947	4	0,3	114	6	2,6	105	1	63	8	Маканчи
66	1943	7	9,4	54	9	9,5	56	0	5	6	Маканчи
68	1947	5	16,5	106	5	1	112	8	63	8	Урджар
69	1943	7	44,3	57	6	34,3	71	5	14	6	Урджар
70	1946	8	16,5	58	7	0,2	81	5	22	26	Урджар
71	1942	4	4	115	6	8,3	233	5	124	3	Урджар
72	1947	7	36,7	83	3	1,6	67	5	28	7	Урджар
74	1944	7	4,6	141	9	1,4	10	5	92	0	Урджар
75	1943	6	1,6	37	0	5,1	28	0	-17	5	Урджар
76	1939	6	6,4	330	7	7,6	262	1	243	3	Урджар
117	1947	7	02,6	-26	6	3,4	23	3	-50	5	Таскескен
118	1947	8	01,3	106	3	00,2	118	6	63	8	Таскескен
119	1944	7	00,5	73	9	9,6	90	6	30	7	Таскескен
120	1944	5	0,7	44	5	7,5	55	0	-2	6	Таскескен
121	1944	4	0,4	0,8	6	8,1	-21	8	-61	5	Таскескен
122	1947	7	00,7	19	2	00,4	85	0	3	6	Таскескен
123	1948	4	4	88	6	3,5	92	6	42	7	Таскескен
124	1947	2	-	-	-	7,8	102	5	53	8	Таскескен
125	1945	4	00,9	138	5	1,5	51	4	44	7	Таскескен
126	1943	4	03,7	138	8	00,5	156	3	95	1	Таскескен

Специально разработанное компьютерное программное обеспечение [10] использовалось для извлечения радиационно-индуцированного сигнала (RIS) из полного ЭПР спектра и определения его интенсивности. Эта процедура способна определять полный спектр облученной эмали в RIS и фоновый сигнал (BGS), применяя нелинейный метод наименьших квадратов [11] модельного спектра к экспериментальному. Процедура обработки спектра применялась в режиме с описанием BGS двумя компонентами, состоящими из суперпозиции гауссовских производных функций. Для всех спектров использовалось окно шириной 3,0 мТл (левая граница окна составляет -1,0 мТл, а правая граница +2,0 мТл по отношению к максимальному значению BGS) [9, 12].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Дозы для жителей поселков Маканчи, Урджар и Таскескен были включены в этот отчет из анализа (см. таблицу). Экспериментально определенная доза считалась состоящей из двух вкладов: доза от естественного радиационного фона, накопленная в течение срока службы зубной эмали, и доза, полученная в результате ядерных испытаний (избыточная доза). Последняя составляющая вклада представляет инте-

рес для реконструкции настоящих доз. Сначала интенсивность RIS была преобразована в дозу, поглощенную эмалью D_{en} (выраженную в мГр) и откалиброванную с использованием калибровочных образцов гамма-источника ^{60}Co . Во-вторых, избыточная доза в эмали определялась вычитанием вклада естественного фонового излучения в течение существования эмали после его образования из поглощенной дозы в эмали.

Время формирования зубной эмали было получено путем вычитания среднего возраста формирования эмали для данной позиции зуба от возраста человека в момент измерения. Возраст формирования зубной эмали определялся согласно опубликованным данным [6].

Для жителей Маканчи поглощенные дозы определены в диапазоне от 55 ± 9 до 142 ± 5 мГр. Для жителей Урджара поглощенные дозы находились в диапазоне от 33 ± 10 до 296 ± 29 мГр, а для жителей Таскескена поглощенные дозы находятся в диапазоне от $-1,6 \pm 24$ до 147 ± 15 мГр. Поглощенные дозы в эмали получают как среднее значение языковых и щечных доз.

Для всех образцов избыточные дозы рассчитывались по формуле:

$$D_{ex} = D_{en} - TA \cdot D_b,$$

где: D_{en} – доза, рассчитанная по программе, в мГр; TA – возраст эмали зубов, лет; D_b – фоновая доза, 0,8 мГр/год [12–14]

Стандартное отклонение определения дозы (Er) определялась полуэмпирической формулой, аналогичной той, которая использовалась в предыдущей публикации [13]:

$$Er^2 = Er_1^2 + Er_2^2 + (Er_3 D_{en})^2,$$

где: $Er_1 = 25$ мГр – вклад, вызванный сигналами примесей в спектрах эмали и изменение формы линии BGS и неопределенность уровня смещения, полученного при калибровке; $Er_3 = 0,12$ – зависимый от дозы вклад, вызванный изменением чувствительности эмали и ошибкой в определении наклона калибровочной линии; D_{en} – экспериментальная доза, поглощенная эмалью, определяемая методом ЭПР. Er_2 – вклад, вызванный главным образом шумами в спектрах и неустойчивостью спектрометра. Этот параметр изменяется для разных образцов и увеличивается при уменьшении массы образца. В этой работе он определяется по ошибке определения амплитуды RIS при обработке спектров путем преобразования в единицы дозы по наклону калибровочной линии [13].

Зависимость этого параметра от массы образца описывается следующим уравнением:

$$Er_2 = Er_{2m} / (m/100),$$

где: $Er_{2m} = 20$ мГр; $m/100$ – масса образца (в мг), нормированная на 100 мг [11].

Показаны индивидуальные определения избыточной дозы для разных лет образования эмали. Увеличенная доза была определена для одного образца, сформированного до 1949 года, соответствующего периоду ядерного испытания, повлекшее за собой наибольшее радиоактивное загрязнение территории. Средняя избыточная доза для эмали, образовавшаяся до 1949 года для Маканчи, составляет 54 ± 28 мГр. Для Урджара избыточная доза до 1949 года состав-

ляет 71 ± 30 . Для Таскескена избыточная доза до 1949 года составляет 22 ± 27 . Основная масса избыточных доз находится вблизи *порога чувствительности метода* [12–13].

Для контрольных образцов избыточные дозы составляют от -66 ± 39 до 24 ± 39 мГр, для Маканчи от 5 ± 26 до 92 ± 30 мГр, для Урджара от -17 ± 25 до 243 ± 43 , для Таскескена от -61 ± 25 до 95 ± 31 мГр. Были найдены низкие дозы для группы с эмалью, сформированной до 1949 года, в день первого ядерного испытания. Значения дозы для группы, имеющей эмаль, сформированную до 1949 года, согласуются с оценками, основанными на официальных зарегистрированных данных, свидетельствующих о высоких уровнях осадков в период 1949–1962 годов. Эта оценка дозы – это оценка только дозы внешнего излучения. Согласно этому исследованию, население Маканчи, Урджара и Таскескена не было подвержено сильному воздействию китайского полигона или Семипалатинского испытательного полигона, но некоторые результаты согласуются с архивными данными.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведены ЭПР дозиметрические исследования населения юго-восточной части Восточно-Казахстанской области. Большинство результатов этого исследования близки к результатам, полученным для контрольного района села Кокпекты. Несколько доз оказались выше, но для окончательного вывода о влиянии ядерных испытаний на Лобноре на население данного региона вблизи китайской границы необходимо провести дополнительное исследование.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность за финансовую поддержку из средств Министерства образования и науки Республики Казахстан (на 2018–2020 гг. по грантовому финансированию субъектов научной и/или научно-технической деятельности по проекту ИРН AP05135470).

ЛИТЕРАТУРА

1. Н. Vanmarcke, Приложение С: Обнародование общественности от техногенных источников излучения. UNSCEAR 2000: Источники ионизирующей радиации, стр. 158-291 (2000).
2. М. Ямамото, М. Хоши, Дж. Такада, А. Сакагучи, К. Н. Апсаликов, Б. И. Гусев, Текущие уровни и распределение изотопов ^{137}Cs и Pu в почве на казахстанской территории казахстанско-китайской границы: детонация ядерных испытаний Семипалатинска и Лоб-Нор. Журнал радиоаналитической и ядерной химии. 261, № 3, 533-545 (2004).
3. Гусев В. И. Оценка доз внешнего облучения населения на территориях Маканчи и Урджарских районов Семипалатинского региона, сформированных за счет ядерных испытаний Китая, «Переходный отчет» (Архивы Казахского научно-исследовательского института радиационной медицины и экологии). Семипалатинск, (1990).
4. Гусев И. И., Куракина Н. Н., Х. Х. Секербасов, Смертность от рака в популяциях в Казахстане, подвергнутых облучению от испытаний ядерного оружия в Китае. Технический отчет, DTRA 01-03-D-0022. ITT Corporation Advanced Engineering & Science 2560 Хантингтон-авеню Александрия, VA 22303-1410 (2008).
5. К. Жумадилов, В. Степаненко, А. Иванников, З. Жумадилов, Д. Жарлыганова, С. Тойода, К. Танака, С. Эндо и М. Хоши, Измерение поглощенных доз от рентгеновских проверок багажа до зуба эмали с помощью ЭПР и стеклянной дозиметрии. Radiat. Environ. Biophys. 47, 541-545 (2008).

6. Доклад МАГАТЭ. Использование электронной парамагнитной резонансной дозиметрии с зубной эмалью для оценки ретроспективной дозы. Отчет о скоординированном исследовательском проекте. МАГАТЭ-TECDOC-1331. Вена (2002 год).
7. И. Иванников, В. Г. Скворцов, В. Ф. Степаненко, Д. Д. Тикунов, И. М. Федосов, А. А. Романюха, А. Визер, широкомасштабная ретроспективная дозиметрия ЭПР: результаты и проблемы. Radiat. Prot. Досым. 71, 175-180 (1997).
8. М. Икеа, Новые применения электронной спин-резонансной датировки, дозиметрии и микроскопии. World Scientific, Сингапур (1993 год).
9. К. Жумадилов, А. И. Иванников, В. Г. Скворцов, Ж. С. Жумадилов, С. Эндо, К. Танака и М. Хоши, дозировка ЭПР зубной эмали: выбор оптимальных параметров регистрации спектров и влияние массы образца на чувствительность. J. Radiat. Res. 46 (4), 435-442 (2005).
10. А. Иванников, Ф. Тромпир, Э. Гайяр-Лекану, В. Г. Скворцов, В. Ф. Степаненко, Оптимизация условий записи для электронного парамагнитного резонансного сигнала, используемого в стоматологической эмали дозиметрии. Radiat. Prot. Досым. 100, 531-538 (2002).
11. И. Иванников, В. Г. Скворцов, В. Ф. Степаненко, Д. Д. Тикунов, Я. Такада, М. Хоши, ЭПР-зубная эмаль-дозиметрия: Оптимизация процедуры деконволюции автоматического спектров. Здоровье. 81 (2), 124-137 (2001).
12. А. Иванников, К. Жумадилов, Э. Тилевухан, Л. Цзяо, Д. Жарлыганова, К. Н. Апсаликов, Г. Берекенова, Ж. Жумадилов, С. Тойода и М. Хоши, Результаты дозиметрии ЭПР для популяции вблизи наиболее загрязняющего радиоактивного следствия после первого ядерного испытания на Семипалатинском испытательном полигоне. J. Radiat. Res. 47, A39-A46 (2006).
13. К. Жумадилов, А. Иванников, К. Н. Апсаликов, Ж. Жумадилов, С. Тойода, Д. Жарлыганова, Э. Теливуэнан, С. Эндо, К. Танака и М. Хоши. Оценка дозы облучения эмиссией эритромиической эмали ЭПР для жителей Долона и Бодена. J. Radiat. Res. 47, A47-A53 (2006).
14. И. Иванников, Ж. Жумадилов, Б. И. Гусев, гл. Миядзава, Л. Цзяо, В. Г. Скворцов, В. Ф. Степаненко, Я. Такада и М. Хоши, Индивидуальная реконструкция дозы среди жителей, проживающих в районе Семипалатинского ядерного полигона, с использованием ЭПР-спектроскопии зубной эмали. Здоровье. 83 (2), 183-196 (2002).

**КАЗАҚСТАН РЕСПУБЛИКАСЫ ТҰРҒЫНДАРЫНА ЛОБНОР ПОЛИГОНЫНДА (ҚЫТАЙ)
ЖҰРГІЗІЛГЕН СЫНАҚТАР ӘСЕРІНІҢ ДӘРЕЖЕСІН ЭПР ДОЗИМЕТРИЯ ӘДІСІМЕН БАҒАЛАУ**

¹⁾ К.Ш. Жумадилов, ²⁾ А.И. Иванников, ³⁾ В.Ф. Степаненко, ³⁾ М. Хоши

¹⁾ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²⁾ А.Ф. Цыба атындағы МРФО – Ресей денсаулық сақтау министрлігі «ҰМРЗО» ФМБМ филиалы, Обнинск, Ресей

³⁾ Хиросима университеті, Хиросима, Жапония

Мақалада Лобнор қытай ядролық полигонында жүргізілген сынақтардың Қытай-Қазақстан шекарасына жақын орналасқан Үржар, Мақаншы және Таскескен ауылдары тұрғындарына әсерін осы ауылда тұратын адамдардың тіс эмалі бойынша (ЭПР дозиметрия әдісімен) бағалау қорытындылары келтірілген.

**EVALUATION OF THE IMPACT OF TESTS AT THE LOBNOR TEST SITE (CHINA) ON THE
POPULATION OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN USING THE EPR DOSIMETRY METHOD**

¹⁾ K.Sh. Zhumadilov, ²⁾ A.I. Ivannikov, ²⁾ V.F. Stepanenko, ³⁾ M. Hoshi

¹⁾ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²⁾ MRRC named after A.F. Tsyb - a branch of the FSBI «NMRCR» of the Ministry of Health, Obninsk, Russia

³⁾ University of Hiroshima, Hiroshima, Japan

The article presents the results of evaluation of the impact of tests on the Lobnor Chinese nuclear test site on the population of Urdzhar, Makanchi and Taskesken, located near the China-Kazakhstan border on human enamel (by EPR dosimetry) living in these villages.

УДК 543.429.22

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФОНОВЫХ ДОЗ, ПОЛУЧЕННЫХ ЭПР МЕТОДОМ ПО ЗУБНОЙ ЭМАЛИ ЖИТЕЛЕЙ ГОРОДОВ СТЕПНОГОРСК И СЕМИПАЛАТИНСК

¹⁾ Оразалина И.С., ¹⁾ Абышев Б.К., ²⁾ Иванников А.И., ¹⁾ Жумадилов К.Ш.

¹⁾ Евразийский Национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²⁾ МРНЦ им. А.Ф. Цыба – филиал ФГБУ «НМИРЦ» Минздрава России, Обнинск, Россия

На основе сравнений данных фоновых доз зубных эмалей жителей двух городов с помощью программы GraphPad Prism был сделан t-test (сравнительный анализ). Ранее полученные результаты собранных 20 коренных зубов жителей города Семипалатинск показали, что влияние ядерных испытаний является основной причиной радиационного воздействия, также было собрано 27 коренных зубов жителей города Степногорск, подвергшихся радиоактивному воздействию урано-перерабатывающего предприятия.

ВВЕДЕНИЕ

Экспериментальное определение дозы облучения электронно-парамагнитным резонансом по зубной эмали (ЭПР дозиметрия) является очень важным инструментом для реконструкции дозы при радиационных авариях. Известно, что спектр облученной зубной эмали состоит из двух компонентов: фоновый сигнал (ФС) и радиационно-индуцированный сигнал (РИС), которые перекрывают друг друга. Интенсивность РИС зависит от дозы, поглощенной эмалью, и используется для реконструкции дозы. В области низких доз (менее 0,5 Гр), что представляет интерес для радиационной эпидемиологии) точность определения дозы с использованием метода дозиметрии ЭПР существенно зависит от качества спектров ЭПР, который определяется чувствительностью спектрометра, массой образца и параметры регистрации спектра, такие как мощность СВЧ, амплитуда модуляции, время накопления и другие. В то же время точность зависит от процедуры обработки спектров, которая используется для определения интенсивности РИС. Поэтому качество спектров должно оцениваться по критерию того, что он должен обеспечивать максимальную точность определения дозы относительно того, что используется некоторая процедура обработки спектров [1–5].

Был использован метод ЭПР спектроскопии эмали зубов при проведении обследования населения г. Степногорск Акмолинской области, а также г. Семипалатинск Восточно Казахстанской области, подвергшихся радиоактивному излучению, тем самым оценив фоновую дозу. Полученные результаты были почти одинаковы, однако для исхода точных показателей решили сделать сравнительный анализ, что является основной задачей данной работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Измерения спектров ЭПР проводились при стабилизированной комнатной температуре 21 °С с помощью спектрометра ЭПР JEOL JES-FA100, работающего в X-диапазоне, и снабженного цилиндрической резонаторной решеткой ES-UCX2 с высоким качеством (Q-factor) режима TE 011. Согласно показаниям спектрометра, пустая полость имеет коэффи-

циент $Q = 7440$ и изменяется на 6000–7436 при загрузке пробоотборной трубки и образца эмали. Использовались следующие условия и параметры записи спектров: амплитуда модуляции 0,3 мТл, частота модуляции 100 кГц, постоянная времени приемника 30 мс, время развертки 30 с, ширина развертки 10 мТл. Если не указано иное, амплитуда приемника была установлена 1000, мощность микроволн, подаваемая в полость, составляла 2 мВт, число спектральных сканов составляло 40, что соответствовало времени накопления спектров 20 мин. При оптимизации условий записи использовались различные настройки мощности СВЧ и времени накопления [6–9].

Экспериментальные данные по ВКО показали, что минимальные и максимальные дозы были 16 ± 36 и 65 ± 24 мГр, соответственно. Результаты для среднего и медиана поглощенной дозы для общего количества образцов $34 \pm 3,9$ и $32,9$ мГр, соответственно. Средний возраст зубной эмали составляет 39 лет. Было обнаружено что средние дозы для различных участков отбора проб не было существенно ($P = 0,57$); это говорит о том, что естественной радиоактивности в экспериментальных районах относительно однородным [10–12].

Из данных 27 собранных зубов жителей Степногорска было определено, что средний возраст зубной эмали составляет 58 лет, среди них которые 54 % женщин и 46 % мужчин. Среднее значение дозы было 66 ± 26 мГр по образцам с зубной эмалью, сформированной до 1961 г. Минимальная оценка дозы составило 11 ± 29 мГр [13–16].

Сложив результаты фоновых доз двух областей, получаем график сравнительного анализа (см. рисунок).

Из сравнения на рисунке видно, что средняя значимость фоновой дозы Семипалатинска, которая равна 71 мГр, превышает результат Степногорска, со средней фоновой дозой 34,73 мГр. Но максимальная доза для Степногорска, равная 279 мГр, сравнительно больше максимальной фоновой дозы для Семипалатинска, равной 153,3 мГр.

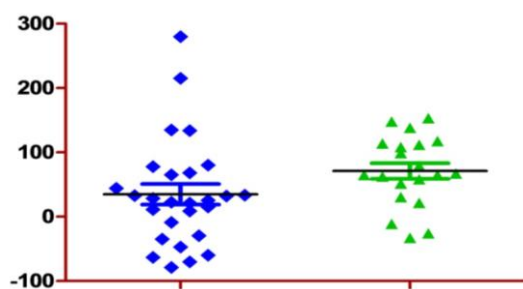


Рисунок. График сравнительного анализа фоновых доз по эмали зубов жителей Степногорска (♦) и Семипалатинска (▲)

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

При помощи Graphpad, на сайте мы сделали online-test. Вбили значения по городам Степногорск и Семипалатинск, и вывели общий сравнительный результат.

Значение P и статистическая значимость:

P- вероятность = 0,0291

Доверительный интервал:

– среднее колонки = 0,0072

– 95 % доверительный интервал этой разницы: от –74,24 до –4,449

Промежуточные значения, используемые в расчетах:

– $t = 2,360$

– $df = 19$

Стандартная ошибка разности = 0,5384

Таблица 1. Сравнительный анализ одиночных спектров

	Степногорск	Семипалатинск
N	27	20
Minimum	-78,80	-32,70
25 % percentile	-29,50	35,70
Median	25,40	66,00
75 % percentile	68,30	113,4
Maximum	279	153,3
Mean	34,73	71,00
SD	83,34	54,66
SEM	16,04	12,22

ЛИТЕРАТУРА

1. IAEA Report. Use of electron paramagnetic resonance dosimetry with tooth enamel for retrospective dose assessment. Report of a coordinated research project / IAEA-TECDOC-1331. Vienna. – 2002.
2. Tielewuhun E., Ivannikov A., Zhumadilov K., Nalapko M., Tikunov D., Skvortsov V., Stepanenko V., Toyoda Sh., Tanaka K., Endo S., Hoshi M. Spectra processing at tooth enamel dosimetry: analytical description of EPR spectrum at different microwave power / Radiat. Meas. – 2006. – 41. – P. 410–417.
3. Deliglasow V.I., Gorin V.V., Maltzev A.L., Matusehnko A.M., Safonov F.F. and Smagulov S.G. Radiological situation at Semipalatinsk test site bordering regions of the Kazakh SSR / Bulletin of the Public information center by atomic Energy (CNII atominform). Moscow. Russia. – 1991. – 4. – P. 46–52.
4. Zhumadilov K., Stepanenko V., Ivannikov A., Zhumadilov Z., Toyoda S., Tanaka K., Endo S. and Hoshi M. Measurement of absorbed doses from X-ray baggage examinations to tooth enamel by means of ESR and glass dosimetry / Radiat. Environ. Biophys. – 2008. – 47. – P. 541–545.
5. Stepanenko V.F., Hoshi M., Dubasov Yu.V., Sakaguchi A., Yamamoto M., Orlov M., Bailiff I.K., Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Kryukova I.G., Zhumadilov K.S., Apsalikov K.N., Gusev B.I. A gradient of radioactive contamination in Dolon village near SNTS and comparison of computed dose values with instrumental estimates for the 29 August, 1949 nuclear test / J. Radiat. Res. – 2006. – 47. – P. A149–A158.
6. Dubasov U.V., Matuschenko A.M., Filonov N.P. Semipalatinsk Test Site: estimation of radiological consequences / Bulletin of the Public information center by atomic Energy (CNII Atominform). Special issue. Moscow. Russia. – 1993.

Таблица 2. Сравнительный анализ среднего по трем спектрам

Колонка В	Семипалатинск
против	
Колонки А	Степногорска
Значение P t, df	0,0974 t = 1,693 ; df = 45
насколько велика разница?	
Среднее значение + -SAM колонки А	34,73±16,04 N=27
Среднее значение + -SAM колонки В	71,00±12,22 N=20
95 % доверительный интервал	-79,46 до 6,920

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были исследованы фоновые дозы ЭПР методом по зубной эмали жителей городов Степногорск и Семипалатинск. Ранее готовые результаты были использованы для проведения сравнительного анализа с помощью программы GraphPad, где был сделан t-test, в ходе которого был построен ряд зависимостей, которые показали насколько велика разница фоновых доз двух областей. Из этих сравнений нам стало известно, что по средней значимости жители Семипалатинска больше подвержены фоновому облучению, несмотря на то, что максимальная доза для Степногорска намного больше. Возможно, что такой результат обусловлен ядерными испытаниями на Семипалатинском полигоне.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Авторы статьи выражают искреннюю благодарность за финансовую поддержку из средств Министерства образования и науки Республики Казахстан (на 2018–2020 гг. по грантовому финансированию субъектов научной и/или научно-технической деятельности по проекту ИРН AP05135470).

7. Artemev O.I., Akhmetov M.A., Larin V.N., Pitskaya L.D., Zhumadilov K.S., Silkina G.P., Subbotin S.B., Radiation survey and radionuclide analysis of radioactive plumes from the former Semipalatinsk nuclear test site / Conference: NATO Advanced Research Workshop on Nuclear Physical Methods in Radioecological Investigations of Nuclear Test Sites. Place: Almaty, Kazakhstan, June 07–10, 1999. Nuclear physical methods in radioecological investigations of nuclear test sites. NATO advanced science institute series, sub-series: Disarmament technologies. – 2000. – 31. – P. 127–143.
8. Ivannikov A.I., Trompier F., Gaillard–Lecanu E., Skvortsov V.G. and Stepanenko V.F. Optimization of recording conditions for the electron paramagnetic resonance signal used in dental enamel dosimetry / Radiat. Prot. Dosim. – 2002. – 100. – P. 531–538.
9. Zhumadilov K., Ivannikov A., Apsalnikov K., Zhumadilov Zh., Stepanenko V., Skvortsov V., Berekenova G., Toyoda S., Endo S., Tanaka K., Miyazawa C. and Hoshi M. Results of tooth enamel EPR dosimetry for population living in the vicinity of the Semipalatinsk nuclear test site / Radiat. Meas. – 2007. – 42. – P. 1049–1052.
10. Zhumadilov K., Ivannikov A., Zhumadilov Z., Stepanenko V., Apsalnikov K., Rodzi M., Zhumadilova A., Toyoda S., Endo S., Tanaka K., Okamoto T. and Hoshi M. ESR dosimetry study on population of settlements nearby Ust–Kamenogorsk city, Kazakhstan / Radiat. Environ. Biophys. – 2009. – 48. – P. 419–425.
11. Zhumadilov K., Ivannikov A., Stepanenko V., Toyoda S., Zhumadilov Z. and Hoshi M. ESR dosimetry study of population in the vicinity of the Semipalatinsk Nuclear Test Site / J. Radiat. Res. – 2013. – 54. – P. 775–779.
12. Stepanenko V.F., Hoshi A., Ivannikov A.I., Bailiff I.K., Zhumadilov K., Skvortsov V.G., Argembaeva R., Tsyb A.F. The 1st Nuclear Test in the former USSR of 29 August, 1949: comparison of individual dose estimates by modeling with EPR retrospective dosimetry and luminescence retrospective dosimetry data for Dolon village, Kazakhstan / Radiat. Meas. – 2007. – 42. – P. 1041–1048.
13. Ivannikov A., Zhumadilov K., Tieliewuhan E., Jiao L., Apsalnikov K.N., Berekenova G., Zhumadilov Zh., Toyoda Sh., Miyazawa C., Skvortsov V., Stepanenko V., Endo S., Tanaka K. and Hoshi M. Results of EPR dosimetry for population in the vicinity of the most contaminating radioactive fallout trace after the first nuclear test in the Semipalatinsk Test Site / J. Radiat. Res. – 2006. – 47. – P. A39–A46.
14. Zhumadilov K., Ivannikov A., Apsalnikov K.N., Zhumadilov Zh., Toyoda Sh., Tieliewuhan E., Endo S., Tanaka K., Miyazawa C., Okamoto T. and Hoshi M. Radiation dose estimation by tooth enamel EPR dosimetry for residents of Dolon and Bodene / J. Radiat. Res. – 2006. – 47. – P. A47–A53.
15. Ivannikov A.I., Sanin D., Nalapko M., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Tsyb A.F., Trompier F., Zhumadilov K., and Hoshi M. Dental enamel EPR dosimetry: comparative testing of the spectra processing methods for determination of Radiation induced–signal amplitude. / Health Phys. – 2010. – 98. – P. 345–351.
16. Ivannikov A.I., Skvortsov V.G., Stepanenko V.F., Zhumadilov K.Sh. Comparative analysis between radiation doses obtained by epr dosimetry using tooth enamel and established analytical methods for the population of radioactively contaminated territories / Radiat. Prot. Dosim. – 2014. – 159. – P. 125–129.

СТЕПНОГОРСК ЖӘНЕ СЕМЕЙ ҚАЛАЛАРЫ ТҰРҒЫНДАРЫНЫҢ ТІС ЭМАЛІ БОЙЫНША ЭПР ӘДІСІМЕН АЛЫНҒАН ФОНДЫҚ ДОЗАЛАРДЫҢ САЛЫСТЫРМАЛЫ ТАЛДАУЫ

¹⁾ И.С. Оразалина, ¹⁾ Б.К. Абышев, ²⁾ А.И. Иванников, ¹⁾ К.Ш. Жумадилов

¹⁾ Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия Ұлттық Университеті, Астана, Қазақстан

²⁾ А.Ф. Цыба атындағы МРФО – Ресей денсаулық сақтау министрлігі «ҰМРЗО» ФМБМ филиалы, Обнинск, Ресей

GraphPad Prism бағдарламасы көмегімен екі қала тұрғындарының тіс эмалі бойынша салыстырмалы талдау негізінде t-test жасалды. Семей қаласы бойынша жиналған 20 тістердің алдын ала алынған нәтижелері ядролық сынақтардың әсері радиациялық қауіп төнуінің бірден бір себебі екендігін көрсетсе, Степногорск қаласы тұрғындары арасынан жиналған 27 тістің нәтижесі бойынша, олар уран өндіргіш өндірістік шаруашылықтардың есебінен радиациялық қауіпке ұшыраған.

COMPARATIVE ANALYSIS OF BACKGROUND DOSES OBTAINED BY EPR METHOD BY TOOTH ENAMEL OF RESIDENTS OF STEPNOGORSK AND SEMIPALATINSK

¹⁾ I.S. Orazalina, ¹⁾ B.K. Aбышев, ²⁾ A.I. Ivannikov, ¹⁾ K.Sh. Zhumadilov

¹⁾ L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²⁾ MRRC named after A.F. Tsyba – a branch of the FSBI «NMRCR» of the Ministry of Health, Obninsk, Russia

Based on comparisons of background doses of dental enamel in residents of two cities using the GraphPad Prism program, t-test was done (comparative analysis). Earlier results of collected 20 molars of Semipalatinsk residents showed that the influence of nuclear tests is the main cause of radiation exposure, and 27 molars of residents of Stepnogorsk were exposed to the radioactive effect of a uranium processing plant.

УДК 621.039.531

ИЗМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОСОПРОТИВЛЕНИЯ И НАМАГНИЧЕННОСТИ НЕОБЛУЧЕННОЙ И ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ СТАЛИ X18H9 В ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМАЦИИ И ОТЖИГОВ

^{1,2)} Максимкин О.П., ¹⁾ Нұрғали Е.Е.

¹⁾ Институт ядерной физики, Алматы, Казахстан

²⁾ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Приведены и обсуждаются результаты экспериментов по изучению деформационного и термического изменений электромагнитных свойств аустенитной стали X18H9, подвергнутой нейтронному облучению в ядерном реакторе ВВР-К. Особенное внимание уделено прямому и обратному фазовому мартенситному превращению. Обнаружен эффект дополнительного прироста количества ферромагнитной α -фазы при отжиге ($\sim 450^\circ\text{C}$) облученной, деформированной при отрицательных температурах (-20 и -60°C) реакторной стали.

ВВЕДЕНИЕ

С развитием ядерной энергетики все более актуальным становится вопрос о масштабах деградации структуры и свойств материалов, используемых в ответственных элементах деталей энергетических установок, от которых напрямую зависит их срок эксплуатации.

В настоящее время в качестве конструкционных материалов для быстрых ядерных реакторов широко применяются коррозионностойкие стали аустенитного класса, которые в процессе их эксплуатации в ядерно-энергетических установках подвергаются нейтронному облучению, а также воздействию больших градиентов температур, внешних и внутренних напряжений. В результате работы в экстремальных условиях в кристаллической решетке накапливаются дефекты, что приводит к значительным изменениям микроструктуры и проявлению таких эффектов как радиационные ползучесть и распухание, уменьшение пластичности и повышение температуры хрупко-вязкого перехода, понижение сопротивления общей и язвенной коррозии, которые негативно сказываются на физико-механических свойствах. Все эти факторы необходимо учитывать при расчете времени эксплуатации внутриреакторной конструкции и служебных характеристик тепловыделяющих сборок (ТВС).

Одним из важнейших обстоятельств, который необходимо иметь ввиду при выборе реакторных материалов, является то, что аустенитные стали (γ -фаза, ГЦК-решетка), как правило, метастабильны и под интенсивным внешним воздействием (деформация, облучение) они претерпевают фазовое превращение с образованием ферритной (мартенситной) α -фазы (ОЦК-решетка). Для изучения особенностей процессов фазово-структурных изменений проведены многочисленные комплексные исследования влияния химического состава, температуры скорости и способов деформации, вида и флюенса облучения на количество и интенсивность накопления α -фазы [1], а также ее поведения в процессе деформации и отжига [2, 3]. Тем не менее, до сих пор нет общепринятых представлений о закономерностях

изменений таких физических величин как электросопротивление и намагниченность облученных аустенитных сталей в процессах деформации и постдеформационных отжигов.

Цель настоящей работы: Изучить влияние нейтронного облучения и пластической деформации при низких температурах на фазовые $\gamma \leftrightarrow \alpha$ превращения, выявить закономерности изменения количества мартенситной α -фазы и величины электросопротивления в процессе постдеформационных отжигов аустенитной коррозионно-стойкой стали.

ИССЛЕДУЕМЫЙ МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Для проведения экспериментов использовали плоские образцы из хромоникелевой аустенитной нержавеющей стали X18H9, химический состав которой дан в таблице 1.

Таблица 1. Химический состав стали X18H9

Fe	Ni	Mn	C	Ti	Cr	P	Si	S
Основа	10,66	1,67	0,12	0,5	17,0	0,032	0,8	0,0032

Образцы вырубались на штампе из прокатанных стальных пластин толщиной 0,35 мм, что позволило подготовить их с одинаковой геометрией рабочей части (рисунок 1). На головки образцов при помощи точечной сварки были закреплены пластины из той же стали во избежание их деформации или разрыва во время растяжения. В головках высверливали отверстия для установки в захватах разрывной машины.

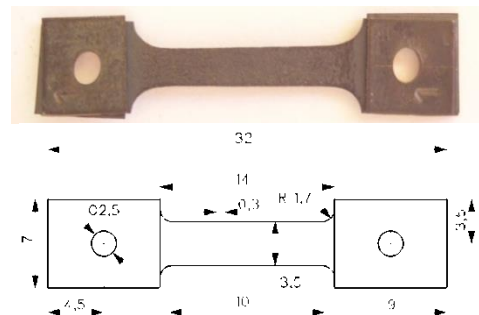


Рисунок 1. Форма и размеры образцов

После штамповки образцы подвергали аустенизирующему отжигу при температуре 1050 °С в течение 30 мин в отжиговой электрической печи «СЮЛ-044 2М2».

Часть подготовленных таким образом образцов облучали в водонаполненных экспериментальных каналах ядерного реактора ВВР-К до флюенса $1,9 \cdot 10^{19}$ н/см², при температуре, не превышавшей 80 К.

Механические испытания на одноосное растяжение осуществляли на универсальной испытательной машине «INSTRON-1195» при комнатной и отрицательных температурах со скоростью 0,5 мм/мин. Для проведения испытаний при температурах –20 и –60 °С была разработана специальная низкотемпературная камера [4]. Охлаждение и поддержание необходимой температуры осуществлялось при помощи автоматической контролируемой подачи в камеру жидкого азота.

Измерение геометрических размеров необлученных и радиоактивных образцов до и после деформации выполняли при помощи электронного микрометра «SONY LY-101».

Определение количества ферромагнитной α-фазы, образовавшейся в парамагнитной стали в процессе деформации, осуществлялось феррозондом «FERITSCOPE MP30» в приборных, относительных единицах. Пересчет значений α-фазы из относительных единиц в объемное процентное содержание (M_f) производился с помощью программы «Alpher», разработанной с использованием калибровочных эталонов.

Величины удельного электросопротивления стальных образцов после деформации и отжигов измеряли по методу амперметра-вольтметра.

Образцы подвергали пошаговой (~2 %) деформации с измерением величин электросопротивления и ферромагнитной фазы на каждом этапе растяжения при температурах +20, –20, –60 °С. Так как удельное сопротивление очень чувствительно к изменению площади поперечного сечения, растяжение образца производилась только до определенной степени деформации ($\epsilon_{\text{равн}}$), предвещающей появление локализованной деформации (шейки).

Для оценки величины уменьшения размеров поперечного сечения в ходе испытаний использовали уравнение:

$$\psi = \frac{S_0 - S_i}{S_0},$$

где S_0 – первоначальная площадь поперечного сечения образца, S_i – площадь сечения после деформации.

Величины локальных деформаций (ϵ) и напряжений (σ) рассчитывались по формулам:

$$\epsilon = \frac{\psi_i}{1 - \psi_i} \quad \sigma = \frac{P_i}{S_i}$$

Наряду с характеристиками прочности ($\sigma_{0,2}, \sigma_b$) и пластичности ($\epsilon_{\text{равн}}$) из диаграмм растяжения определяли величины критических напряжений ($\sigma_{\text{кр}}$) и деформаций ($\epsilon_{\text{кр}}$), соответствующих началу $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода, а также значения плотности механической работы ($A = \frac{1}{V} \int \sigma d\epsilon$), необходимой для растяжения до предела прочности (σ_b).

После деформации образцы подвергали термическим отжигам (30 мин) при температурах от 200 °С до 800 °С с шагом 50 °С. На каждом этапе отжига проводилось измерение удельного сопротивления образцов и содержания в них мартенситной α-фазы.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты механических испытаний

На рисунке 2 приведены машинные диаграммы растяжения, для облученных нейтронами ($1,9 \cdot 10^{19}$ н/см²) и необлученных стальных образцов, деформируемых при низких температурах.

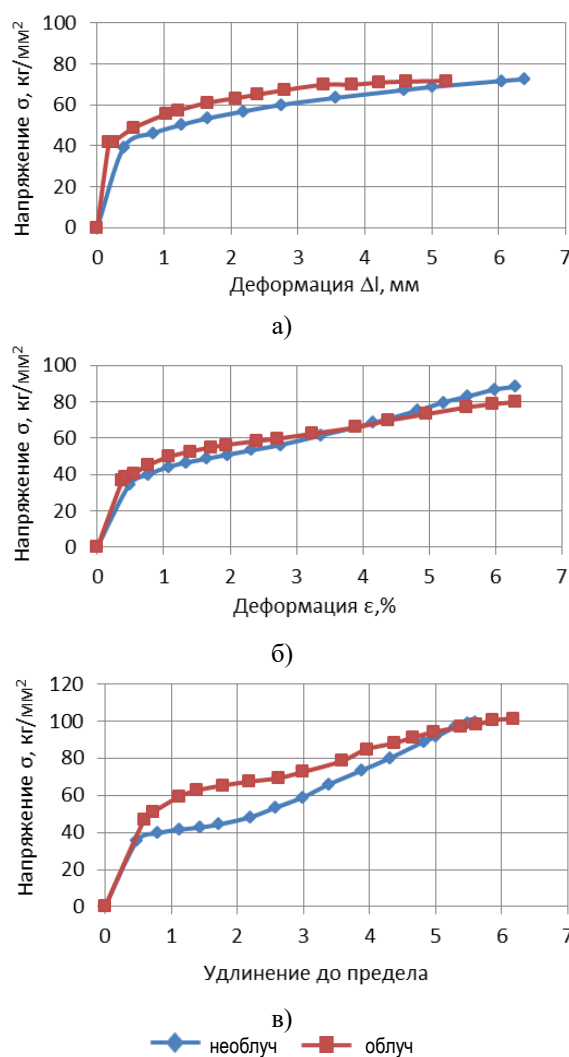


Рисунок 2. Диаграммы растяжения при температурах: (а) 20 °С, (б) –20 °С, (в) –60 °С необлученных и облученных нейтронами образцов стали X18H9

В результате обработки экспериментальных кривых найдены механические и энергетические характеристики, которые приведены в таблице 2.

Из таблицы 2 видно, что с понижением температуры испытания в значительной степени увеличивается предел текучести стали, но при этом уменьшается пластичность. Облучение нейтронами привело к дополнительному росту $\sigma_{0,2}$, а также к уменьшению значений плотности механической работы.

Начало образования макролокализации для облученных образцов происходит при степени деформации 27–33 %, а для необлученных образцов только при 45–50 %. При этом объемное содержание α -фазы, индуцированной деформацией, к моменту достижения конца растяжения практически одинаково для обоих образцов. В то же время из таблицы 2 следует, что с понижением температуры испытаний облучение нейтронами играет все меньшую роль в процессе начала образования шейки и все больше возрастает роль холодной деформации.

Деформационно-температурные изменения электросопротивления и намагниченности стальных образцов до и после облучения

На рисунке 3 приведены экспериментальные кривые изменения удельного электросопротивления (ρ) и количества ферромагнитной фазы в зависимости от степени деформации образцов стали X18H9 при комнатной температуре.

Видно, что на кривых $\rho=f(\epsilon)$ в самом начале деформации как необлученного, так и облученного нейтронами образцов наблюдается пик, который по данным магнитометрии совпадает с началом образования феррофазы.

Видно также, что образование α -мартенсита в облученном образце начинается несколько раньше и происходит более активно, чем в необлученном.

Необходимо также отметить, что для необлученной стали, также как и для облученной, наблюдались три характерных этапа изменения ρ – область пика, соответствующего началу мартенситного превращения, и два участка выхода ρ на насыщение: при деформациях 15–20 и 25–30 %.

Таблица 2. Механические и энергетические характеристики стали X18H9 в необлученном аустенизированном (1050 °C, 30 мин) и облученном нейтронами состояниях при различных температурах испытания

Флюенс н/см ²	Температура испытания, °C	$\sigma_{0,2}$, МПа	ϵ критич. ист, %	$\sigma_{T \rightarrow \alpha}$ критич. ист, %	σ_b , МПа	ϵ равн, %	A, МДж/м ³	M _T на σ_b , %
Необлученная	20	220	18	610	690	87	320	18
	-20	340	8	500	900	71	—	52
	-60	350	0,2	350	980	52	248	67
1,9·10 ¹⁹	20	420	18	610	700	64	293	21
	-20	440	4	580	800	62	—	50
	-60	510	0,2	510	990	56	268	60

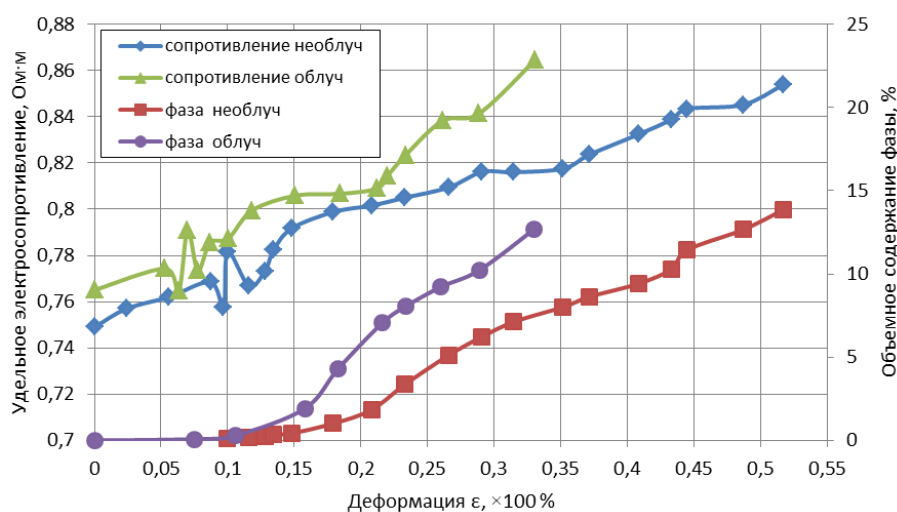


Рисунок 3. Графики изменения электросопротивления и кривые образования α -фазы в зависимости от степени деформации при температуре 20 °C

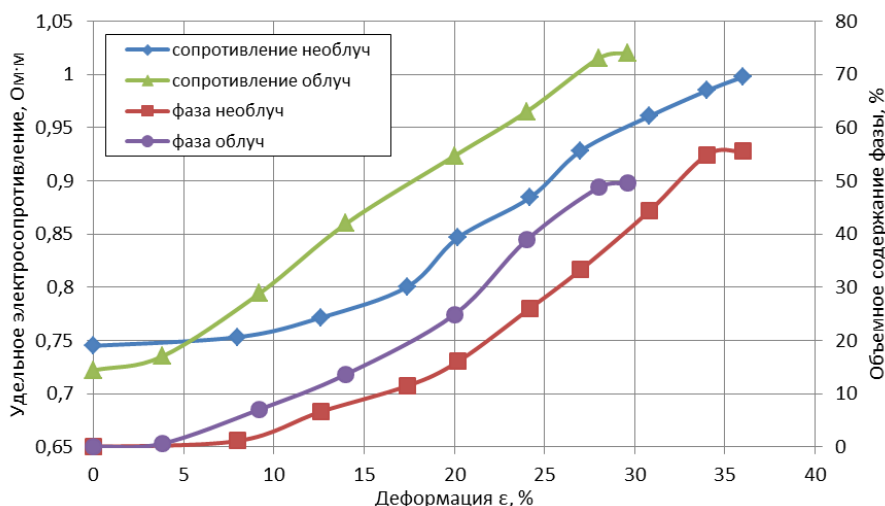


Рисунок 4. График зависимости изменения электросопротивления и образования α -фазы в зависимости от степени деформации при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

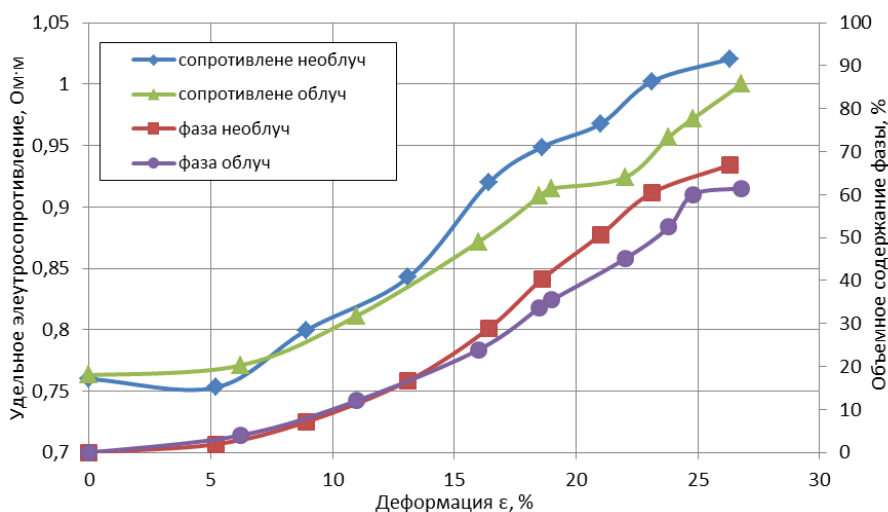


Рисунок 5. График зависимости изменения электросопротивления и образования α -фазы в зависимости от степени деформации при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$

На основании анализа закономерностей прироста удельного электросопротивления стали в процессе испытания можно предположить, что образующаяся в результате деформации магнитная α -фаза и дефекты кристаллической решетки препятствуют свободному движению электрических зарядов.

На рисунке 4 приведен график зависимости изменения электросопротивления и намагниченности стали от степени деформации при температуре $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Как видно из рисунка 4, с понижением температуры испытания до $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ пластичность уменьшилась и начало макролокализации (образование шейки) наступило раньше деформации по сравнению с комнатной температурой испытания. Для необлученных образцов шейка наметилась уже при степени деформации $\sim 35\%$, а для облученных снизилась еще больше до $\sim 30\%$.

Важным замечанием является то, что обнаружить характерные пики на кривых электросопротивления, которые соответствуют началу образования мартенсита деформации, при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ не удалось. Данный факт связан, прежде всего, с малым количеством экспериментальных точек, что обусловлено ограниченным временем работы с высокорadioактивными образцами.

Понижение температуры испытания привело к тому, что скорость образования и накопления α -мартенсита в деформируемых стальных образцах резко возросла, а ее количество к началу макролокализации увеличилось до 50–55 объемных %.

На рисунке 5 приведены зависимости изменения электросопротивления и ферромагнитной α -фазы от степени деформации при температуре $-60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Измерения содержания ферромагнитной α -фазы в холодно-деформируемом образце показали, что на начальных стадиях деформации распределение

α -фазы вдоль рабочей части образца равномерное, вплоть до начала локализации. Оказалось, что для отрицательной температуры испытания образование α -фазы начинается непосредственно с началом пластической деформации, а общее количество образовавшейся фазы при температуре -60°C в четыре раза больше, чем в эксперименте при комнатной температуре.

Обратный фазовый $\alpha \rightarrow \gamma$ переход в процессе отжига

Деформированные образцы, содержащие α -фазу, подвергали отжигам по 30 минут при температурах: 200, 250, 300, 350, 375, 400, 425, 450, 500, 600, 700, 800 $^\circ\text{C}$. После каждого отжига производились замеры распределения магнитной α -фазы вдоль рабочей части и электросопротивления деформированного образца. Результаты измерений для комнатной температуры деформации представлены на рисунке 6.

В ходе изотермических отжигов деформированной аустенитной стали установлено, что в интервале температур от 200 $^\circ\text{C}$ до 800 $^\circ\text{C}$ содержание мартенситной α -фазы интенсивно изменяется только в первые 20 минут, далее скорость уменьшения содержания α -фазы резко падает и после 30 минут отжига ее объемное содержание в образце уже практически не изменяется.

Из рисунка 6 видно, что деформирование необлученной и облученной стали до сравнимых значений электросопротивления приводит к образованию различного количества ферромагнитной мартенситной фазы, которой в облученной стали больше, чем в необлученной. Изменение удельного электрического сопротивления и количества ферромагнитной α -фазы после отжигов можно разделить на следующие основные температурные интервалы.

В интервале температур отжига от 20 до 300 $^\circ\text{C}$ электросопротивление необлученной стали существенным образом уменьшается, тогда как для облученной стали эта величина изменяется менее значительно.

Измерения удельного сопротивления необлученной и облученной стали в температурном интервале от 300 до 400 $^\circ\text{C}$ показали, что минимум этой величины наблюдается в районе 350 $^\circ\text{C}$, но после отжига около 400 $^\circ\text{C}$ происходит резкий прирост ρ . Многие исследователи связывают данный факт с миграцией атомов хрома, возможным образованием карбидов Cr_{23}C_6 , а также протеканием процессов перераспределения атомов Cr в фазанаклепанном аустените [5, 6]. Следует отметить, что резкое увеличение электросопротивления не приводит к приросту или уменьшению количества α -фазы в этом температурном интервале.

Из рисунка 6 видно также, что в температурном интервале 400–500 $^\circ\text{C}$ происходит значительное снижение величины электросопротивления, а объемное содержание мартенсита практически не изменяется. Исследования, проведенные нами ранее на высокооблученной стали [7, 8], показали, что после отжига при 450 $^\circ\text{C}$ количество феррофазы резко возрастает. Возможной причиной данного эффекта является особое состояние предварительно деформированной стали перед отжигами – растяжение было остановлено непосредственно перед началом макролокализации.

На заключительной стадии отжига в температурном интервале от 500 и до 800 $^\circ\text{C}$ происходит небольшое уменьшение электросопротивления как для необлученной, так и для облученной нейтронами стали, причем в конце отжига достигаются примерно одинаковые значения ρ вне зависимости от исходного состояния материала.

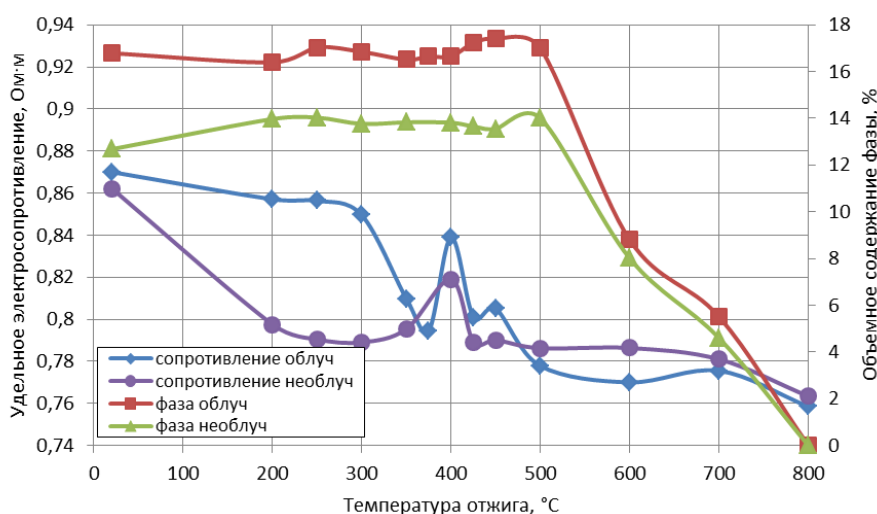


Рисунок 6. Изменения электросопротивления и объемного содержания α -фазы процессе отжига в деформированных при комнатной ($+20^\circ\text{C}$) температуре необлученных и облученных нейтронами образцах стали X18H9

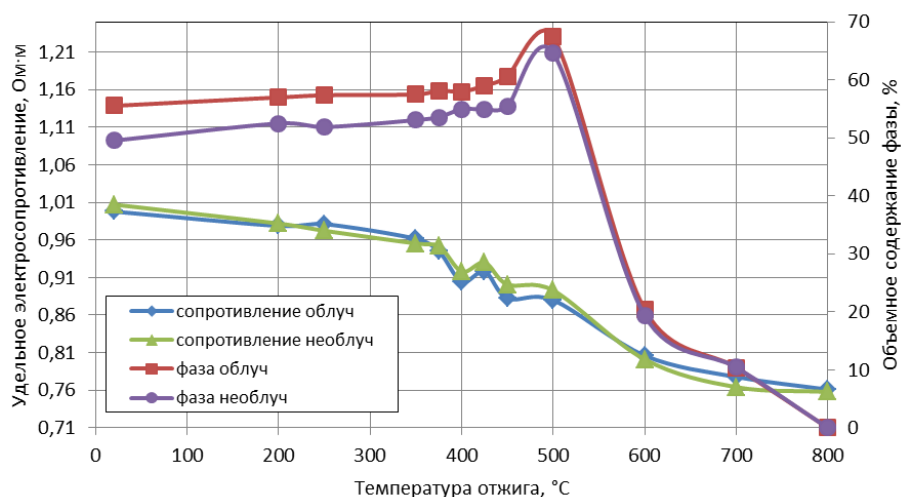


Рисунок 7. Изменения электросопротивления и объемного содержания α -фазы в деформированном при температуре -20°C образце стали X18H9 в процессе отжига

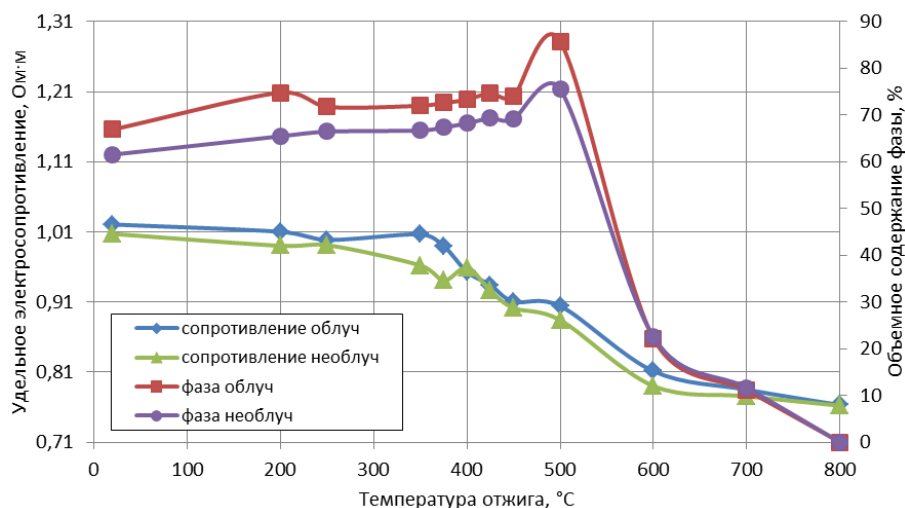


Рисунок 8. Изменения электросопротивления и объемного содержания фазы в деформированном при температуре -60°C образце стали X18H9 в процессе отжига

При температурных испытаниях наблюдается несколько иная картина изменения содержания ферромагнитной фазы. В интервале температур $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$ начинается и интенсивно протекает обратное мартенситное превращение, которое практически заканчивается после отжига при $700\text{--}800^{\circ}\text{C}$, что подтверждается большим количеством литературных данных.

На рисунке 7 приведены результаты отжига образцов, деформированных при -20°C .

Как и в случае отжига образцов, деформированных при комнатной температуре, в данном эксперименте можно полагать, что процесс изменения феррофазы и удельного электрического сопротивления протекает в 3-х основных температурных интервалах.

В первом интервале ($200\text{--}400^{\circ}\text{C}$) наблюдается слабое уменьшение электросопротивления, которое

сопровождается увеличением количества феррофазы на 2–3 %. Пик прироста электросопротивления наблюдается после отжига при 425°C , что на 25 градусов выше аналогичного пика для комнатной температуры деформирования.

Второй температурный интервал ($400\text{--}500^{\circ}\text{C}$) характеризуется резким увеличением содержания феррофазы в среднем на 6–8 % для необлученной и облученной стали, который сопровождается замедлением скорости отжига электросопротивления.

Третий этап отжига в интервале $500\text{--}800^{\circ}\text{C}$ характеризуется интенсивным уменьшением α -мартенсита деформации и постепенным возвратом удельного электросопротивления к практически исходному значению – $0,76\text{ мкОм}\cdot\text{м}$.

На рисунке 8 приведены результаты измерений электромагнитных величин в экспериментах по отжигам образцов, деформированных при -60°C .

Из рисунка 8 видно, что, как и при других температурах испытания, процессы отжига электросопротивления и изменения количества феррофазы в стали, деформированной при -60°C , также протекают в 3-х температурных интервалах, но в тоже время есть и определенные отличия. Так, например, в интервале температур $200\text{--}400^{\circ}\text{C}$ эффект отжига электросопротивления меньше по сравнению с результатами, полученными при других температурах испытания. Скорее всего, данный факт связан с тем, что точечные дефекты, образовавшиеся в процессе пластической деформации при отрицательной температуре, находятся в глубоких «потенциальных ямах» за счет высоких внутренних напряжений, обусловленных большим количеством мартенсита деформации ($\sim 75\%$), а также высокой плотностью дислокаций. Повышение температуры отжига до 500°C привело к замедлению скорости уменьшения электросопротивления и росту количества мартенситной α -фазы еще больше, чем при температуре деформации -20°C .

При более высоких температурах ($550\text{--}650^{\circ}\text{C}$) начинается интенсивный отжиг электросопротивления, который сопровождается падением феррофазы, затем, в температурном интервале ($650\text{--}800^{\circ}\text{C}$) протекает процесс интенсивного $\alpha \rightarrow \gamma$ перехода и при температуре 800°C количество мартенситной феррофазы становится равным нулю.

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимкин О.П. Фазово-структурные процессы и их роль в упрочнении и охрупчивании облученных металлических материалов // Диссертация на соискание ученой степени доктора физ.-мат. наук. – г.Алматы. – 1996.
2. Бердалиев Д.Т. Исследование прямого мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения, индуцированного деформацией в нержавеющей сталях 12X18N10T и X18N9, облученных нейтронами и заряженными частицами // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. – г.Алматы. – 2010.
3. Рахашев Б.К. Исследование обратного мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения в облученных высокоэнергетическими частицами, деформированных нержавеющей сталях 12X18N10T и 08X16N11M3 // Диссертация на соискание ученой степени кандидата физ.-мат. наук. – г.Алматы. – 2010.
4. Рыбин С.В., Максимкин О.П., Гусев М.Н. Создание испытательных низко- и высокотемпературной камер и их применение для изучения деформационно-пластического поведения облученных материалов // Вестник НЯЦ РК. – вып. 2. – 2010. – С. 75-80.
5. Чухлеб А.Н., Мартынов В.П. «Фазовые превращения $\alpha \leftrightarrow \gamma$ при старении в сталях типа 18-8, предварительно деформированных при отрицательной температуре»- физика металлов и металловедение. – 1960. – т. 10. – вып. 2. – С. 240-244
6. Жубаев А.К. Исследование пластической деформации нержавеющей стали методом мессбауэровской спектроскопии и рентгеноструктурного анализа. //Труды II конференции-конкурса НИОКР молодых ученых и специалистов НЯЦ РК. – Алматы. – 13-15 мая 2002. – С. 231-244.
7. Максимкин О.П., Рахашев Б.К. Обратное мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращение в стали 12X18N10T облученной до 56 сн/а в реакторе БН-350 и деформированной при 293K // Вестник НЯЦ РК. – 2009. – вып.3. – С.231-244.
8. Максимкин О.П., Мережко М.С., Рубан С.В. Некоторые особенности обратного мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha'$ превращения в стали 12X18N10T, облученной до высоких повреждающих доз в быстром реакторе БН-350 // Вестник НЯЦ РК. – 2011. – вып.2. – С.109-114.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате комплексных исследований прямого и обратного мартенситного превращения в необлученной и облученной нейтронами аустенитной стали X18N9, деформированной при различных температурах, получены следующие новые результаты:

- С ростом степени деформации стальных образцов возрастает электросопротивление (ρ) и количество ферромагнитной мартенситной α -фазы (M_f). Прирост ρ и M_f тем больше, чем ниже температура растяжения.

- В интервале температур отжига $200\text{--}400^{\circ}\text{C}$ наблюдается небольшое, порядка $1\text{--}3\%$, увеличение количества ферро-фазы, которое сопровождается уменьшением удельного электрического сопротивления.

- Уменьшение содержания магнитной фазы при отжиге наблюдается только выше температуры 500°C . Наряду с тем для температур деформации -20 и -60°C обнаружен пик прироста (до $+10\%$) магнитной α -фазы при температурах $400\text{--}500^{\circ}\text{C}$.

- Количество ферромагнитной фазы полностью отжигается при температуре 800°C .

Авторы выражают признательность сотрудникам лаборатории Рубану С.В. и Шлимасу Д.М. за помощь в проведении радиационных экспериментов.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта №AP05130527 Министерства образования и науки Республики Казахстан (МОН РК).

**СӘУЛЕЛЕНБЕГЕН ЖӘНЕ НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН X18H9 БОЛАТТЫҢ
ДЕФОРМАЦИЯ ЖӘНЕ КІЙДІРУ ПРОЦЕСТЕРІНДЕГІ ЭЛЕКТР КЕДЕРГІСІ МЕН
МАГНИТТЕЛУІНДЕГІ ӨЗГЕРІСТЕР**

^{1, 2)} О.П. Максимкин, ¹⁾ Е.Е. Нұрғали

¹⁾ *Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан*

²⁾ *МИФИ ұлттық ядролық зерттеу университеті, Мәскеу, Ресей*

ВВР-К ядролық реакторында нейтрондармен сәулелендірілген X18H9 аустенитті болаттың электромагниттік қасиеттерде деформациялық және термиялық өзгерістерді зерттеу бойынша эксперименттердің нәтижелері ұсынылды және талқыланды. Тікелей және кері фазалық мартенситті түрленуіне ерекше көңіл бөлінеді. Сәулелендірілген реакторлық болатты күйдіру (~450 °C) кезінде және теріс температурада (-20 және -60 °C) деформацияланған кезінде ферромагнитті α -фазаның мөлшерінің қосымша өсу әсері байқалады.

**CHANGES IN THE ELECTRICAL RESISTIVITY AND MAGNETIZATION OF NON-IRRADIATED
AND IRRADIATED X18H9 STEEL IN DEFORMATION AND ANNEALING PROCESSES**

^{1, 2)} O.P. Maksimkin, ¹⁾ Y.Y. Nurgali

¹⁾ *Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan*

²⁾ *National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

The results of experiments on the study of deformation and thermal changes in the electromagnetic properties of austenitic steel X18H9 subjected to neutron irradiation in a WWR-K nuclear reactor are presented and discussed. Particular attention is paid to the direct and inverse phase martensitic transformation. The effect of an additional increase in the amount of the ferromagnetic α -phase during annealing (~450°C) of irradiated, deformed at negative temperatures (-20 and -60 °C) of reactor steel is observed.

УДК 621.039.531

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАРОЖДЕНИЯ ШЕЙКИ В СТАЛИ 12Х18Н10Т, ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ, МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

1, 2) Максимкин О.П.

¹⁾ Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан

²⁾ НИЯУ МИФИ, Москва, Россия

Рассмотрены некоторые способы определения момента начала локализации пластической деформации при статическом растяжении образцов конструкционных аустенитных сталей. На основании анализа полученных экспериментальных результатов предложен и описан новый магнитометрический способ, применение которого для определения параметров, описывающих условия зарождения шейки, проиллюстрировано на примерах необлученной и облученной нейтронами реакторной стали 12Х18Н10Т.

ВВЕДЕНИЕ

Для сохранения длительной работоспособности конструкционных реакторных материалов в поле нейтронного облучения требуется определенный запас их пластичности. Вместе с тем, к настоящему времени хорошо известен эффект вырождения равномерной деформации при длительном воздействии радиации на металлы и сплавы, т.е. переход от однородного удлинения всей рабочей части образца к преимущественному удлинению его в образующейся шейке, который объясняется потерей способности металлического материала к деформационному упрочнению. Такая локализация деформации часто сопровождается интенсивным нарушением сплошности в этой области и при этом еще задолго до полного разрушения образца в шейке наблюдаются поры и микротрещины. Отсюда следует, что изучение сосредоточенного пластического течения и особенно его начального момента, актуально.

В зависимости от того, какой физический смысл придадут этому явлению, различные авторы по-разному определяют начало локализованной деформации ($\varepsilon_{\text{лок}}$). Например, считается, что:

- шейка образуется при достижении максимальной нагрузки (напряжения σ_B) на инженерной диаграмме растяжения, т.е. $\varepsilon_{\text{лок}} = \varepsilon_p$; $\sigma_{\text{лок}} = \sigma_B$;
- параметры образования шейки находят из условия Констидера: $\sigma = \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$; если $\sigma = C\varepsilon^n$, то $\varepsilon_p = n$;
- шейка образуется, когда поперечная деформация становится равной продольной: т.е. $\psi = \varepsilon_{\text{лок}}$, где $\psi = \frac{D_0 - D_L}{D_0}$; D – диаметр образца;
- образование шейки регистрируют визуально, как начало существенного уменьшения диаметра образца;
- образование шейки отмечают по началу неравномерности распределения ферромагнитной α -фазы по длине деформируемого стального образца [1];
- резко выраженная локализация пластического течения обнаруживается методом спекл-интерферометрии [2].

В настоящей работе проведены сравнительные эксперименты по определению параметров начала образования шейки (критические деформация и напряжение, плотность механической энергии и др.) в холоднодеформируемой метастабильной коррозионностойкой аустенитной хромоникелевой стали различными методами с целью выявления наиболее оптимального среди них.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследовали сталь 12Х18Н10Т в необлученном и облученном нейтронами состояниях. Аустенизированные (1050 °С, 30 мин) образцы облучались в реакторе ВВР-К при $T \approx 80$ °С до флюенса $2 \cdot 10^{20}$ н/см². Форма и размеры исследуемых стальных образцов приведены на рисунке 1. Механические испытания на одноосное растяжение со скоростью 0,5 мм/мин при комнатной температуре проводили на установке Инстрон 1195.

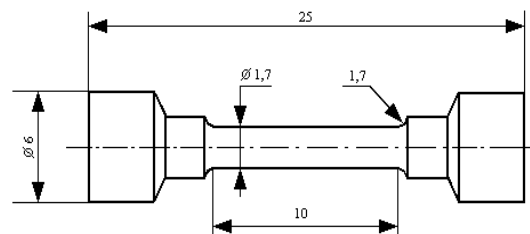


Рисунок 1. Форма и размеры образца для механических испытаний

С целью контроля изменений диаметра (D) образца в процессе механических испытаний нами был разработан и изготовлен оптико-электронный экстензометр [3]. (рисунок 2), в котором в качестве преобразователя применена полупроводниковая телевизионная установка «Матрица», особенностью которой является практически полное отсутствие геометрических искажений изображения изучаемого объекта. В основу измерений положен принцип анализа телевизионного изображения исследуемого объекта с помощью считывающей бегущей строки. В результате представилась возможность надежно и точно определять значения «истинных» напряжений и деформаций.



Рисунок 2. Оптико-электронный экстензометр [3]

Наряду с тем в ходе эксперимента с аустенитными нержавеющими парамагнитными сталями определяли количество индуцированной деформацией ферромагнитной α -фазы (M_f) и ее распределение на длине (l) деформируемого образца с помощью феррозонда Ф1-053, сканировавшего по его поверхности. Из экспериментальных кривых для каждой точ-

ки, характеризующей значение ϵ_i , находили отношение $\Delta M_f / \Delta D$. В результате, в конце очередного механического испытания определяли не только инженерную диаграмму «нагрузка – удлинение», но и кривые деформационного упрочнения $\sigma = f(\epsilon)$, а также зависимости $M_f = f(\epsilon)$; $D = f(\Delta l)$; $\psi = f(\epsilon)$; $\Delta M / \Delta \sigma = f(\epsilon)$ и другие.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1 Определение начала локализации деформации в реакторной стали 12Х18Н10Т с использованием метода экстензометрии

В процессе растяжения необлученных и облученных нейтронами образцов стали 12Х18Н10Т регистрировали экстензограммы, которые позволяли определять особенности изменения диаметра образца во всех точках рабочей длины одновременно (рисунок 3). По окончании эксперимента строили графики изменения диаметра образца D в нескольких выделенных сечениях, в том числе и в месте шейки (будущего разрыва) (рисунок 4).

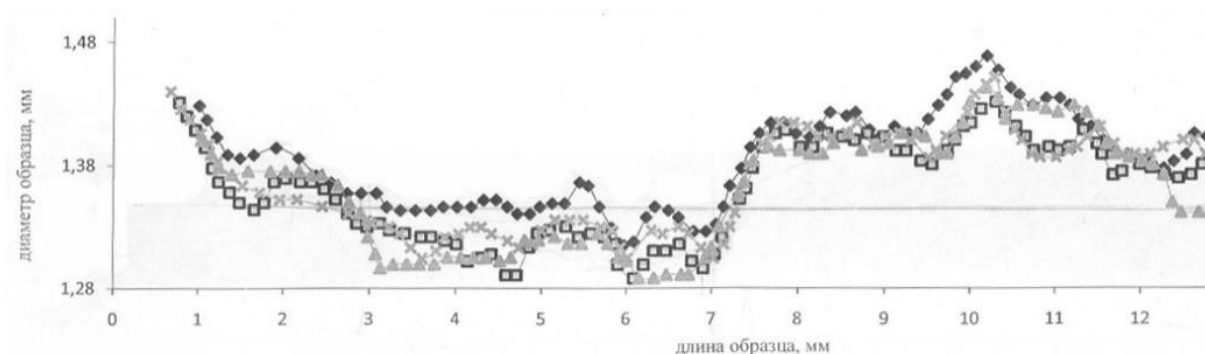
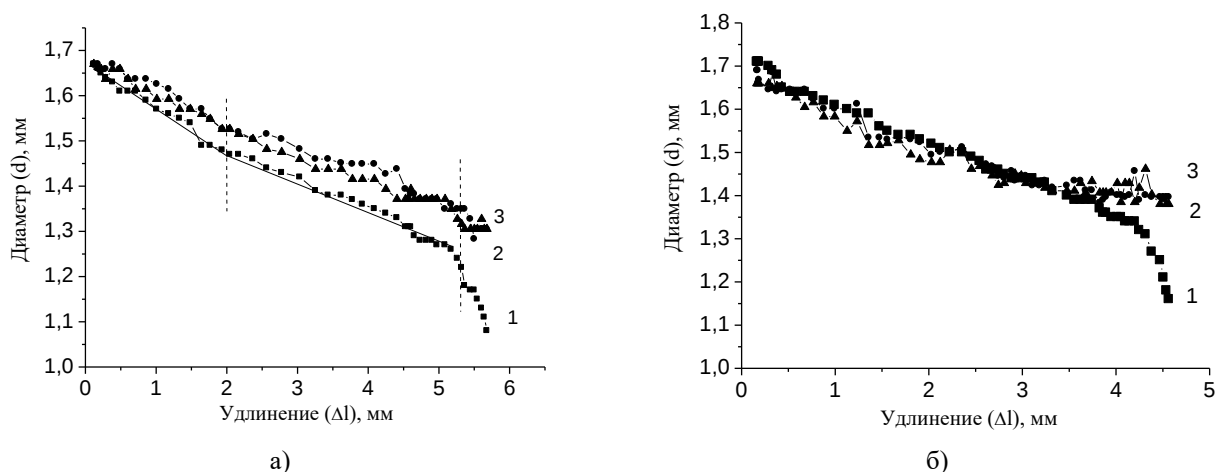


Рисунок 3. Распределение величин диаметров по длине деформированного облученного ($2 \cdot 10^{20}$ н/см²) стального образца, найденных разработанным методом оптикоэлектронной экстензометрии



1 – в месте будущего разрыва; 2 – рядом с зоной локализации; 3 – вне зоны локализации.

Рисунок 4. Изменение в процессе растяжения диаметра образца необлученной (а) и облученной (б) нейтронами ($2 \cdot 10^{20}$ н/см²) стали 12Х18Н10Т

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАРОЖДЕНИЯ ШЕЙКИ В СТАЛИ 12Х18Н10Т, ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ, МАГНИТНЫМ МЕТОДОМ

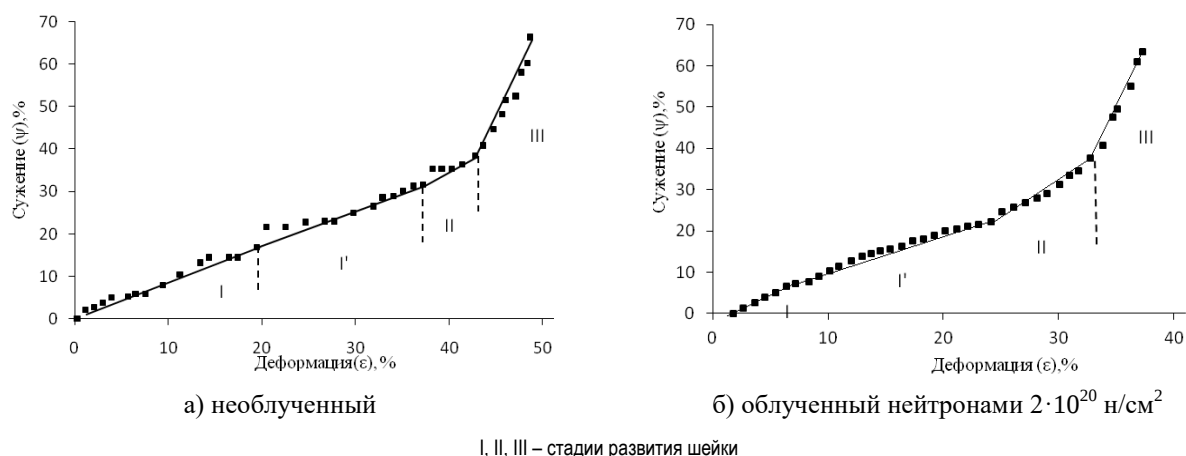


Рисунок 5. Изменение сужения в шейке образцов стали 12Х18Н10Т с ростом степени деформации

Таблица 1. Продолжительность различных стадий деформации в необлученной и облученной нейтронами стали 12Х18Н10Т

Состояние стали	Продолжительность деформации, %			
	равномерной	квазиравномерной	локализованной	общей
Необлученное	22	16	12	$\varepsilon =$ 50 38
Облученное $2 \cdot 10^{20} \text{ н/см}^2$	10 (0–10)	21 (10–31)	7 (38–31)	
Необлученное	22 (0–22)	16 (22–38)	27 (38–65)	$\psi =$ 65 60
Облученное $2 \cdot 10^{20} \text{ н/см}^2$	10 (0–10)	21 (10–31)	29 (31–60)	

Из рисунка 4 видно, что для каждого выделенного в образце сечения (1, 2, 3) значения диаметров D изменяются по ниспадающей ступенчатой кривой. Можно отметить, что уже на ранних стадиях процесса деформации уменьшение поперечных размеров наблюдается не во всех точках образца одновременно и протекает с неодинаковой скоростью. Этот эффект становится особенно заметным когда в деформируемой метастабильной аустенитной стали начинается мартенситное $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращение, развитием которого можно объяснить образование и перемещение по рабочей части образца волн (полос) деформации [4]. При дальнейшем растяжении выявляется сечение, в котором скорость изменения диаметра постепенно увеличивается, а после достижения максимальной нагрузки изменение сужения ψ происходит только в этой локализованной области шейки, для которой скорость уменьшения диаметра непрерывно возрастает (см. рисунок 5).

Установлено, что в результате протекания фазового $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения скорость изменения диаметра уменьшается: в необлученном образце на 5 %, в облученном нейтронами ($5 \cdot 10^{16} \text{ н/см}^2$) – на 59 %, в облученном до более высокого флюенса ($2 \cdot 10^{20} \text{ н/см}^2$) – на 67 %.

Заметим, что как для необлученного, так и для облученного образца локализованная деформация вплоть до разрушения длится какое-то определенное

время растяжения, за которое видимая шейка эволюционирует, расширяясь и углубляясь, что приводит к катастрофическому уменьшению объема локализованной деформации. Количественно все фазы деформации (равномерная, квазиравномерная, локализованная) отражены в таблице 1.

Из экспериментально полученных величин, приведенных в таблице, следует, что ход пластической деформации не только облученного, но даже и для необлученного стального образца практически полностью определяется процессами, протекающими в областях квазиравномерной и локализованной деформации, а не только в равномерной области. Что касается мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения, то не вызывает сомнения, что процессы бездиффузионного фазового превращения, развивающегося при холодном деформировании и во многом определяющий ход пластической деформации, протекает, главным образом, в области локализованной деформации. Отсюда следует актуальность изучения механизмов и особенностей локализованной пластической деформации.

Анализируя данные, приведенные в таблице 1, можно прийти к выводу, что пластичность необлученной стали (которая выше, чем облученной) обусловлена суммарной протяженностью стадий равномерной и локализованной деформации (22 против 10 % и 12 против 7 %), тогда как в облученной стали

превалирует стадия квазиравномерной деформации, которая даже больше, чем для необлученной стали (21 против 16 %). Другими словами, в облученной стали интенсивно образуются и перемещаются полосы деформации, причем так, что обеспечивают большую пластичность материала на этой стадии, чем для необлученной стали.

2 Определение критического «истинного» напряжения начала образования шейки в метастабильной нержавеющей реакторной стали магнитным методом

С целью разработки нового метода определения зарождения шейки в процессе статического растяжения необлученных и облученных нейтронами радиоактивных стальных образцов, наряду с диаграммой «нагрузка – удлинение», регистрировали также кривую «количество ферромагнитной фазы – удлинение», получаемую с помощью феррозонда, сканирующего по рабочей длине деформируемого образца, а также экстензограммы – набор кривых, позволяющих контролировать изменение диаметра и длины образца, что в дальнейшем использовали для нахождения «истинных» значений растягивающих напряжений $\sigma_{ист}$ и деформаций ε . Таким образом, основным результатом экспериментов по изучению образования и накопления ферромагнитной мартенситной α -фазы в парамагнитной аустенитной γ -фазе при деформации являются две кривые, приведенные на рисунке 5.

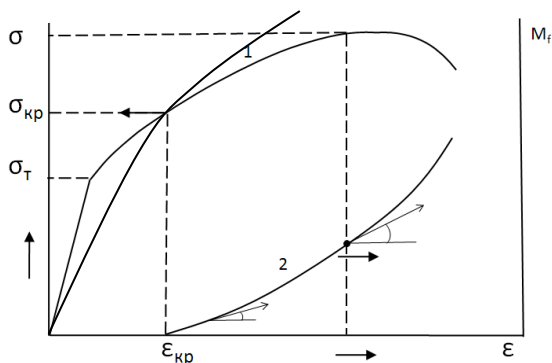


Рисунок 6. Диаграмма растяжения (1) в «истинных» координатах « $\sigma - \varepsilon$ » и кривая образования и накопления α -фазы при растяжении (2)

Используя полученные экспериментальные кривые, аналогичные приведенным на рисунке 5, можно для каждого значения $\sigma_{ист}$, начиная от критического напряжения $\sigma_{кр}$, соответствующего началу образования α -фазы, определить, как изменяется значение относительной скорости накопления α -фазы ($\Delta M_f / M_f$). Полученные таким образом кривые $\Delta M_f / M_f = f(\sigma_{ист})$ приведены на рисунке 7. Их анализ показал, что при напряжениях растяжения, близких к величине 1000 МПа, на графике отчетливо наблюдаются экстремумы, т.е. в момент зарождения шейки (согласно [5]) скорость роста количества α -фазы

резко уменьшается. Причем эффект уменьшения скорости одинаков как для необлученных, так и для облученных различными флюенсами нейтронов ($\sim 0,1$ сна) стальных образцов.

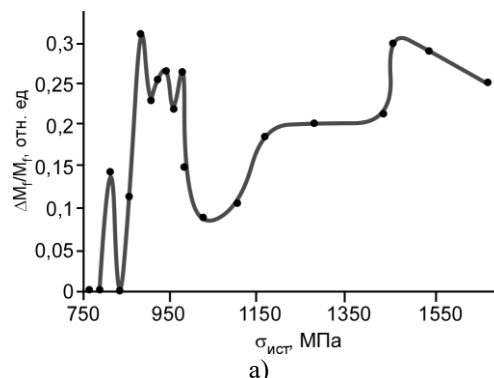


Рисунок 7. Изменение скорости образования ферромагнитной α -фазы в зависимости от «истинных» напряжений течения в необлученных (а) и облученных нейтронами ((б) – $2 \cdot 10^{17}$; (в) – $1 \cdot 10^{18}$; (г) – $2 \cdot 10^{18}$ н/см²) образцов стали 12Х18Н10Т

Необходимо отметить, что после образования и формирования стабильной шейки скорость изменения α -фазы вновь возрастает. Таким образом, на схеме (рисунок 8) можно различать три области экстремальных напряжений: около 800, 1050 и 1200 МПа.

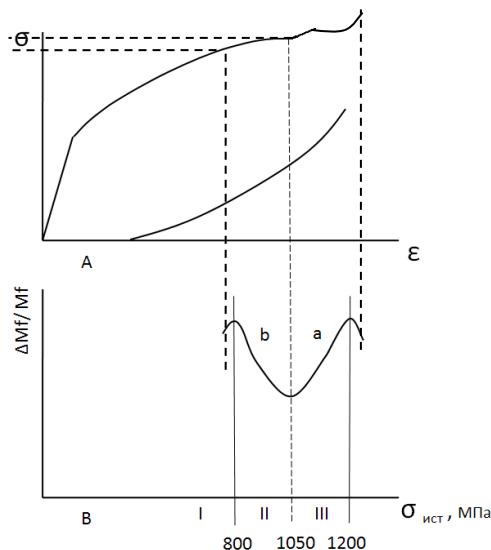


Рисунок 8. Диаграмма растяжения и кривая накопления α -фазы при растяжении образца стали 12X18H10T (A); фрагмент кривой изменения скорости накопления α -фазы в зависимости от действующего напряжения (B) (схема)

На основании полученных результатов можно предположить, что в области I (рисунок 8) преобладают напряжения растяжения. В области напряжений II появляются напряжения сжатия, которые уменьшают возможность образования α -фазы (ОЦК-решетка), более рыхлой, чем γ (ГЦК-решетка) и, как следствие, скорость ($\Delta M_f / M_f$) образования α -фазы уменьшается. Этот процесс сопровождается ростом шейки в глубину (ветвь кривой «б»). В то же время накопление α -фазы продолжается, но с замедленной скоростью. В какой-то момент (min на кривой производной) более прочной α -фазы накапливается так много, что она начинает препятствовать углублению шейки. При этом упрочнение стального образца уменьшается.

В области III (ветвь «а») под действием преобладающих по величине напряжений растяжения происходит увеличение размеров шейки в ширину и при этом ничто не мешает α -фазе развиваться. В этой связи скорость ее образования и накопления возрастают (ветвь «а» на рисунке 8).

Таким образом, при растяжении стального цилиндрического образца образующаяся стабильная шейка развивается вглубь (под действием сжимающих напряжений) и вширь (под действием напряжений растяжения), причем ее окончательная форма зависит от скорости накопления α -фазы в процессе $\gamma \rightarrow \alpha$ -перехода.

3 Энергетический параметр начала образования локализованной деформации

Если рассматривать локализацию деформации как одно из событий в процессе формоизменения металлического материала, то можно предположить, что оно наступает, как только плотность внутренней энергии деформируемого образца достигнет некоторой определенной критической величины. В этой связи экспериментальные данные были представлены в виде кривых зависимостей интенсивности $\gamma \rightarrow \alpha$ перехода от плотности механической энергии и «истинных» напряжений (рисунок 9). Оказалось, что максимумы на этих кривых соответствуют напряжению, близкому к значению ~ 1000 МПа, т.е. величине, при которой согласно [5] в стали образуется шейка. Причем, это значение одинаково как для необлученной, так и для облученной нейтронами различными флюенсами стали 12X18H10T. Для обоих случаев величина плотности энергии деформации мало отличалась от значения 210 МДж/м³.



Рисунок 9. Изменение интенсивности мартенситного $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в зависимости от «истинного» действующего напряжения или плотности энергии

Из анализа полученных результатов (см. рисунок 7) следует, что наименьший разброс экспериментальных значений (10 %) достигается при определении истинного критического напряжения начала образования шейки, а не деформации или плотности энергии. При этом найденные значения $\sigma_{кр}$ изменяются от 910 до 1010 МПа, что достаточно близко к величине 1000 МПа, соответствующей началу зарождению шейки.

Отметим, что раньше всего (при 910 МПа) критическое напряжение определяется магнитным методом (4 или 6) и это событие соответствует моменту образования в деформируемом образце напряжений сжатия. Позже всего начало зарождения шейки определяется с использованием уравнения Консидера и соответствует тому моменту растяжения, когда шейка уже имеет солидную ширину и глубину.

Таким образом, можно заключить, что окончание макроравномерной деформации в аустенитной нержавеющей стали (ϵ_r) еще не означает, что это начало образования шейки ($\epsilon_{лок}$). Между двумя этими событиями имеет место квазиравномерная деформация, которая может быть достаточно продолжитель-

ной. Она характеризуется образованием и перемещением деформационных полос (волн), сопровождаемых мартенситным $\gamma \rightarrow \alpha$ -переходом, который происходит во фронте волн, перемещающихся с повышенной скоростью так, что образование мартенситной α -фазы подавляет возможность полосы (волны) двигаться, т.к. аустенитная матрица упрочняется. Поскольку полученные значения $\sigma_{кр}$, примерно соответствующие началу локализации, в данном случае совпадают по величине, но находятся значительно проще, чем из уравнения Консидера ($\sigma = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$),

то на практике следует рекомендовать пользоваться именно этим «магнитометрическим» способом.

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам лаборатории радиационного материаловедения Мережко М.С. и Такиевой А.М. принимавшим активное участие на всех этапах выполнения работы.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта №AP05130527 Министерства образования и науки Республики Казахстан (МОН РК).

ЛИТЕРАТУРА

1. Максимкин О.П. Способ диагностики шейки в деформируемом образце аустенитной стали // Заводская лаборатория. – 1982. – №7. – С. 77–78.
2. Кутяйкин В.Г. К вопросу определения коэффициента напряженного состояния в шейке образца при растяжении // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2002, т. 68, №9 стр. 53.
3. Бабушкин А.А., Максимкин О.П., Челноков С.Ю. Оптико-электронный экстензометр // Изв. АН Каз ССР. Серия: физ.-мат. – 1986. – №2. – С. 2.
4. Максимкин О.П., Такиева А.М. О локализации пластической деформации в облученной аустенитной нержавеющей стали 12X18H10T // Вестник НЯЦ РК. – 2014. – №1. – С. 45–52
5. Byun T.S., Farrell K. Plastic instability in polycrystalline metals after low temperature irradiation // Acta materialia. – (52) 2004. – P. 1957–1608.

НЕЙТРОНДАРМЕН СӘУЛЕЛЕНДІРІЛГЕН 12X18H10T БОЛАТТЫҢ МОЙНЫНЫҢ ПЙДА БОЛУ ПАРАМЕТРЛЕРІН МАГНИТ ӘДІСІМЕН АНЫҚТАУ

О.П. Максимкин

*Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан
«МИФИ» ұлттық ядролық зерттеу университеті, Мәскеу, Ресей*

Құрлымдық аустениттік болаттардың үлгілерінің статикалық созылуында пластикалық деформациялану сәтін анықтаудың кейбір әдістерін қарастырылды. Алынған эксперименттік нәтижелерді талдау негізінде жаңа магнитометриялық әдіс ұсынылып және сипатталынды, ол параметрлерді анықтау үшін қолданылады және мойнының пайда болу жағдайын, сәуленбеген және нейтрондармен сәулендірілген 12X18H10T реакторлық болаттың мысалдарымен сипатталады.

THE DETERMINATION OF THE PARAMETERS OF THE NUCLEATION OF THE NECK BY THE MAGNETIC METHOD IN 12X18H10T STEEL IRRADIATED WITH NEUTRONS

O.P. Maksimkin

*Institute of Nuclear Physics, Almaty, Kazakhstan
National Research Nuclear University MEPhI, Moscow, Russia*

Some methods for determining the moment of localization of plastic deformation during static stretching of samples of constructional austenitic steels are considered. Based on the analysis of the obtained experimental results, a new magnetometric method has been proposed and described, its application for the determination of parameters describing the conditions of nucleation of the neck is illustrated by examples of unirradiated and neutron irradiated 12X18H10T reactor steel.

УДК 504.6:62/69; 504.5/.6(1/9)

**ПРОБЛЕМЫ ЧИСТОЙ ВОДЫ НА ТЕРРИТОРИИ ТРАНСГРАНИЧНОГО СЕКТОРА
«КАЗАХСТАН-КЫРГЫЗСТАН» И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ РЕШЕНИЯ**¹⁾ Солодухин В.П., ²⁾ Дженбаев Б.М.¹⁾ *Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан*²⁾ *Биолого-почвенный институт НАН КР, Бишкек, Кыргызстан*

На основе литературных источников и собственных данных представлены результаты анализа водных проблем в мире и Центральной Азии. Приведены свидетельства негативного влияния хвостохранилищ радиационно-опасных объектов Кыргызстана на уровень загрязненности природных вод и других объектов окружающей среды естественными радионуклидами и токсичными элементами на территории трансграничного сектора Казахстан-Кыргызстан. Представлен проект, предусматривающий изучение на основе ядерно-физических методов анализа радиационной и экологической обстановки на территории трансграничного водного бассейна Шу-Курагаты и выработку мероприятий по ограничению риска для здоровья местного населения.

Ключевые слова: вода, трансграничные реки, радионуклиды, токсичные элементы, ядерно-физические методы анализа.

ВВЕДЕНИЕ**Глобальные водные проблемы**

Запасов доступной для пользования пресной воды на Земле (200 тыс. км³) вполне достаточно для удовлетворения потребностей всего населения, а также нужд промышленности и сельского хозяйства. Вместе с тем, вода распределена неравномерно и подвергнута многим механизмам техногенного и природного загрязнения. Эти обстоятельства приводят к тому, что многие страны уже сталкиваются с растущим дефицитом пресной воды необходимого качества. По официальным данным ООН сегодня около 1,1 млрд. человек в мире испытывают катастрофическую (постоянную и острую) нехватку воды. По оценкам экспертов, к середине XXI века с дефицитом воды столкнутся около 40 % жителей планеты, т.е. 4–5 млрд человек [1, 2].

Половина рек и озер мира испытывает серьезное антропогенное воздействие. Во многих регионах запасы пресной воды, пригодной для питья, в последнее время резко сократились в результате ее загрязнения отходами промышленности, сельского хозяйства и коммунальными стоками. Дефицит чистой воды все чаще вынуждает людей использовать небезопасные источники. По данным ВОЗ, низкое качество воды повышает риск диареи, холеры брюшного типа, дизентерии, сальмонеллеза и других желудочно-кишечных, вирусных и бактериальных инфекций, а также способствует развитию таких болезней, как трахома, чума и сыпной тиф. От болезней, вызванных употреблением некачественной воды, ежегодно умирает несколько миллионов человек, в большинстве своем это дети младше 5 лет [3, 4].

Ситуацию водного кризиса существенно усугубляет специфика административно-географического расположения водных источников. В настоящее время 263 озерных и речных бассейнов, охватывающих почти половину земной поверхности, находятся на территориях 145 стран. В 39 странах основная часть

используемой пресной воды поступает из-за границы. Такая особенность зачастую вызывает с их стороны претензии по поводу количества и качества поступающей воды, что приводит к обострению межгосударственных отношений. В докладе ООН за 2006 г. о водной проблеме на Земле отмечено, что за прошедшие 50 лет зафиксировано 37 случаев межгосударственных конфликтов, связанных с водопользованием. Трансграничная особенность расположения водных источников в условиях дефицита воды резко обострила политическую ситуацию на Ближнем Востоке: между Турцией, Сирией и Ираком из-за рек Тигр и Евфрат; между Израилем, Палестинской автономией и Иорданией из-за р. Иордан. На грани войны оказались страны (Египет, Судан, Эфиопия), расположенные вдоль р. Нил в Северной Африке. На юге Африки сложилась конфликтная ситуация между Ботсваной, Намибией и Анголой по поводу дельты р. Окаванго. Ведутся продолжительные споры, связанные с использованием воды р. Меконг, протекающей по территориям следующих стран: Китай, Бирма, Лаос, Таиланд, Вьетнам и Камбоджа [1, 4, 5].

Многие эксперты и политики прогнозируют, что истощение и загрязнение водных ресурсов влечет за собой угрозу глобальной безопасности. Международные и гражданские войны из-за воды могут стать основным элементом политической жизни XXI века [4, 5].

Водные проблемы Центральной Азии

Весьма напряженная ситуация, в связи с острым дефицитом чистой пресной воды, сложилась в Центральной Азии и на юге Казахстана. Основой экономики этого региона является сельское хозяйство, поэтому доступ к воде – вопрос стратегической важности. Все крупные и многие мелкие реки этого региона являются трансграничными. Это приводит к тому, что страны, причастные к низовьям этих рек (Казахстан, Узбекистан, Туркмения), находятся в

водной зависимости от Таджикистана и Кыргызстана. Несогласованность в вопросах регулирования и обеспечения качества воды зачастую приводит к экологическим осложнениям, взаимным претензиям и конфликтам. Водный дефицит уже реально поставил регион на грань политического и даже военного кризиса. Так, судьба обмелевшего Аральского моря – явно выраженный пример «холодной войны» среднеазиатских республик за водные ресурсы рек Амударья и Сырдарья. В Ферганской долине основной причиной всех межэтнических и приграничных конфликтов также является дефицит воды. Так в докладе международной организации International Crisis Group (ICG) «Центральная Азия: вода и конфликт» отмечается, что практически в каждом селе этой местности обнаружены признаки скрытого или явного «водного конфликта» [4–6]. Одной из наиболее серьезных экологических проблем всего среднеазиатского региона является значительная загрязненность многих рек и водохранилищ естественными радионуклидами (ЕРН) и токсичными элементами (ТЭ). Основными источниками загрязнения этих водных объектов служат многочисленные хвостохранилища добывающих и перерабатывающих предприятий урановой (в первую очередь) и других видов (полиметаллы; цветные, редкие, редкоземельные металлы; уголь; фосфориты и др.) промышленности, использующих сырье с повышенным содержанием ЕРН и ТЭ [7–11].

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

Водные и экологические проблемы на территории Казахстанско-Кыргызского сектора

В последние годы существенно обострилась конфликтная ситуация по водопользованию в пределах приграничной территории Казахстанско-Кыргызского сектора. Эта территория находится в аридной зоне, в которой возделывание сельскохозяйственных культур и получение устойчивого урожая требуют значительного и стабильного объема водных ресурсов. Орошение обеспечивается водами трансграничных рек, берущих начало в Кыргызстане. После развала СССР и разобщения отдельных республик на этой территории (как и во всем регионе) значительно ослабились координация работ по регулированию потоков трансграничных рек и контролю качества их вод. Ведутся постоянные споры по содержанию и эксплуатации межгосударственных гидроэнергетических сооружений, построенных на приграничной территории Кыргызстана, а также по вопросу дефицита воды в летний период на казахстанской части этого водного бассейна в связи с переводом Токтогульской ГЭС КР на интенсивный рабочий режим в зимний период. Решение этих вопросов находится в сфере дипломатии. Постоянно проводится согласование действий по использованию водных ресурсов этого бассейна, что обеспечивает сдерживание конфликтов [12].

Гораздо сложнее обстоит вопрос качества вод трансграничных рек этого сектора. Об этом свидетельствуют результаты наших (совместных с РГП «КазГидроМет») работ по мониторингу трансграничных рек Казахстана (см. рисунок). Установлено, что среди этих рек наибольшее содержание урана (химический элемент 1-го класса опасности) находится в водах рек Шу и, особенно, Карабалта. Кроме того, в воде р. Карабалта выявлено значительное содержание таких токсичных элементов как As, B, Ba, Li, Mo, Sb, Se и Sr. В донных отложениях этих рек тоже обнаружено большое содержание естественных радионуклидов, а также As, Co, Cs, Cu, Hf, Pb, Sb, Th, U, Zn, Zr и всех редкоземельных металлов (РЗМ). Полученные нами результаты свидетельствуют о том, что в Кыргызстане эти реки подвергнуты техногенному загрязнению [13, 14].

Радиационно-опасные объекты на территории Казахстанско-Кыргызского сектора

На территории Кыргызстана в бассейнах трансграничных с Казахстаном рек находятся следующие радиационно-опасные объекты: месторождение полиметаллов и тория «Ак-Тюз», месторождение урана «Камышановское», крупнейший горно-рудный комбинат по переработке урана «Кара-Балта» (см. рисунок). Известно, что хвостохранилища предприятий «Ак-Тюз» и «Кара-Балта» содержат большое количество естественных радионуклидов (ЕРН) и токсичных элементов (ТЭ) [7, 8]. Кроме того, на этой территории ведется интенсивная сельскохозяйственная деятельность с использованием минеральных удобрений с повышенным содержанием ЕРН. Ирригационная система, обеспечивающая полив выращиваемых овощей и бахчевых культур, включает в себя множество густо переплетенных каналов и арычных сооружений, питающихся водой из местных рек. Такая ситуация создает значительную вероятность загрязнения ЕРН и ТЭ всей ирригационной системы и переноса этих загрязнителей на территорию Казахстана водами трансграничных рек.

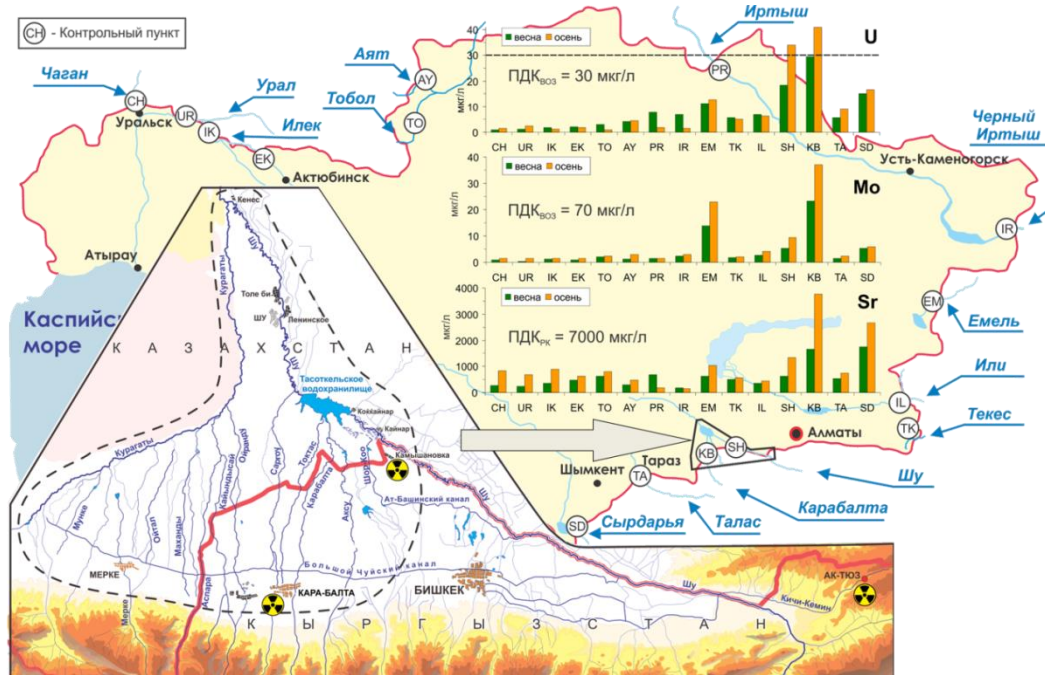
Известно, в частности, что в декабре 1964 г. произошло сейсмосинхронное разрушение дамбы хвостохранилища №2 *рудника Ак-Тюз*. В результате этой аварии в р. Кичи-Кемин попало около 600 тыс. м³ отходов, содержащих в повышенных концентрациях тория и ТЭ. Этот поток, в виде радиоактивного селя, распространился по руслу и долине р. Кичи-Кемин на расстояние до 40 км, вплоть до ее впадения в р. Шу на территории Казахстана. Последствия этой катастрофы устранялись много лет, однако и на сегодняшний день они негативно отражаются на состоянии окружающей среды и, возможно, здоровье населения этой местности [15]. Нами установлено, что процесс миграции многих токсичных и радиоактивных элементов из хвостохранилищ, расположенных на территории промышленной зоны этого месторождения в русло р. Кичи-Кемин продолжается и в настоящее время. Об этом свиде-

тельствует существенное превышение (в 3–11 раз) содержания Zn, Y, Zr, Hf, Nb, Mo, Pb, Th, U и всех лантаноидов в донных отложениях, отобранных в русле этой реки ниже промышленной зоны над их содержанием в донных отложениях, отобранных выше этого месторождения. Содержание Zn, Sb и Pb в воде на этом отрезке р. Кичи-Кемин увеличивается вниз по течению в 4–15 раз [16]. Эти загрязнители разносятся водными потоками на большие расстояния. Так повышенное содержание Zr, Hf и радионуклидов семейств ^{238}U и ^{232}Th обнаружено нами в донных отложениях р. Шу даже возле пос. Кайнар (бывший пос. Благовещенка), находящегося на значительной удаленности (более 150 км) от месторождения Ак-Тюз [13, 14].

Приграничная территория Казахстанско-Кыргызского сектора находится в Шу-Сарысуйской ураново-рудной провинции, насыщенной значительным количеством отработанных, разрабатываемых и резервных месторождений урана. Разведка и добыча урана любым способом (открытым, подземным, геотехнологическим) сопровождается загрязнением окружающей среды ЕРН и ТЭ [7, 17]. В КазНУ им. аль-Фараби был изучен радионуклидный состав и формы нахождения урана в почве пос. Камышановское [18, 19]. Установлено, что содержание радионуклидов семейства ^{238}U в почве этого поселка существенно (примерно в 10 раз) превышает фоновые значения их содержания в данном регионе, что свидетельствует о техногенном влиянии со стороны одноименного уранового рудника. Показано также, что основная часть (более 90 %) содержащегося в

этой почве урана находится в геохимически-мобильных формах. Таким образом, **месторождение урана Камышановское**, расположенное в непосредственной близости от р. Шу, представляет опасность для этой реки как потенциальный источник ее загрязнения ураном и продуктами его радиоактивного распада.

Наибольшую экологическую опасность для приграничной территории Казахстанско-Кыргызского сектора представляет хвостохранилище гидрометаллургического завода (ГМЗ) **Кара-Балтинского горно-рудного комбината (КГРК)**, расположенного в пределах Западно-Шуйского месторождения подземных вод на расстоянии 2–3 км к югу от г. Кара-Балта с населением более 40 тыс. человек. За время работы ГМЗ, начиная с 1956 г., на хвостохранилище заскладировано 29,6 млн. т. переработанных урановых руд. В период 1997–2000 гг. учеными Кыргызстана были выполнены работы по оценке и контролю загрязнения грунтовых и подземных вод в районе этого хвостохранилища [7, 8]. Установлено, что из хвостохранилища в водоносный горизонт поступает инфильтрат, имеющий большое содержание сульфатов, нитратов, тяжелых металлов и отдельных ЕРН. Основными причинами радиоактивного и химического загрязнения грунтовых и подземных вод в районе КГРК являются ухудшение качества гидроизоляции ложа хвостохранилища и прекращение в 1996–1997 гг. перехвата загрязненных вод, осуществлявшегося с помощью сети скважин, пробуренных ниже этого сооружения.



территория обследования (внизу, слева, выделена пунктиром);
содержание U, Mo, Sr в воде на различных контрольных пунктах трансграничных рек (вверху, справа)

Рисунок. Схема мониторинга трансграничных рек Казахстана

В результате сформировался ореол загрязнения подземных вод, содержание сульфатов и нитратов в котором в 5–8 раз превышает санитарный норматив «Предельно-допустимая концентрация» (ПДК). Этот ореол интенсивного загрязнения имеет форму вытянутого на север (по направлению подземного потока в сторону границы с Казахстаном) языка, распространяющегося на расстояние до 15 км от хвостохранилища и на глубину до 100–120 м. В относительно короткий период наблюдений (1997–1999 гг.) отмечено увеличение со временем ширины этого ореола, а также продвижение его переднего фронта и максимума концентрации нитратов по направлению подземного потока на несколько километров. Радиоактивное загрязнение также распространилось на значительное расстояние. Так содержание урана в подземных водах выше (южнее) хвостохранилища составляет 8 мкг/л, а ниже (севернее) г. Кара-Балта его значение возросло до 30 мкг/л. В литературных источниках информации о современном уровне и форме загрязнения подземных вод на этой территории не обнаружено. Особое внимание следует обратить на специфику гидрогеологических условий в этой местности – на расстоянии 3–5 км севернее г. Кара-Балта подземные воды вступают в зону их неглубокого залегания и выклинивания на земную поверхность. Эта особенность, несомненно, создает значительную угрозу загрязнения вод трансграничных рек ЕРН и ТЭ, которыми насыщено хвостохранилище ГМЗ. Отдельные результаты выполненных нами исследований [20–22] свидетельствуют о реальности такой угрозы – на приграничных участках трансграничных рек (Шу, Шор-Коо, Аксу, Карабалта, Токтас) содержание урана в их водах находится в пределах 19–39 мкг/л (значение ПДК для урана в питьевых водах, рекомендованное Всемирной организацией здравоохранения, составляет 30 мкг/л [23]). По суммарному содержанию отдельных элементов 1-го и 2-го класса опасности (As, B, Ba, Mo, Sb, U) токсичность этих вод превышает соответствующее значение санитарного норматива в 1,4–3,0 раза. При этом основной вклад в показатель токсичности этих вод вносит уран – химический элемент 1-го класса опасности.

Следует отметить также, что установленная тенденция расширения ореола загрязненных подземных вод создает значительную вероятность их влияния на радионуклидный и элементный состав вод и более удаленных от хвостохранилища КГРК «Кара-Балта» трансграничных рек (Ойранды, Кайындысай, Аспара и др.), являющихся притоками р. Курагаты. Полученные нами данные о высоком содержании в водах рек Ойранды и Кайындысай многих токсичных элементов, таких как B, Li, Sr, As, Mo, Ba, Co, Sb и, особенно, U (до 50 мкг/л) [24], служат серьезным аргументом в пользу выдвинутого нами предположения. Более того, этот процесс негативно отражается на качестве воды р. Курагаты. Необходимо

принимать срочные меры по выявлению источников и установлению механизмов загрязнения этих рек на территории Кыргызстана. Не исключено, что таким источником являются подземные воды, находящиеся под влиянием хвостохранилища радиоактивных отходов КГРК «Кара-Балта». Если будет подтвержден факт загрязнения подземных вод отходами производства этого предприятия на столь значительном пространстве, то это будет означать, что экологическая ситуация на приграничной с Казахстаном части территории Кыргызстана обрела катастрофический характер.

Изложенные результаты анализа состояния радиационно-опасных объектов Кыргызстана («Ак-Тюз», «Камышановское», «Кара-Балта»), а также негативных последствий для окружающей среды (в первую очередь – для природных водных источников), связанных с техническим состоянием и происшедшими на этих объектах отдельными событиями, свидетельствуют о том, что на приграничной территории Казахстанско-Кыргызского сектора сложилась критическая ситуация острого экологического риска. Каких-либо предупреждений, либо ограничений по водопользованию для жителей этого трансграничного сектора не существует. Такая ситуация вызывает тревогу у местного населения, а также значительную озабоченность научной общественности и международных организаций (ЮНЕП, ПРООН, ОБСЕ, НАТО), сотрудничающих в рамках инициативы «Окружающая среда и безопасность». Так, в работе [25] отмечается: «Деградация окружающей среды может способствовать усилению социальной напряженности и активизации латентных конфликтов. В то же время, в сложных социально-политических условиях природоохранное сотрудничество укрепляет доверие и улучшает отношения между сообществами, зависящими от общих природных ресурсов... Мы считаем, что исследование и оценка ситуации с участием различных заинтересованных сторон с последующими целенаправленными действиями в конкретных районах возможных конфликтов способствуют устойчивому развитию и поддержанию мира.». Таким образом, следуя мнению авторитетных международных организаций и во избежание обострения конфликтов в приграничном Казахстанско-Кыргызском секторе, необходимо провести комплексное обследование водных источников на территории водного бассейна Шу-Курагаты, в наибольшей степени подвергнутой негативному влиянию со стороны радиационно-опасных промышленных объектов атомной отрасли «Кара-Балта» и «Камышановское».

Учитывая, что Казахстан является мировым лидером по добыче урана и находится в преддверии освоения атомной энергетики, актуальность настоящего проекта, связанного с вопросом безопасности ядерного топливного цикла, не должна вызывать сомнений.

Предложение по решению проблемы экологического риска на территории Казахстанско-Кыргызского сектора

Для решения изложенной выше проблемы нами разработан *проект* по обследованию водных объектов и отдельных, наиболее загрязненных ЕРН и ТЭ, участков на территории трансграничного водного бассейна Шу-Курагаты. Продолжительность работ по проекту – 3 года. *Целью проекта* является комплексная оценка степени влияния радиационно-опасных объектов Кыргызстана на уровень загрязненности ЕРН и ТЭ рек и водохранилищ на территории трансграничного водного бассейна Шу-Курагаты и выработка мероприятий по ограничению негативного воздействия этого загрязнения на здоровье местного населения.

Задачи проекта

Достижение поставленной цели планируется путем решения представленных ниже задач.

Задача 1 Организация и проведение экспедиционных работ.

Решение этой задачи включает в себя следующее:

- составление плана работ и схемы отбора проб, материальное и техническое обеспечение полевых работ;
- определение географических координат и фотографирование местности на намеченных контрольных пунктах (КП);
- измерение значений мощности эквивалентной дозы (МЭД) на намеченных КП;
- отбор, предварительная обработка и упаковка проб воды, донных отложений, почвы и отдельных видов растительности на намеченных КП;
- транспортировка отобранных проб объектов окружающей среды в Институт ядерной физики (ИЯФ).

Задача 2 Изучение содержания и форм нахождения радионуклидов и токсичных элементов в отобранных пробах объектов окружающей среды.

Решение этой задачи включает в себя следующее:

- определение радионуклидного состава отобранных проб почвы и донных отложений на основе метода инструментальной гамма-спектрометрии (ИГС);
- определение элементного состава отобранных проб почвы и донных отложений на основе методов рентгенофлуоресцентного (РФА) и нейтроноактивационного (НАА);
- определение форм нахождения радионуклидов и токсичных элементов в отдельных пробах почвы и донных отложений методом дробного выщелачивания;
- определение содержания и (в отдельных пробах) форм нахождения токсичных элементов в водах различных источников на основе методов НАА, масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плаз-

мой (МС-ИСП) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой (АЭС-ИСП);

- определение радионуклидного состава отдельных проб воды методом радиохимического анализа (РХА).

Задача 3 Статистическая обработка данных, графические построения, интерпретация и опубликование полученных результатов исследования.

Решение этой задачи включает в себя следующее:

- определение фоновых значений содержания отдельных радионуклидов и токсичных элементов на обследуемой территории;
- определение источников и механизмов загрязнения трансграничных рек на обследуемой территории;
- ранжирование водных объектов на обследуемой территории по уровню загрязненности их вод ЕРН и ТЭ;
- изучение и графическое отображение распределения радионуклидов и токсичных элементов в объектах окружающей среды на обследуемой территории;
- апробация полученных результатов исследования на международных конференциях и их опубликование в рейтинговых научных изданиях.

Задача 4 Оценка степени радиационной и химической опасности для населения обследуемой территории и выработка рекомендаций по ее ограничению.

Решение этой задачи включает в себя следующее:

- оценка степени радиационной опасности наиболее загрязненных радионуклидами участков обследуемой территории с учетом полученных данных МЭД и рассчитанных, на основе данных о радионуклидном составе проб почвы и донных отложений, значений мощности поглощенной дозы (МПД);
- оценка степени радиационной и химической токсичности природных вод на обследуемой территории, посредством сравнения данных их радионуклидного и элементного состава с соответствующими санитарными нормативами;
- выработка рекомендаций по мероприятиям, направленным на обеспечение радиационной и химической безопасности населения территории трансграничного водного бассейна Шу-Курагаты.

Методы исследования

Задачами проекта предусмотрено выполнение экспедиционных работ и лабораторных аналитических исследований. Для решения этих задач будет использована методология, разработанная участниками международного проекта «Навруз» и апробированная нами в ходе выполнения многих других аналогичных исследований [26–28].

Полевые работы включают в себя 7 экспедиций. На территории Казахстана будет проведено 4 экспедиции, на территории Кыргызстана – 3 экспедиции.

Экспедиционные работы на территории Казахстана будут выполнены сотрудниками ИЯФ, на территории Кыргызстана – сотрудниками Института биологии и почвоведения Национальной академии Кыргызской Республики (ИБП НАН КР). Работы на территории Казахстана будут проводиться в первые 2 года проекта, весной (период половодья) и осенью (период межени) с целью получения информации о сезонной вариативности состава изучаемых объектов окружающей среды. На территории Кыргызстана эти работы будут выполняться ежегодно в летний период. Основной целью этих исследований является выявление источников и выяснение возможных механизмов загрязнения трансграничных рек. Для решения этих вопросов сведения о сезонной вариативности не имеют определяющего значения. Вместе с тем, такое распределение по срокам проведения экспедиций позволит урегулировать нагрузку работ на аналитическую группу.

Экспедиционные работы будут проводиться в соответствии с заранее разработанным заданием. При этом, при составлении задания на каждую последующую экспедицию, будут учитываться результаты предыдущих экспедиций. Измерение значений МЭД будет проведено с помощью дозиметров-радиометров МКС-АТ1117М на высоте 1 м от поверхности земли. Отбор всех проб объектов окружающей среды будет выполнен в соответствии с нормативными документами, занесенными в Государственный реестр РК.

Пробы почвы будут отобраны близ берега реки на площадке, не подверженной паводкам и хозяйственной деятельности. Отбор производится методом конверта (по 1 точке в середине каждой стороны квадрата и 1 точка – в центре) со стороной 50 м. В каждой точке отбирается поверхностный слой с участка $10 \cdot 10 \text{ см}^2$ и глубиной 5 см. Объединенная из 5 точек проба (не менее 1 кг), после тщательного квартования, помещается в двойной полиэтиленовый пакет и маркируется.

Пробы донных отложений будут отобраны со дна реки на расстоянии в несколько метров от береговой линии. Отбор производится в 5 точках (с интервалом не менее 10 м, вдоль берега) с помощью специального пробоотборника. Объединенная из 5 точек проба тщательно квартуется, высушивается, помещается в полиэтиленовый пакет, который размещается в специальном контейнере. Полиэтиленовый пакет и контейнер маркируются.

Пробы воды будут отобраны не менее, чем в 5-ти точках, на равном расстоянии друг от друга, поперек русла реки. Для этого выбираются места свободные от водорослей и плавающего мусора. Отбор, в зависимости от глубины реки, производится вброд, с помощью плавсредства, либо с мостов. Используется специальный пробоотборник, который погружается в воду на разную глубину (возрастающую от берега к середине русла реки), но не менее 0,5 м.

Объединенная из 5 точек проба (каждая по 1 л) фильтруется через мембранные фильтры 0,3 мкм, консервируется из расчета 3 мл концентрированной HNO_3 на 1 л воды и герметично упаковывается в пластиковый бутыль. Бутыль маркируется. В отдельных случаях (для радиохимического анализа, для изучения форм нахождения примесей) будут отобраны пробы воды объемом до 5 л и даже 10 л.

Отобранные пробы объектов окружающей среды будут доставлены в ИЯФ для выполнения аналитических работ. Методами МС-ИСП и АЭ-ИСП будут определены в пробах воды и отдельных пробах растительности следующие элементы: Na, P, Ca, Cr, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Rb, Sr, Zr, Mo, Sb, Ba, La, Ce, Pb, U. Методом РХА в отдельных пробах воды и растительности будут определены следующие радионуклиды: ^{238}U , ^{234}U , ^{226}Ra , ^{210}Pb , ^{210}Po . Методом ИГС будут определены в пробах почвы и донных отложений следующие радионуклиды: ^{234}Th , ^{226}Ra , ^{214}Pb , ^{214}Bi , ^{210}Pb , ^{228}Ac , ^{224}Ra , ^{212}Pb , ^{212}Bi , ^{208}Tl , ^{235}U , ^{227}Th , ^{40}K , ^{137}Cs . Методами НАА и РФА будут определены в этих же пробах, в общей сложности, следующие элементы: Na, K, Ca, Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, As, Br, Rb, Sr, Y, Zr, Mo, Sb, Cs, Ba, La, Ce, Nd, Pb, Th, U. Представленный перечень определяемых элементов не исчерпывает все возможности используемых методов. В случае необходимости, возникшей в ходе исследований, он может быть расширен. Для выполнения этих работ будет использован атомный реактор ВВР-К, а также современная измерительная аппаратура и программное обеспечение фирм «Canberra» и «Ortec». Все используемые методики занесены в Государственный реестр средств измерения РК.

На основе полученных новых экспериментальных данных о радионуклидном и элементном составе объектов окружающей среды (и их отдельных фракций) будут выполнены дальнейшие работы по статистической обработке данных, графическому построению, интерпретации и опубликованию полученных результатов – Задача 3, а также по оценке степени радиационной и химической опасности для населения обследуемой территории и выработке рекомендаций по ограничению этой опасности – Задача 4. Эти работы будут выполнены согласно требованиям соответствующих нормативных документов и с использованием современного программного обеспечения и ГИС-технологий. Все научные и практические результаты выполненных исследований будут своевременно опубликованы в научных республиканских и международных рейтинговых изданиях. Публикациям будет предшествовать обсуждение результатов и авторского коллектива на научно-техническом совете Центра комплексных экологических исследований ИЯФ МЭ РК.

Экспериментальная часть исследований в значительной степени обеспечена современной аппаратурой, оргтехникой и специальными программами.

Участники настоящего проекта имеют большой опыт работ по изучению и мониторингу радиационной и экологической ситуации в бассейнах различных рек Казахстана. Эти работы выполнялись (и выполняются) в рамках многих международных проектов, республиканских программ и хозяйственных договоров. Квалификация участников проекта позволяет выполнить намеченные исследования собственными силами и в полном объеме.

Ожидаемые результаты и значимость проекта

В ходе выполнения проекта впервые будут получены новые данные о радионуклидном и элементном составе (и формах нахождения ЕРН и ТЭ) объектов окружающей среды (вода, донные отложения, прибрежная и пойменная почва) на всей протяженности трансграничных рек, как на территории Кыргызстана, так и Казахстана. Эти данные позволят выявить источники и установить механизмы загрязнения радионуклидами и токсичными элементами рек на территории Кыргызстана. На основе данных о радионуклидном составе проб почвы будут выявлены и детально обследованы отдельные наиболее загрязненные ЕРН участки на обследуемой территории. По полученным данным будут определены дозовые характеристики и оценена степень опасности для людей, проживающих (либо пребывающих) на этих участках. Воды изученных рек и водохранилищ будут ранжированы по степени их радиационной и химической токсичности. На основе полученных результатов будут подготовлены и переданы в санитарно-эпидемиологические службы рекомендации по мероприятиям, направленным на обеспечение радиационной и химической безопасности населения территории трансграничного водного бассейна Шу-Курагаты, для выработки соответствующих решений. Авторы проекта предполагают также, что результаты запланированных исследований позволят (со значительной степенью вероятности) наметить пути и, возможно, даже выработать технические решения вопроса ликвидации (либо ограничения) процесса загрязнения ЕРН и ТЭ водных объектов и нормализации радиационной и экологической обстановки на обследуемой территории.

Уникальность и социальная значимость проекта выражаются в том, что по полученным результатам впервые будет дано научно-обоснованное заключение о степени влияния радиоактивных отходов промышленных предприятий Кыргызстана (включая одно из самых крупных в Центральной Азии предприятие по переработке урана КГРК «Кара-Балта») на уровень загрязненности ЕРН и ТЭ природных вод и территории трансграничного водного бассейна Шу-Курагаты. Кроме того, будут установлены уровни радиационной и химической опасности этого загрязнения для живых организмов и окружающей среды и выработаны мероприятия по ограничению его влияния на здоровье людей, проживающих на этой территории.

Значимость проекта в международном масштабе, а также его важность и востребованность заключаются в том, что методология обследования территории водного бассейна Казахстанско-Кыргызского сектора, подвергнутой влиянию радиационно-опасных объектов, и полученный практический опыт могут быть использованы для изучения радиационной и экологической ситуации на территориях многих других трансграничных водных бассейнов, например, в Ферганской долине, на стыке 3-х государств: Кыргызстан, Таджикистан и Узбекистан.

Проект имеет большую политическую значимость, поскольку подпадает под определение «природоохранное сотрудничество», которое, следуя мнению авторитетных международных организаций ЮНЕП, ПРООН, ОБСЕ, НАТО, «способствует устойчивому развитию и поддержанию мира».

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе литературных источников и собственных данных выполнен анализ водных проблем в мире и Центральной Азии. Показано, что в настоящее время на Земле сложилась ситуация значительного и стремительно нарастающего дефицита чистой пресной воды, поскольку она распределена неравномерно и подвергнута влиянию многих механизмов техногенного и природного загрязнения. Ситуацию сформировавшегося водного кризиса существенно усугубляет трансграничная специфика административно-географического расположения водных источников. По мнению многих экспертов и политиков, истощение и загрязнение водных ресурсов влечет за собой угрозу глобальной безопасности на Земле.

Показано, что одной из наиболее серьезных водных проблем Центральной Азии, наряду с перечисленными выше, является значительная загрязненность многих рек и водохранилищ естественными радионуклидами (ЕРН) и токсичными элементами (ТЭ). Основными источниками загрязнения этих водных объектов являются многочисленные хвостохранилища добывающих и перерабатывающих предприятий урановой и других видов промышленности, использующих сырье с повышенным содержанием ЕРН и ТЭ. Наиболее выражено эта особенность представлена на трансграничной территории Казахстанско-Кыргызского сектора, водные объекты которого подвергнуты негативному влиянию радиоактивных отходов следующих промышленных предприятий Кыргызстана: месторождение полиметаллов (включая торий) «Ак-Тюз», месторождение урана «Камышановское», крупнейший горно-рудный комбинат по переработке урана «Кара-Балта». Установлено, что в результате такого процесса, на территории этого сектора (особенно, на территории трансграничного водного бассейна Шу-Курагаты) сложилась критическая ситуация острого экологического риска, вызывающая тревогу у местного населения, а также значительную озабоченность научной

общественности и ряда международных организаций.

Для решения выявленной проблемы разработан проект по обследованию водных объектов и отдельных, наиболее загрязненных ЕРН и ТЭ, участков на территории трансграничного водного бассейна Шу-Курагаты. Целью этого проекта является комплексная оценка степени влияния радиационно-опасных объектов Кыргызстана на уровень загрязненности ЕРН и ТЭ рек и водохранилищ на территории этого бассейна и выработка мероприятий по ограничению негативного воздействия этого загрязнения на здоровье местного населения. В итоге выполнения проекта будут получены новые научные и практические результаты, имеющие большую социальную и политическую значимость. Новые научно-обоснованные сведения об источниках и механизмах загрязнения ЕРН и ТЭ водных объектов этого бассейна послужат базовой информацией, необходимой для решения

вопроса нормализации радиационной и экологической обстановки на территории трансграничного Казахстанско-Кыргызского сектора.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Статья подготовлена при поддержке со стороны МОН РК, по проекту № AP05130744 «Изучение радиационной и экологической обстановки на территории трансграничных рек водного бассейна Шу-Курагаты, подвергнутых влиянию промышленных предприятий ядерно-энергетического сектора в Кыргызстане», позволяющей выполнить часть работ, представленных в разделе «Задачи проекта». Авторы благодарят Комитет науки МОН РК за выделенное финансирование и выражают надежду на дальнейшую поддержку, необходимую для выполнения всех исследований, предусмотренных настоящим проектом.

ЛИТЕРАТУРА

1. Данилов-Данильян В.И. Водные ресурсы России и мира // Экология и жизнь. 2009, № 6 (91), с. 48–53.
2. Хасиев Р.С. Вода и мир // Экология и жизнь. 2012, № 6 (127), с. 73–77.
3. Константинов А.П. Экология и здоровье: опасности мифические и реальные // Экология и жизнь. 2012, № 9 (130), с. 82–88.
4. Джамалов Р.Г., Хасиев Р.С. Современная водная дипломатия // Природа. 2011, № 9, с. 44–51.
5. Shestakov F.V. Should we carry war on water? // Bulletin of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan. 2016, v.1, № 359, p. 155–162.
6. Водные ресурсы Казахстана в новом тысячелетии. Алматы, 2004, UNDP, 132 с.
7. Торгоев И.А., Алешин Ю.Г. Экология горнопромышленного комплекса Кыргызстана. Бишкек. Изд. Илим, 2001, 182 с.
8. Vasiliev I.A. Radioecological problems of uranium production. National Academy of Sciences of the Kyrgyz Republic. Institute of Physics. Bishkek, 2006, 106 p.
9. Дженбаев Б.М., Калдыбаев Б.К., Жолболдиев Б.Т. Проблемы радиозологии и радиационной безопасности бывших урановых производств в Кыргызстане // Радиационная биология. Радиозология, 2013. Т.53. №4. С.428–431.
10. Djenbaev B. M. Radioecological Assessment of the Uranium Tailings in Tuyuk-Suu (Kyrgyzstan), Zholbolduev B.T., Zhumaliev. T.N., Voitsekhovitch O.V. // Journal of Geological Resource and Engineering, Volume 3. Number 2. Mar–Apr. 2015. P.89–97.
11. B.M. Djenbaev, B.K. Kaldybaev, B.T. Zholboldiev. – Book title: Radioactive Waste (ISBN 978-953-51-0551-0). 502 pages, April, 2012. Book edited by: Dr. R. O. Abdel Rahman (<http://www.intechopen.com/articles/show/title/>)
12. Копытина М.А. Конфликты водопользования в пределах приграничной территории Казахстанско-Кыргызского сектора // Новости науки Казахстана. Алматы 2015, № 3 (125), с. 75–87.
13. Солодухин В.П., Позняк В.Л., Кабиров Г.М., Степанов В.М., Рязанова Л.А., Габдулин Р.М., Ленник С.Г., Ливенцова А.С., Быченко А.Н., Желтов Д.А. Радионуклиды и микроэлементы в трансграничных реках Казахстана // Вестник КазНУ им. аль-Фараби, серия экологическая. 2014, 1/1 (40), с. 108–113.
14. Solodukhin V., Poznyak V., Kabirova G., Stepanov V., Ryazanova L., Lennik S., Liventsova A., Bychenko A., Zheltov D. Natural radionuclides and toxic elements in transboundary rivers of Kazakhstan // Radiation Protection Dosimetry, 2015, V. 164, N 4, P. 542–547.
15. Торгоев И.А. Экологические последствия катастрофических аварий на хвостохранилищах Кыргызстана. Материалы Международной конференции «Проблемы радиозологии и управления отходами уранового производства в Центральной Азии». Бишкек – Иссык-Куль – «Аврора», 6–9 июня 2011. Бишкек-2011, с. 130–134.
16. Solodukhin V., Poznyak V. Studying the effect of radioactive wastes at the Ak-Tyuz deposit radionuclide and elemental composition of water objects of Kichi-Kemin river // Radiation Protection Dosimetry, 2015, V. 164, N 4, P. 552–555.
17. Кадыржанов К.К., Демехов Ю.В., Солодухин В.П., Позняк В.Л., Кабиров Г.М., Заика М.Ю. Изучение радиационной и экологической обстановки на месторождении урана «Заречное» // Доклады 6-ой Международной конференции «Ядерная и радиационная физика». Алматы, Казахстан, 4–7 июня 2007, с. 67–73.
18. Матвеева И.В. Поведение радионуклидов семейств урана и тория в экосистеме долины реки Шу. Диссертация на соискание ученой степени доктора философии. Алматы, 2013, 136 с.
19. Matveyeva I., Nazarkulova Sh., Satybaldiev B., Uralbekov B., Planinšek P., Jačimović R., Smodiš B., Burkitbayev M. Natural radionuclides in a peat core from the Kamyshanovskoe uranium deposit in Kyrgyzstan // Environmental radioactivity in Central Asia. Almaty, Kazakh University, 2012, p. 123–127.
20. Солодухин В.П., Позняк В.Л., Кабиров Г.М., Степанов В.М., Рязанова Л.А., Габдулин Р.М., Ленник С.Г., Ливенцова А.С., Быченко А.Н., Желтов Д.А. Первые результаты радиационного и экологического обследования рек бассейна

- Тасоткельского водохранилища // Доклады 9-ой международной конференции «Ядерная и радиационная физика». 24–27 сентября 2013 г., Алматы, Казахстан. – С. 306–310.
21. Solodukhin V., Poznyak V., Kabirova G., Stepanov V., Ryazanova L., Lennik S., Liventsova A., Bychenko A., Zheltov D. Studying the radionuclide and elemental composition of water objects in the rivers of the tasotkel water storage reservoir basin // VII Eurasian Conference on “Nuclear Science and Its Application”. Book of abstracts. Baku Azerbaijan. October 21–24, 2014. – P. 344–345.
22. Solodukhin V.P., Poznyak V.L., Kabirova G.M., Ryazanova L.A., Lennik S.G., Liventsova A.S., Bychenko A.N., Zheltov D.A. Radionuclides and toxic chemical elements in the transboundary «Kyrgyzstan - Kazakhstan» rivers // *J Radioanal Nucl Chem.*, 2016, V. 309, C. 115–124.
23. Guidelines for Drinking Water Quality, Fourth Edition, World Health Organization. 2011, 564 p.
24. Солодухин В.П. Радионуклиды и токсичные элементы в трансграничных реках Казахстана – результаты 10-летнего мониторинга // International Scientific Forum NUCLEAR SCIENCE AND TECHNOLOGIES. ABSTRACTS. September 12–15, 2017 Almaty, Republic of Kazakhstan, P. 12.
25. Environment and Security. Transforming risks into cooperation. ISBN: 82-7701-035-4. 2005, UNEP, UNDP, OSCE, NATO, 54 p.
26. Barber D. S., Yuldashev B.S., Kadyrzhanov K.K., Yeleukenov D., Ben Ouagrahm S., Solodukhin V.P., Salikhbaev U.S., Kist A.A., Vasiliev I.A., Djuraev A.A., Betsill J. D., Passell H.D., Tolongutov B.M., Poznyak V.L., Radyuk R.I., Alekhina V.M., Kazachevskiy I.V., Knyazev B.B., Lukashenko S.N., Khajekber S., Zhuk L.I., Dzhuraev An., Vdovina E.D., Mamatibraimov S. Radio-ecological situation in river basins of Central Asia Syrdarya and Amudarya according to the results of the project “Navruz” // Environmental Protection Against Radioactive Pollution. NATO Science Series. IV. Earth and Environmental Sciences. – 2003. – Vol. 33. – P. 39–51.
27. Yuldashev B.S., Salikhbaev U., Kist A.A., Radyuk R.I., Barber D.S., Passell H.D., Betsil J.D., Matthews R., Vdovina E.D., Zhuk L.I., Solodukhin V.P., Poznyak V.L., Vasiliev I.A., Alekhina V.M., Djuraev A.A. Radioecological monitoring of transboundary rivers of Central Asia Region // *Journal of Radioanalytical and Nuclear chemistry.* – 2005. – Vol. 263, № 1. – P. 219–228.
28. Passell H.D., Solodukhin V.P., Khazhekber S., Poznyak V. L., Vasiliev I.A., Alekhina V., Djuraev A., Salikhbaev U.S., Radyuk R.I., Suozzi D., Barber D.S. The Navruz Project: Cooperative, Transboundary Monitoring, Data Sharing and Modeling of Water Resources in Central Asia // *Nuclear Risk in Central Asia.* – Netherlands: Springer Science+Business Media B.V., 2008. – P. 191–199.

«КАЗАХСТАН-КЫРГЫЗСТАН» ТРАНСШЕКАРАЛЫҚ СЕКТОРЫ АУМАҒЫНДАҒЫ ТАЗА СУ МӘСЕЛЕЛЕРІ ЖӘНЕ ОЛАРДЫ ШЕШУ ПЕРСПЕКТИВАЛАРЫ

¹⁾ В.П. Солодухин, ²⁾ Дженбаев Б.М.

¹⁾ ҚР ЭМ Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

²⁾ ҚР ҰҒА Биология және топырақтану институты, Бішкек, Қырғызстан

Әдеби дереккөздер мен өзіндік мәліметтердің негізінде әлемдегі және Орталық Азиядағы су мәселелерін талдау нәтижелері ұсынылды. Қазақстан-Қырғызстан трансшекаралық секторы аумағындағы табиғи сулардың және басқа да қоршаған орта объектілерінің табиғи радионуклидтермен және улы элементтермен ластану деңгейіне Қырғызстанның радиациялық-қауіпті объектілерінің қалдық қоймаларының теріс ықпал ету айғақтары келтірілді. Шу-Қорағаты трансшекаралық су алабының аумағындағы радиациялық және экологиялық жағдайды ядро-физикалық талдау әдістері негізінде зерделеуді және жергілікті халық денсаулығына төнетін қатерлерді шектеу жөніндегі іс-шараларды жасап шығаруды көздейтін жоба ұсынылды.

Түйін сөздер: су, трансшекаралық өзендер, радионуклидтер, улы элементтер, ядро-физикалық талдау әдістері.

PROBLEMS OF CLEAN WATER ON THE TERRITORY OF THE TRANSBOUNDARY SECTOR “KAZAKHSTAN-KYRGYZSTAN” AND THE PERSPECTIVES FOR THEIR SOLUTION

¹⁾ V.P. Solodukhin, ²⁾ B.M. Djenbaev

¹⁾ Institute of Nuclear Physics, ME RK, Almaty, Kazakhstan

²⁾ The Institute of Biology and Pedology Science, KR National Academy of Sciences, Bishkek, Kyrgyzstan

Based on the literature and own data, the results of the analysis of water problems in the world and Central Asia have been provided. Evidence of negative impact of the tailing pools of the radiation hazardous objects of Kyrgyzstan on the level of natural waters and other environmental objects contamination with natural radionuclides and toxic elements in the territory of the Kazakhstan-Kyrgyzstan transboundary sector has been provided. The project has been presented that covers the study of the radiation and environmental situation in the Shu-Kuragaty transboundary water basin using the nuclear-physical methods of analysis and development of the measures to limit the risk to the health of local population.

Key words: water, transboundary rivers, radionuclides, toxic elements, nuclear-physical methods of analysis.

УДК 620.196.19

ЭВОЛЮЦИЯ СТРУКТУРЫ И ФАЗОВОГО СОСТАВА ОБЛУЧЕННОЙ НЕЙТРОНАМИ СТАЛИ 12X18N10T ПОСЛЕ ДЛИТЕЛЬНОГО ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ОТЖИГА

Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е., Кожаметов Е.А., Кукушкин И.М.,
Курбанбеков Ш.Р., Миниязов А.Ж., Букина О.С.

Институт атомной энергии НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

В работе представлены результаты исследования по выявлению и установлению возможных причин различий в структуре и свойствах образцов материала чехла ТВС, экранного типа реактора БН-350 в зависимости от температуры и длительности пост-радиационных испытаний. Установлено, что длительное старение образцов материала чехла ТВС реактора БН-350 до 5000 ч приводит к увеличению концентрации и размера выделений карбидов (типа $Me_{23}C_6$). Сделано предположение, что изменения в микроструктуре: размер зерна, концентрация вторичных выделений, вытеснение карбидов на границы зерен и скопление их на тройных стыках, происходит не только при увеличении температуры испытания в кратковременных промежутках (650–1050 °С изохорный отжиг), но и при длительном воздействии высоких температур (5000 ч, 400 °С, 600 °С, изотермически отжиг).

ВВЕДЕНИЕ

Конструкционные нержавеющие стали аустенитного класса 12X18N10T применялись в качестве материалов для изготовления чехлов (шестигранных труб) тепловыделяющих сборок (ТВС) 1-го, 2-го и 3-го поколений реактора на быстрых нейтронах БН-350. В настоящее время реактор БН-350 выведен из эксплуатации, отработанное топливо (ОЯТ) упаковано в контейнеры и отправлено на долговременное «сухое» хранение.

Роль конструкционных материалов состоит не только в обеспечении их стабильности на весь период эксплуатации тепловыделяющих сборок, но и в удержании внутри твэла продуктов деления топлива вовремя длительно «мокрого» или «сухого» хранения отработавших ТВС (ОТВС). По существу, радиационная и коррозионная стойкость конструкционных материалов являются основными в решении ключевых вопросов безопасности реакторной установки. Учитывая, что контроль или возможность измерения температуры, давления или состояния топливных сборок при хранении не предусмотрены, единственным актуальным методом для оценки состояния топливных сборок остается проведение модельных исследований с облученными материалами и экстраполяция экспериментальных данных на последующие условия хранения ТВС [1–3].

Начиная с 2001 года, в рамках декомиссии реактора БН-350 проводятся комплексные материаловедческие работы, направленные на характеризацию состояния материала чехлов после длительного облучения и хранения [2]. Для определения остаточного ресурса конструкционных сталей ТВС в период длительного хранения ОЯТ были проведены испытания в условиях, имитирующих длительное «сухое» хранение ОЯТ, образцов сталей 12X18N10T отработавших ТВС экранного типа реактора БН-350 [3]. Целью настоящей работы является выявление и установление возможных причин различий в структуре и свойствах образцов материала чехла ТВС эк-

ранного типа реактора БН-350 в зависимости от температуры и длительности пост-радиационных испытаний.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являлись поверхности образцов в форме параллелепипеда с характерными размерами 10×4×0,8 мм, вырезанные из пластин размерами 50×20×2 мм, которые, в свою очередь, вырезались из частей чехловых труб отработанных ТВС реактора БН-350 экранного типа, от центра активной зоны (ЦАЗ). Подробные характеристики выбранных образцов стали приведены в таблице.

Таблица. Характеристики отобранных образцов ОТВС РУ БН-350

Наименование материала	Наработка, эфф. сутки	Φ , 10^{23} см ⁻² (макс. доза, сна)	Мощность реактора, МВт	$T_{вх}$, °С – $T_{вых}$, °С	Макс. скорость набора дозы, 10^{-6} сна/с
ЦЦ-15Т	291,8	1,731 (~48)	650	285 – 290 440 – 450	1,91

Длительные термические испытания образцов материала чехла различных ОТВС реактора БН-350 были проведены в лабораторных муфельных печах SNOL-8,2/1100 при температурах 400 °С и 600 °С в среде воздуха. Продолжительность испытания была условно разделена на три временных промежутка: «кратковременное» испытание длительностью до 10 ч; «среднее» испытание длительностью до 300 ч; «длительное» испытание длительностью до 5000 ч.

Металлографические и электронно-микроскопические исследования выполнялись на шлифах продольных сечений. Приготовление шлифов производилось по общепринятой методике. Металлографические исследования были выполнены на оптическом микроскопе Метам ЛВ-41 при увеличениях 50÷1000 крат, в светлом поле. Электронно-микроскопические исследования проводились на сканирующем электронном микроскопе Tescan Vega3, в ре-

жимах вторичных и отражённых электронов с применением системы энергодисперсионного анализа X-Act. Размер, концентрация и объемная доля выделений определялись по снимкам структуры с 500-кратным увеличением. При помощи дифрактометра Empyrean фирмы PANalytical с использованием Cu K_α -излучения были получены дифрактограммы образцов. Микротвердость образцов была измерена на микротвердомере Q10A+ методом Виккерса при нагрузке 200 г с выдержкой 10 с. На каждом образце проводили по 15–20 измерений с определением среднего значения микротвердости материала и стандартного отклонения.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 1 представлены изображения изменения микроструктуры материала ОТВС центрального типа ЦЦ-15Т в зависимости от продолжительности изотермического испытания. Изображения микроструктуры были получены на оптическом микроскопе в отраженном свете в режиме светлого поля при увеличении $\times 50$ и $\times 1000$ крат.

После кратковременного (10 ч) изотермического отжига при температурах 400 °С и 600 °С существенных изменений в структуре материала чехла ОТВС не наблюдалось. Сохранение структуры материала ОТВС из аустенитной стали 12X18H10T при кратковременных (изотермических) отжигах при температурах вплоть до 650 °С наблюдается также в работе [3]. Из полученных данных следует, что до и после кратковременного отжига образцы имеют минимальный размер зерна (4–6 мкм), соответствующий 12–13 баллу. По границам зерен на облученной стали 12X18H10T были обнаружены карбиды типа Me_{23}C_6 и большая концентрация вторичных выделений в матрице зерен. Также в теле зерна наблюдалось содержание крупных включений правильной геометрической формы, предположительно карбонитридов титана.

Металлографические изображения поверхности отожженных образцов при температуре 400 °С и времени отжига 300 ч показали незначительный рост среднего размера зерен. Рост содержания мелких выделений в зерне наиболее ярко выражен после 300 ч отжига. После 5000 ч изотермического отжига (400 °С) характерной чертой структуры образца является большое число карбидов металлов (хрома), расположенных по границам зерен (рисунок 2, д) и уменьшение концентрации вторичных выделений в матрице зерна. Также зафиксирован рост среднего размера зерен до 14 мкм, что соответствует 10–11 баллу.

Длительное старение при 600 °С до 300 ч привело к увеличению концентрации и размера выделений карбидов (типа Me_{23}C_6), которые преимущественно расположены по границам зерен. Необходимо отметить, что слабыми местами скопления карбидов являются тройные стыки зерен, как видно из рисунка 1, г.

Значительные изменения в структуре (увеличение зерен) материала наблюдается при продолжительности испытаний 5000 ч. Исследования показали рост среднего размера зерен в результате увеличения времени отжига. После испытаний с выдержкой 5000 ч образцы имеют минимальный размер зерна (18–20 мкм), соответствующий 7–8 баллу. Замечено, что при длительном воздействии высоких температур происходит растворение мелких включений в теле зерна, которые уже встречаются эпизодически. Так же выявлено большое количество мелких зерен с рекристаллизованной микроструктурой, не содержащих вторичных выделений.

Авторы работы [4] получали схожие результаты, при температурах испытания от 650 °С до 1050 °С с выдержкой от 10 минут до 1 часа. Таким образом, можно предположить, что схожие изменения в микроструктуре: размер зерна, концентрация вторичных выделений, вытеснение карбидов на границы зерен и скопление их на тройных стыках, происходит не только при увеличении температуры испытания в кратковременных промежутках (650–1050 °С, изохорный отжиг), но и при длительном воздействии высоких температур (5000 ч, 400 °С, 600 °С, изотермически отжиг).

После испытаний (5000 ч, 600 °С) зафиксировано коагуляция карбидов типа Me_{23}C_6 , расположенных по границам зерен, на более крупные, которые уже практически полностью вытеснены на тройные стыки зерен (рисунок 2, в), при этом на границах зерен зафиксирована обеднение Cr, что хорошо наблюдается при картировании поверхности образцов (рисунок 2, е). Интересен и тот факт, что обеднение Cr на границах зерен не наблюдается при времени старении 300 ч, хотя уже при этих условиях наблюдалось образование карбидов на тройных стыках. Можно предположить, что с увеличением времени старения при температуре 600 °С, хром на границах зерен затрачен на коагуляцию крупных карбидов типа Me_{23}C_6 на тройных стыках.

При проведении картирования на образце ОТВС после 5000 ч (600 °С) испытаний на местах образования крупных карбидов типа Me_{23}C_6 зафиксировано высокое содержание Mn (рисунок 2, г). Также были выявлены выделения размерами 2–3 мкм с высоким содержанием титана и никеля (рисунок 2, д, е).

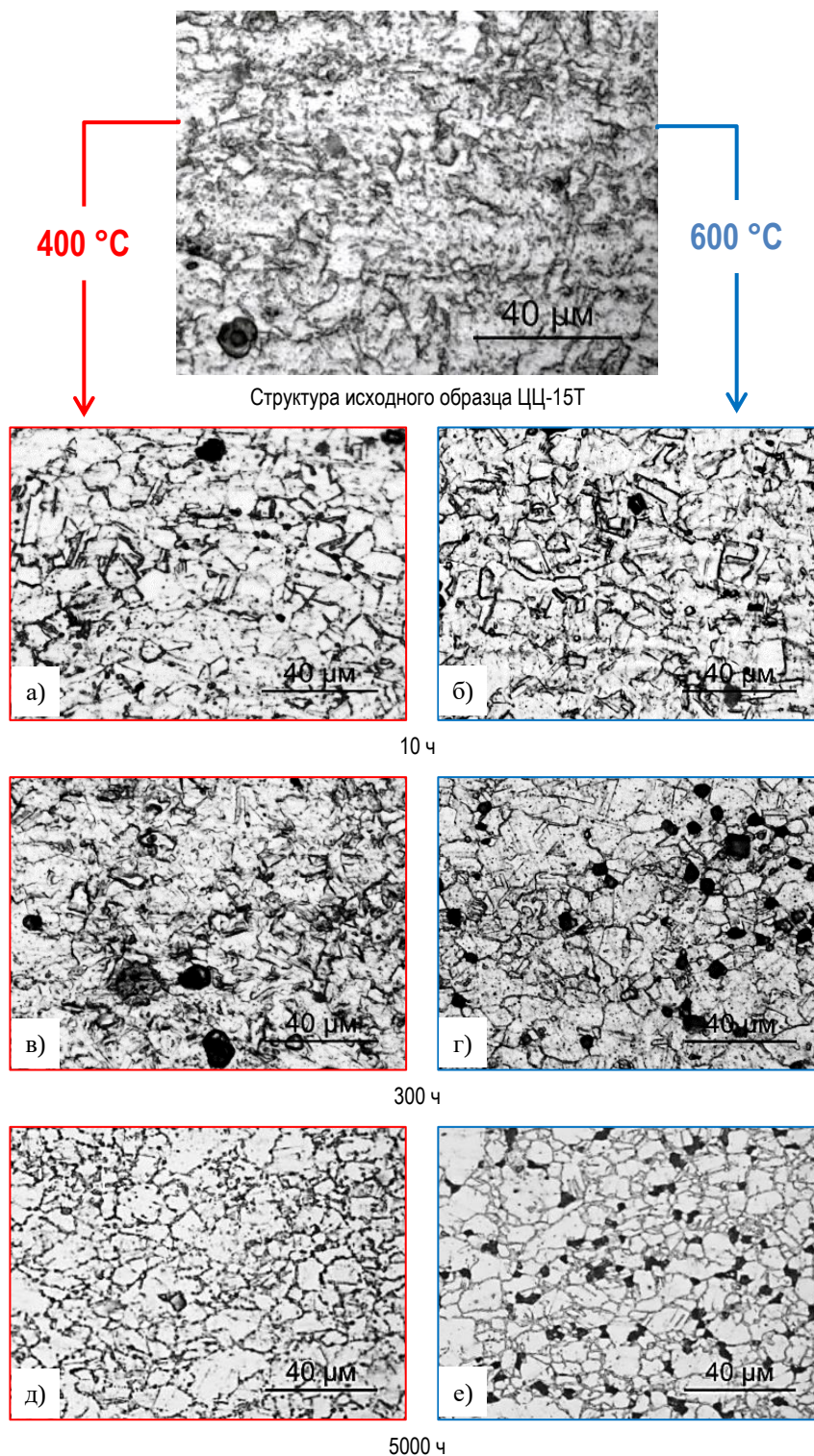


Рисунок 1. Эволюция микроструктуры стали 12Х18Н10Т при изотермическом пострadiационном отжиге

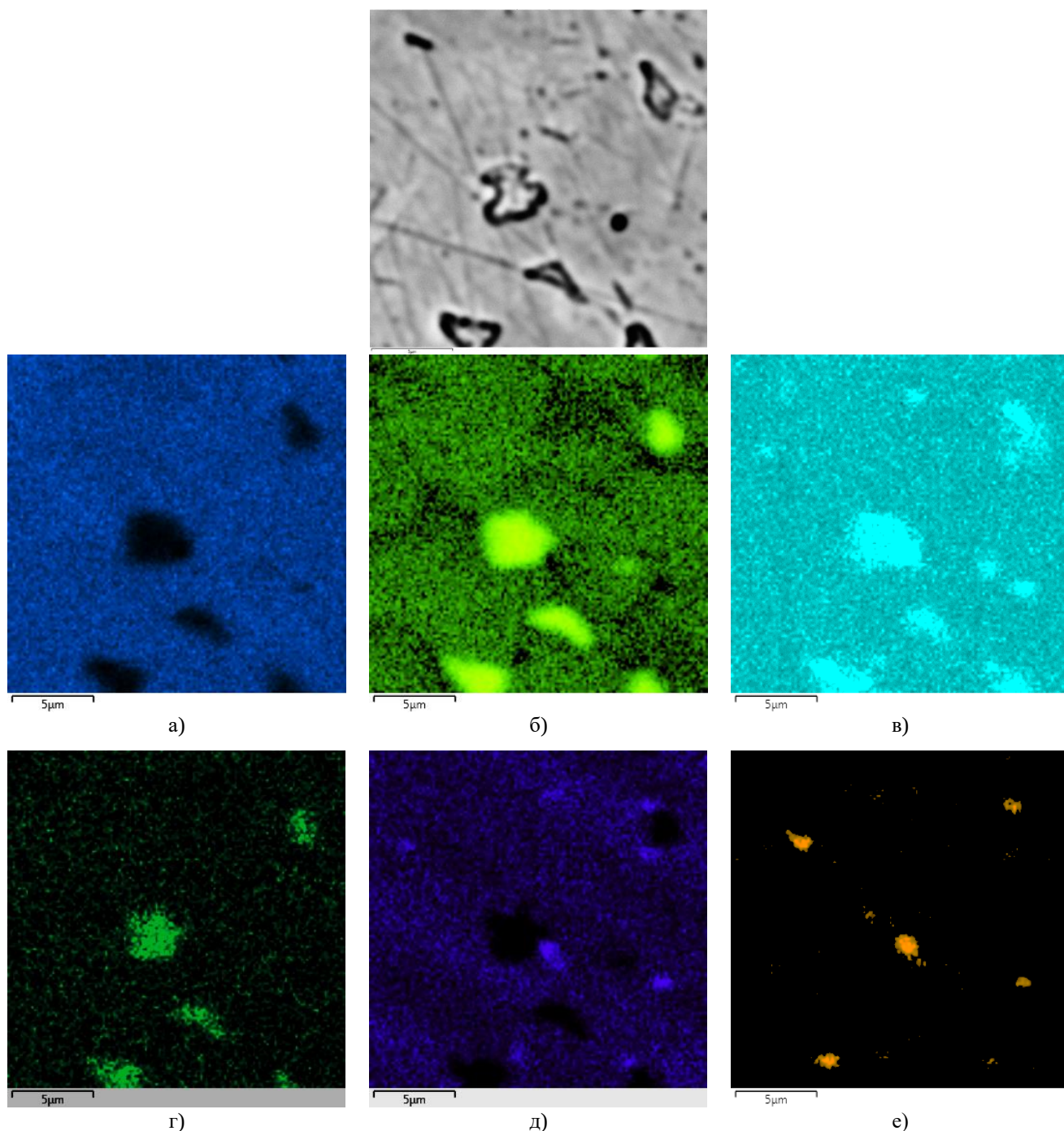


Рисунок 2. Результаты пространственного распределения элементов в образце чехла ОТВС экранного типа ЦЦ-15Т после длительного старения (5000 ч, 600 °С, изотермически отжиг): (а) – Fe; (б) – Cr, (в) – C (г) – Mn, (д) – Ni, (е) – Ti

По результатам рентгеноструктурного анализа фазовый состав образцов представлен одной основной фазой раствора γ -(Fe, Cr, Ni, ...) с ГЦК решеткой (аустенит). Кроме линий основной фазы на дифрактограммах практически всех образцов выявились линии фазы α -(Fe, Cr, Ni, ...) с ОЦК или ОЦТ решеткой (феррит или мартенсит, рисунок 3). Интенсивность линий фазы различна как для разных образцов, так и для двух сторон каждого образца и имеет повышенные значения для образцов, прошед-

ших испытания при 5000 ч без явно выявленной зависимости от температуры.

Следует заключить, что увеличение длительности отжига при 400 °С не приведет к значительной релаксации деформационных дефектов упаковки, но может привести к изменениям параметров решетки аустенитной фазы в случае продолжения распада аустенита с образованием ферритной фазы в приповерхностных слоях материала.

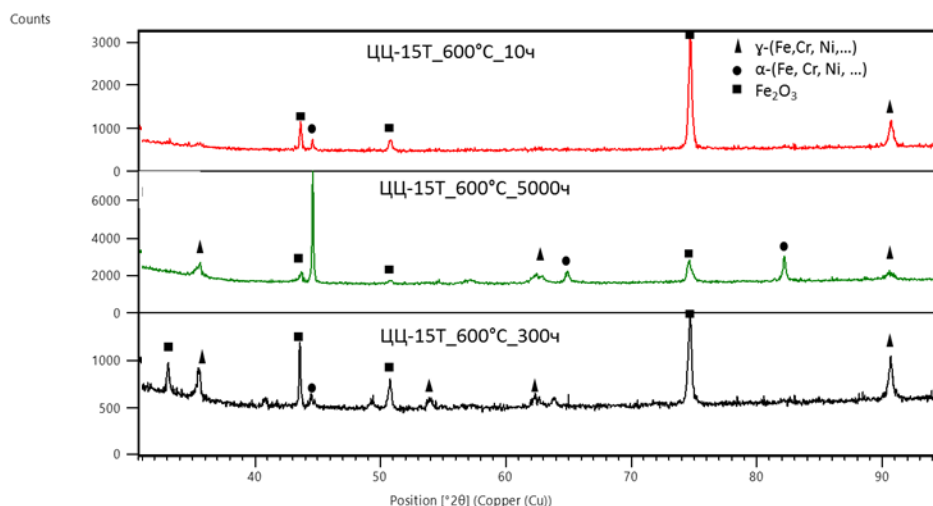


Рисунок 3. Дифрактограммы образцов чехла ТВС ЦЦ-15Т после испытаний в среде воздуха

Увеличение длительности отжига при 600 °С на воздухе должно привести к увеличению слоя окислов на поверхности образцов, окончательному исчезновению ферритной фазы и более полной релаксации деформационных дефектов упаковки в зернах аустенита, которое должно привести к снижению эффективного значения параметра решетки.

Выявить и зафиксировать распределение α -фазы в облученных образцах, после испытаний, с помощью оптического и сканирующего электронного микроскопа было невозможно, так как, по литературным данным, трудность визуальной регистрации α -фазы объясняется ее очень высокой хрупкостью, вследствие чего относительно тонкие пластины α -фазы при приготовлении микрошлифов выкрашиваются [5]. Для детального рассмотрения образования и выявления формы его распределение в образцах ОТВС при длительном старении необходимо пересмотреть методы и подходы пробоподготовки.

Влияние изотермического отжига на микротвердость облученных образцов

Кривая изменения микротвердости облученного стального образца материала чехла ОТВС экранного типа представлена на рисунке 4. На графике совмещены результаты измерений, полученные для образцов после изотермического отжига при температуре 400 °С и 600 °С с длительностью до 5000 ч.

При температуре 400 °С изотермического отжига с ростом длительности времени старения зафиксирована уменьшение микротвердости до 14 %. После времени отжига 300 ч наблюдается некоторое замедление снижения микротвердости, возможно связанные с образованием когерентных мелкодисперсных выделений и карбидов, которые образовались при длительном изотермическом отжиге.

При температуре 600 °С изотермического отжига видно, что падение прироста микротвердости на 68 % произошло уже при выдержке 10 ч. Нужно отметить тот факт, что падение микротвердости до

68 % происходит не при выдержке 10 ч, а уже при нагреве и охлаждении материала (без выдержки). Данный факт был зарегистрирован авторами работ [4]. Последующая выдержка образцов в течение 300 ч приводит к уменьшению значений микротвердости, после увеличения времени выдержки до 5000 ч имеет место небольшое увеличение микротвердости.

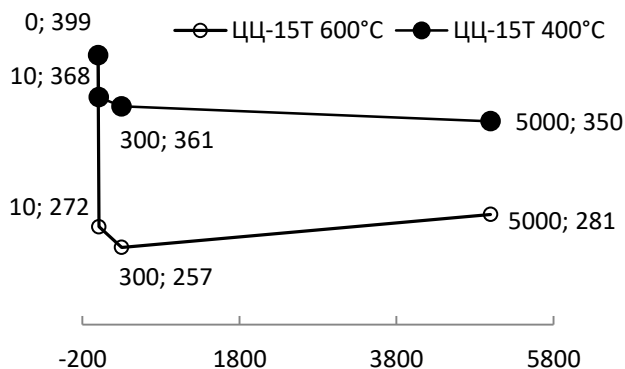


Рисунок 4. Влияние пост-радиационного изотермического отжига на микротвердость облученной стали

Авторы работ [4] при изохронных отжигах (при температуре 1050 °С) получали схожую кривую зависимости микротвердости и предполагали, что основной вклад в упрочнение при повышении температуры вносят строчечные глобулярные карбиды титана и пластинчатые карбиды Me_{23}C_6 , частично когерентные с аустенитной матрицей. Можно предположить, что данное упрочнение происходит не только с увеличением температуры, но и при увеличении времени выдержки до 5000 ч при постоянной (600 °С) температуре отжига.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках данной работы по результатам комплексного материаловедческого исследования проведена сравнительная оценка изменения структуры об-

разцов материала чехла ОТВС экранного типа после длительных термических испытаний при температурах 400 °С и 600 °С в среде воздуха.

После кратковременного (10 ч) изотермического отжига при температурах 400 °С и 600 °С существенных изменений в структуре материала чехла ОТВС не обнаружено. Увеличение продолжительности испытаний до 300 ч приводит к увеличению концентрации и размера выделений карбидов (типа

Me_{23}C_6), которые преимущественно расположены по границам зерен, слабыми местами скопления карбидов являются тройные стыки зерен. При времени длительности изотермического отжига 5000 ч зафиксирована коагуляция карбидов типа Me_{23}C_6 , расположенных по границам зерен, на более крупные, которые уже практически полностью вытеснены на тройные стыки зерен, при этом на границах зерен зафиксировано обеднение Сг.

ЛИТЕРАТУРА

1. Особенности структуры и механических свойств чехлов отработавшей экранной сборки реактора БН-350 // Скаков М.К., Ситников А.А., Бакланов В.В., Яковлев В.И., Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е., Миниязов А.Ж. // Вестник НЯЦ РК. Выпуск 4. Июнь 2016.
2. Различия структуры и свойств поверхностей шестигранного чехла отработавших твс реактора бн-350 // О.П. Максимкин, О.В. Тиванова, Л.Г. Турубарова // Институт ядерной физики НЯЦ РК, г. Алматы, Казахстан.
3. Исследование изменений структуры и физико-механических характеристик аустенитной стали 12Х18Н10Т в результате реакторного облучения и последующего термического воздействия // Скаков М.К., Бакланов В.В., Коянбаев Е.Т. Вестник Государственного университета имени Шакарима города Семей №4 (72) 2015.
4. Исследование чехла экранной сборки Э-26 после 22-летней эксплуатации в реакторе БОР-60 // В.К. Шамардин, З.Е. Островский, А.М. Печерин, В.М. Косенков, В.В. Яковлев, Ф.В. Рисованая. //Сб. докладов V Междотраслевой конференции по реакторному материаловедению. Димитровград, 1998, т. 2, ч. 2, с. 25–40.
5. Исследования микроструктуры и механических свойств стали 08Х18Н10Т после облучения в активной зоне реактора ВВЭР-1000 // В.С. Неустров, В.Г. Дворецкий, З.Е. Островский, В.К. Шамардин, Г.А. Шиманский // ГНЦ РФ НИИАР, г. Димитровград, Ульяновская область, Россия.
6. Исследование радиационно-термической и коррозионной стойкости конструкционных материалов реакторов БН-350 и ВВР-К/ О.П. Максимкин, М.Н. Гусев, А.В. Яровчук // Экспериментальные исследования в области радиационной физики твердого тела, радиационного материаловедения и ядерной физики.– Курчатов.– 2010.– 243 с.
7. Влияние температуры и времени пост-радиационной термообработки на выделения вторичных фаз в облученной нейтронами стали 12Х18Н9Т // Цай К.В., Максимкин О.П., Турубарова Л.Г., Чакров П.В. Институт ядерной физики НЯЦ РК, Алматы, Казахстан.
8. Структура, прочность и радиационная повреждаемость коррозионно-стойких сталей и сплавов // Паршин А.М. // Челябинск «Металлургия Челябинское отделение» // 1988.
9. Crystallography Open Database – an open-access collection of crystal structures / S. Gražulis, D. Chateigner, R. T. Downs, A. F. T. Yokochi, M. Quirós, L. Lutterotti, E. Manakova, J. Butkus, P. Moeck & A. Le Bail.– J. Appl. Cryst.– 2009.– 42.– С. 726–729.
10. Пострадиационные испытания конструкционных сталей – материалов чехлов отработавших ТВС реактора БН – 350// С.Б. Кислицин, А.С. Диков, Д.А. Сатпаев, А.С. Ларионов// 11th International Conference “Interaction of Radiation with Solids”, September 23-25, 2015, Minsk, Belarus.
11. Металлография // К.П. Бунин, А.А. Баранов // Москва, 1970.
12. Исследование особенностей микроструктуры материала отработавшего чехла центральной ОТВС ЦЦ-15Т реактора БН-350. // Скаков М.К., Ситников А.А., Бакланов В.В., Коянбаев Е.Т., Сапатаев Е.Е. // Тезисы докладов VII международной научно-практической конференции, 2016, С. 146.

ҰЗАҚ ИЗОТЕРМИЯЛЫҚ ҚЫЗДЫРУДАН КЕЙІНГІ НЕЙТРОНМЕН СӘУЛЕЛЕНГЕН 12Х18Н10Т БОЛАТТЫҢ ФАЗАЛЫҚ ҚҰРАМЫ ЖӘНЕ ҚҰРЫЛЫМДЫҚ ЭВОЛЮЦИЯСЫ

Е.Т. Коянбаев, Е.Е. Сапатаев, Е.А. Кожаметов, И.М. Кукушкин,
Ш.Р. Курбанбеков, А.Ж. Миниязов, О.С. Бүкина

КР ҰҰО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

Бұл жұмыста, температураға және пост-радиациялық сынақ ұзақтығына тәуелді, экрандық типті БН-350 реакторының ЖБЖ-нің қабықшасы жасалған материал үлгісінің қасиетті және құрылымдық ерекшеліктерінің себептерін анықтап, зерттеу нәтижесі көрсетілген. БН-350 реакторының ЖБЖ-нің қабықшасы жасалған материал үлгісінің ескіруінің ұзақтығы 5000 сағатқа жеткен кезде, карбид (Me_{23}C_6 типті) бөліну көлемі және концентрациясының артуы анықталды. Микрoқұрылымдық өзгерістерінде: түйіршік көлемі, қосалқы концентрация бөлінуі, карбидтерді түйіршік шекарасына ығыстыру және олардың үштік түйісте жиналуы, қысқа мерзімді сынақтың температура артуы кезінде ғана емес (650–1050 °С изохорный отжиг), жоғары температураның ұзақ әсері кезінде де болады (5000 ч, 400 °С, 600 °С, изотермически отжиг).

THE EVOLUTION OF THE STRUCTURE AND THE PHASE COMPOSITION OF 12X18H10T STEEL
IRRADIATED BY NEUTRONS AFTER LONG-TERM ISOTHERMAL ANNEALING

E.T. Koyanbaev, E.E. Sapataev, E.A. Kozhakhmetov, I.M. Kukushkin,
Sh.R. Kurbanbakov, A.Zh. Miniyazov, O.S. Bukina

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

The paper presents the results of a study on the possible causes of differences in the structure and properties of the material samples of the FA's cover (the screen type of the BN-350 reactor), depending on the temperature and duration of the post-radiation tests. It has been established that prolonged aging of the samples of the BN-350 reactor fuel assembly material up to 5000 hours leads to an increase in the concentration and size of carbide precipitates (such as Me_{23}C_6). It is assumed that changes in the microstructure: the grain size, the concentration of secondary precipitates, the displacement of carbides to the grain boundaries and their accumulation at triple junctions, occurs not only with an increase in the test temperature in short-time intervals (650–1050 °C isochoric annealing), and also in long-time exposure to high temperatures (5000 h, 400 °C, 600 °C, isothermally annealed).

УДК 533.9

РАСЧЕТНЫЕ ОЦЕНКИ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ И СКОРОСТЕЙ НАРАБОТКИ ^3H , ^4He В ЛИТИЕВОЙ КПС ПРИ ЕЕ ОБЛУЧЕНИИ НА РЕАКТОРЕ ИВГ.1М

¹⁾ Прозорова И.В., ¹⁾ Скаков М.К., ¹⁾ Тажибаева И.Л., ¹⁾ Понкратов Ю.В., ^{1,2)} Кульсартов Т.В.

¹⁾ Филиал «Институт атомной энергии» НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

²⁾ НИИЭТФ КазНУ им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

В статье приведены результаты расчетов выбора основных параметров ампульного устройства для облучения образцов литиевой КПС; по оценке энергосвечения и скоростей наработки трития и гелия в литиевой КПС при ее облучении на реакторе ИВГ.1М. Актуальность работы обусловлена перспективами использования лития в будущих ТЯР в качестве плазмообращенного материала. Данная работа будет способствовать продвижению литиевых технологий с использованием КПС в современных токамаках и направлена на развитие основ проектирования демонстрационных и коммерческих источников термоядерной энергии будущего. Работа выполнена при поддержке Международного научно-технического центра (Грант № К-2204). Проект «Реакторные испытания литиевых КПС».

ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Одним из напряжённых узлов в термоядерных реакторах является дивертор, без которого пока не просматривается конструкция ни реактора следующего поколения ДЕМО, ни будущих промышленных реакторов. Энергетические нагрузки на пластины дивертора на порядок и более (в случае срывов плазменного шнура) могут превышать нагрузки на первую стенку разрядной камеры.

Как известно, кулоновский барьер дейтерий-тритиевой термоядерной реакции составляет около 100 кэВ. Из этого следует, что для работы токамака необходимо термически изолировать разрядную стенку от горячей плазмы, имеющей температуру миллионы градусов. Основная задача дивертора термоядерной установки — термонизация стенки камеры токамака и предотвращение диффузии примесей в центр плазменного шнура [1, 2]. Для этих целей было предложено использование литиевых капиллярно-пористых систем (КПС) — принципиально нового материала, в котором жидкий литий заключён в матрицу из пористого материала и удерживается силами поверхностного натяжения [3]. На рисунке 1 представлен внешний вид капиллярной пористой системы на основе сеток. На рисунке 2 представлен внешний вид капиллярной пористой системы, смоченной литием [4, 5].

Использование капиллярной пористой структуры (КПС), изготовленной из различных металлов и сплавов, заполненной жидким литием, обеспечит самовосстанавливающуюся поверхность с саморегуляцией расхода лития, поскольку распределение давления лития в КПС сразу реагирует на локальные изменения тепловой нагрузки на поверхность КПС [6].

Все это позволяет снизить нагрузки на материалы лимитера и дивертора токамаков и является в настоящее время наиболее эффективным путем решения материаловедческих и инженерных проблем создания термоядерного реактора.

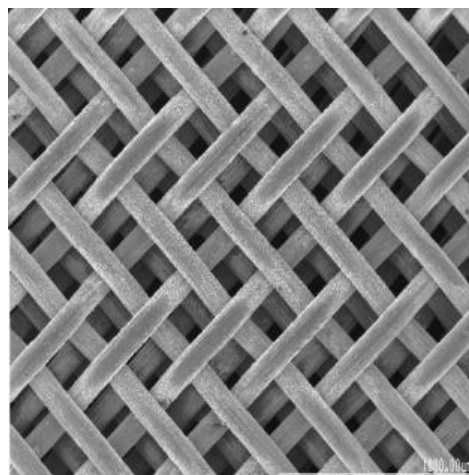


Рисунок 1. Внешний вид капиллярной пористой системы на основе сеток [4, 5]

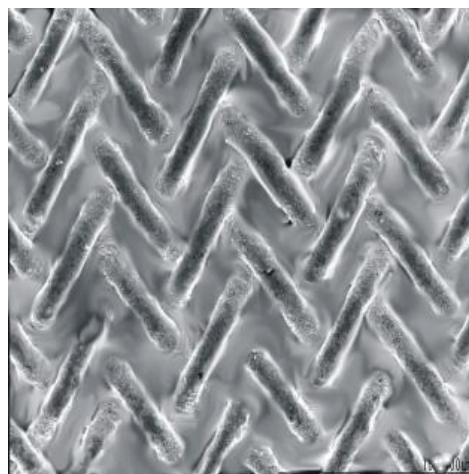


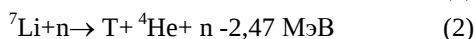
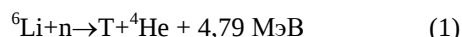
Рисунок 2. Внешний вид капиллярной пористой системы смоченной литием [4, 5]

Целью экспериментов, для которых проводились расчеты, является испытание образцов литиевой КПС при облучении на реакторе ИВГ.1М в присут-

ствии изотопов водорода [7]. Задача расчетного исследования состояла в определении скоростей реакций наработки трития в литневой КПС, а также выборе основных параметров ампульного устройства (АУ), в частности, материального состава, размера устройства, объема исследуемых образцов. В ходе расчетов были проведены оценки энергосвободы литневой КПС при термализации ионов для итогового варианта размещения АУ в канале реактора.

РАСЧЕТНАЯ ЧАСТЬ

Основные реакции на изотопах лития с участием нейтронов, в результате которых образуется тритий следующие:



Общий вид ампульного устройства с основными размерами представлен на рисунке 3.

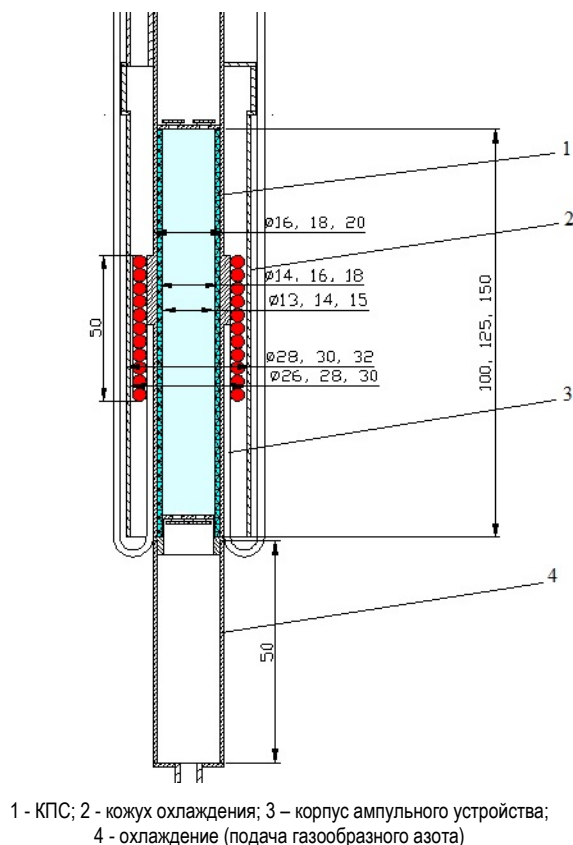


Рисунок 3. Общий вид АУ

Были разработаны схемы проведения нейтронно-физических расчетов для данной конструкции АУ, которые включали оценку скоростей реакции $^6\text{Li}(n, \alpha)^3\text{H}$ для различных возможных цилиндрических геометрий АУ с образцом лития (7,42 % ^6Li) в условиях реакторного облучения. Были определены следующие исходные данные и условия:

1) АУ располагается в центре активной зоны реактора и должно соответствовать размерам ФКЭ (физический канал экспериментальный).

2) Образец КПС с литием должен находиться в герметичном контейнере.

3) Контейнер должен быть снабжен термодатчиками.

4) Система охлаждения контейнера должна обеспечивать возможность поддержания температуры образца КПС не выше 600 °С.

5) Толщина слоя лития в КПС должна обеспечивать максимально возможную для данной конструкции утилизацию тепловых нейтронов.

6) Реактивность, вносимая ампулой с литневой КПС, должна быть такой, чтобы обеспечить работу реактора на мощности 6 МВт не менее 4 часов.

Ниже представлены варьируемые параметры расчета.

Толщина слоя лития в КПС: 0,5; 1; 1,5 мм.

Высота литиевого слоя: 100, 125, 150 мм.

Состав материалов АУ: алюминий, сталь.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ

Расчеты были выполнены с помощью метода Монте-Карло и программы MCNP [8, 9] для ~50 миллионов историй, стандартное отклонение σ для $k_{\text{эф}}$ находится в диапазоне ~0,0015–0,0017, расчетные ошибки для скоростей реакций от 0,15 % до 0,3 %. На первом этапе расчетов была сделана оценка влияния количества ^6Li на реактивность реактора. Литий-6 обладает большим сечением поглощения - микросечение $\sigma(n, \alpha)$ реакции для изотопа ^6Li составляет 945 барн, средняя длина пробега нейтронов λ равна ~23 мм. На рисунке 4 представлена зависимость изменения запаса реактивности реактора от массы ^6Li (100 %) в ФКЭ.

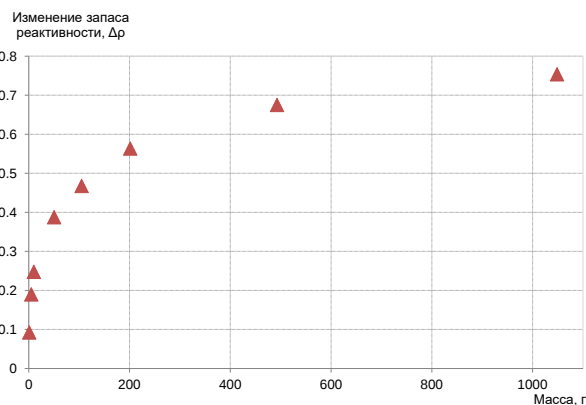


Рисунок 4 Зависимость изменения запаса реактивности реактора от массы ^6Li (100 %) в ФКЭ

Анализируя данный график, следует отметить, что производная или тангенс угла наклона касательной к кривой непостоянны, на начальном участке тангенс больше по абсолютной величине. Видно, что изменение запаса реактивности не является постоянным, зависимость реактивности от массы образца нелинейная. Отдельно следует сказать о существующей зависимости реактивности от геометрии образца, которая не исследовалась в этой задаче.

На втором этапе были рассчитаны скорости наработки трития в образце литневой КПС. Геометрия разбиения образца на расчетные ячейки была выбрана следующим образом: образец, который геометрически представлял из себя цилиндр различной толщины («труба»), разбивался только по высоте на сегменты с шагом 5 мм. В итоге значения скорости реакции получены для каждого сегмента, который представлял из себя цилиндр высотой 5 мм и с различной толщиной (0,5; 1; 1,5 мм). Были получены распределения значений скорости реакции по всей высоте образца.

На рисунке 5 представлены рассчитанные абсолютные скорости реакции наработки трития в объеме расчетной ячейки для образцов литневой КПС различной толщины, нормированные на один нейтрон деления в АЗ реактора (для мощности 1 МВт количество нейтронов деления составляет $\sim 7,835 \cdot 10^{16}$).

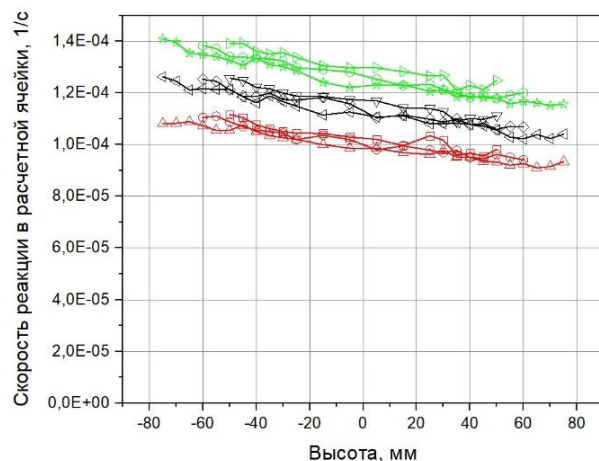
Как видно из рисунков, существует неравномерность в распределении скорости наработки трития по высоте образца, которая в целом отражает существующую неравномерность в нейтронном потоке по высоте АЗ реактора.

Далее для оценки оптимальных размеров образца были проанализированы полученные расчетные зависимости. Прежде всего, по полученным данным были рассчитаны и оценены зависимости абсолютной скорости наработки трития во всем образце от геометрических размеров ячейки: здесь оказалось, что существует практически линейная зависимость абсолютной скорости реакции наработки трития от высоты образца и от площади трубчатого сегмента образца (см. рисунок 6, где приведены данные сравнения для образцов толщиной 0,5 мм), из чего следует что скорость наработки трития в образце пропорционально объему образца.

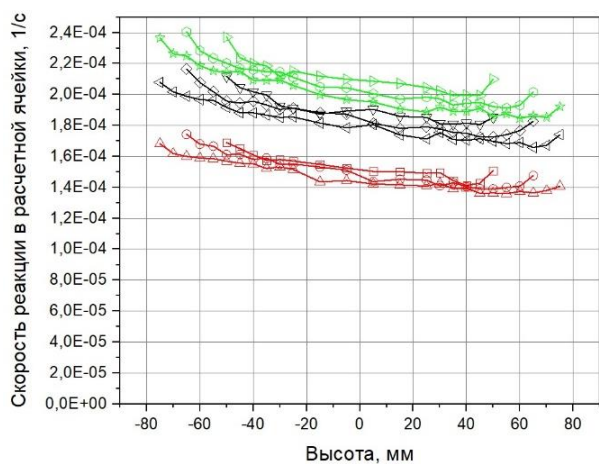
Затем были рассчитаны средние удельные скорости наработки трития в образце и абсолютные скорости наработки трития во всем образце (для всех геометрий).

Как и ожидалось, скорость наработки трития в образце была прямо пропорционально объему образца (для толщин 0,5 мм и 1,5 мм), а также имела несколько неравномерную зависимость для образца толщиной 1 мм. На рисунке 7 приведены скорости реакций наработки трития во всем образце для различных геометрий.

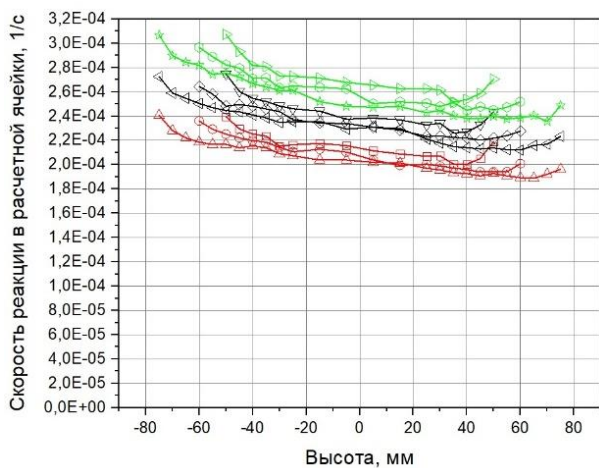
Удельная усредненная скорость наработки трития в образце существенно зависела от толщины образца (чем тоньше образец, тем она была выше). На рисунке 8 представлены средние удельные скорости реакций наработки трития для различных геометрий образца.



а)



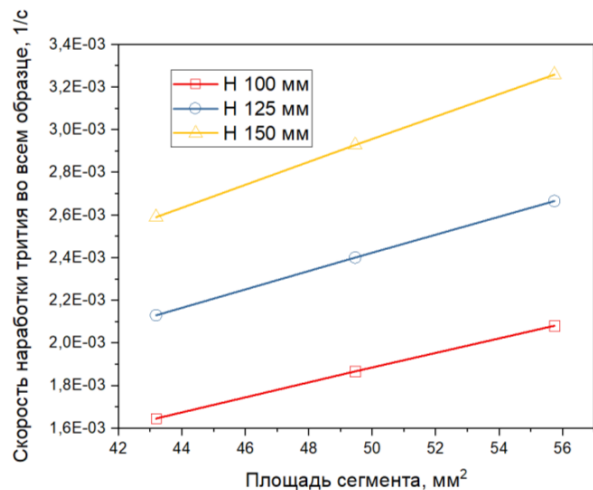
б)



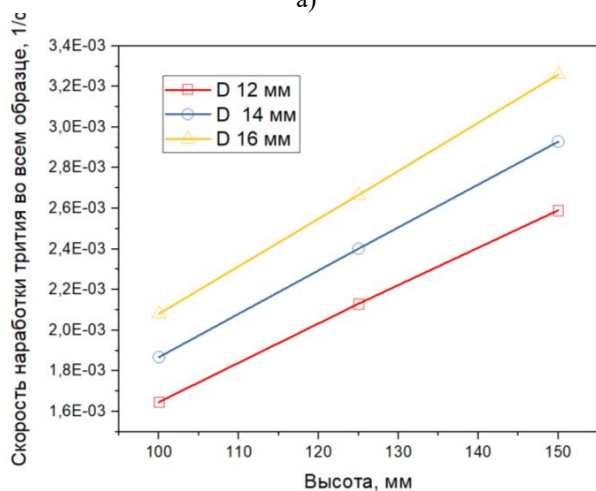
в)

— D 18 мм, H 100 мм — D 16 мм, H 100 мм — D 14 мм, H 100 мм
— D 18 мм, H 125 мм — D 16 мм, H 125 мм — D 14 мм, H 125 мм
— D 18 мм, H 150 мм — D 16 мм, H 150 мм — D 14 мм, H 150 мм

Рисунок 5. Распределение абсолютной скорости реакций наработки трития в расчетной ячейке по высоте образца литневой КПС. Толщина слоя: 0,5 (а), 1 (б), 1,5 мм (в)



а)



б)

Рисунок 6. Зависимости абсолютной скорости реакций наработки трития от геометрических параметров образца литиевой КПС (площади (а) и высоты (б) сегмента) для образцов с толщиной слоя 0,5 мм

Также были выполнены оценки энерговыделения в образце литиевой КПС.

В расчетах было принято, что образец КПС представлял собой сетку из стали X18H10T со слоем природного лития. Сечение ^6Li определяется скоростью нейтрона v по закону $\sigma \sim 1/v$, и достигает 945 барн для тепловых нейтронов. Поскольку лития-6 в природном составе 7,42 %, то для природного лития эффективное сечение составит ~ 70 барн. Энергия реакции составляет 4,78 МэВ и делится на ядро отдачи трития 2,73 МэВ, а на ядро ^4He приходится 2,05 МэВ.

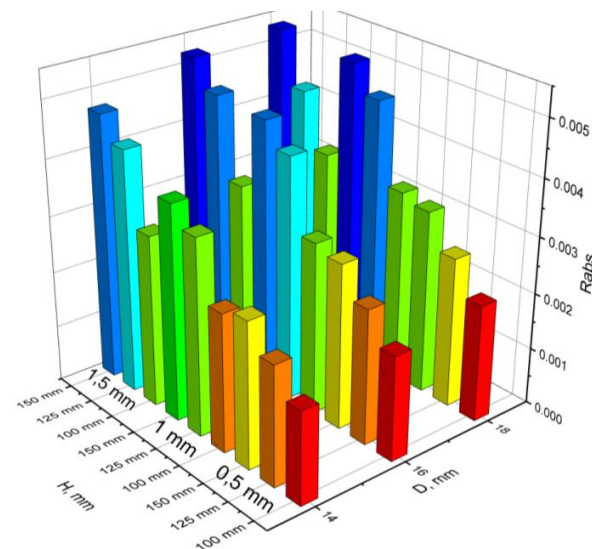


Рисунок 7. Скорости реакций наработки трития во всем образце для различных геометрий

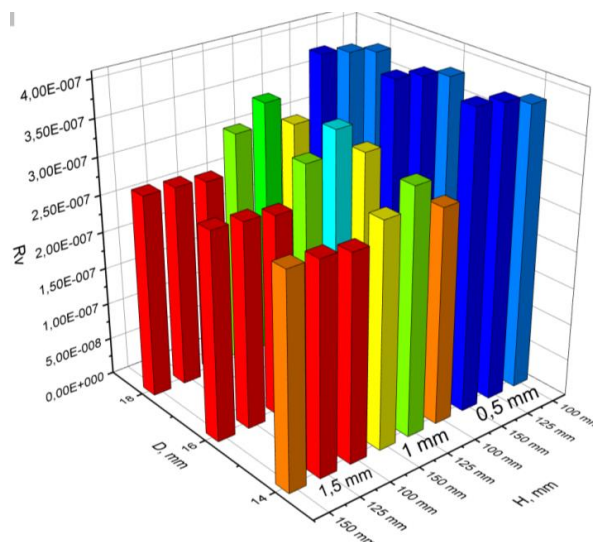


Рисунок 8. Средние удельные скорости реакций наработки трития для различных геометрий образца

В целом энергетический выход реакции синтеза пропорционален плотности потока тепловых нейтронов, облучающих КПС, массе мишени и зависит от формы облучаемого тела – площади поверхности и толщины пластины из литиевой КПС.

В таблице представлено энерговыделение из литиевой КПС для мощности реактора, равной 6 МВт.

Таблица. Энерговыделение для литиевой КПС

Плотность, г/см ³	Объем, см ³	Масса, г	Среднее энерговыделение в литии, Вт/г на 1 МВт реактора		Общее энерговыделение в литии для мощности реактора 6 МВт, Дж
			от нейтронов	от гамма разогрева	
0,267	6,13553	1,64	51,128	0,086	503,39

ВЫБОР КОНСТРУКЦИИ АУ

Результаты проведенных расчетов были в дальнейшем использованы при выборе окончательной конструкции экспериментального ампульного устройства и режимов проведения реакторных пусков.

При выборе конструкции АУ был проведен комплексный анализ, при котором было учтено несколько важных требований:

- по удельной скорости наработки трития в образце литневой КПС (требования определялись исходя из условий, моделирующих условия работы КПС в реальных ТЯР);
- по абсолютной скорости наработки трития в образце литневой КПС (требования определялись исходя из чувствительности системы регистрации трития на стенде «Лиана», для того чтобы достичь целей эксперимента – зафиксировать квазиравновесный поток выделения трития);
- учет возможностей системы контроля и регулировки температуры образца литневой КПС (необходимость ограничить размеры (толщину и высоту) образца с целью снижения температурного градиента, т.е. желательно исследовать образец с небольшими размерами).

В результате комплексного анализа была выбрана конструкция ампульного устройства, чертеж которого показан на рисунке 9.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенных нейтронно-физических расчетов АУ определены скорости наработки трития в образце литневой КПС. Было показано, что существует неравномерность в распределении скорости наработки трития по высоте образца, которая в целом отражает существующую неравномерность в нейтронном потоке по высоте АЗ реактора.

Рассчитанная скорость наработки трития во всем образце зависит от объема образца, она прямо пропорциональна объему образца (для толщин 0,5 мм и

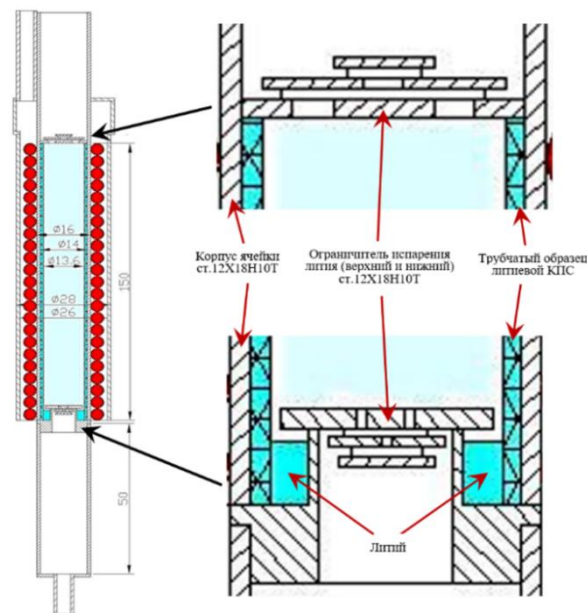


Рисунок 9. Конструкция ампульного устройства

1,5 мм) и имеет несколько неравномерную зависимость для образцов толщиной 1 мм. Удельная усредненная скорость наработки трития в образце существенно зависит от толщины образца, и чем тоньше образец, тем эта скорость выше.

Результаты расчетов были использованы при выборе экспериментального ампульного устройства и режимов проведения реакторных пусков.

Для выбранного варианта АУ определены значения энергосвечения в образце КПС для мощности пуска реактора 6 МВт. В целом энергетический выход реакции синтеза пропорционален плотности потока тепловых нейтронов, облучающих КПС, массе мишени и зависит от формы облучаемого тела – площади поверхности и толщины пластины из КПС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Module of lithium divertor for KTM tokamak / M. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2012. V. 87. Issue 10. P. 1719–1723.
2. Status of design and experimental activity on module of lithium divertor for KTM tokamak / Mikhail Yu. Zharkov [et al.] // Fusion Engineering and Design. 2013. V. 88. Issues 9–10. P. 1862–1865.
3. Физико-химические основы использования лития в жидкометаллических системах термоядерного реактора / И.Е. Люблинский [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез. 2007. Вып. 4. С. 13–44.
4. Experimental and calculated basis of the lithium capillary system as divertor material / N.V. Antonov [et. al.] // J. Nucl. Mater. 1997. V. 241–243. P. 1190–1196.
5. Design, calculation and experimental studies for liquid metal system main parameters in support of the liquid lithium fusion reactor / V.A. Evtikhin [et al.] // www.iaea.org: International Atomic Energy Agency. URL: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/csp_001_c7pdf7ftp_27.pdf.
6. Литий в энергетическом термоядерном реакторе/ И.Е. Люблинский [и др.] // ВАНТ. Сер. Термоядерный синтез, 2006, Вып. 3, с. 3–26.
7. Реакторные комплексы ИГР, «Байкал-1», ВВР-К и перспективы развития на их базе фундаментальных и прикладных исследований / Э.С. Айтхожин, Ф.М. Аринкин, Г.А. Батырбеков [и др.]: препринт НЯЦ РК-00-12. – Курчатов, 2000. – 75 с.
8. Briesmeister, J. F. MCNP – a general Monte-Carlo Code for neutron and photon Transport / J.F. Briesmeister [et al.]. – Los Alamos, 1997. – LA-7396M.
9. MacFarlane, R.E. New Thermal Neutron Scattering Files for ENDF/B-VI Release 2. – Los Alamos, 1994. – LA-12639-MS.

**ЛИТИЙ ККЖ ИВГ.1М РЕАКТОРЫНДА СӘУЛЕЛЕНДІРУ КЕЗІНДЕ ^3H , ^4He АТҚАРЫМ
ЖЫЛДАМДЫҚТАРЫНЫҢ ЖӘНЕ ЭНЕРГИЯСЫН БӨЛҮДІҢ ЕСЕПТІК БАҒАЛАУЛАРЫ**

¹⁾ И.В. Прозорова, ¹⁾ М.К. Скаков, ¹⁾ И.Л. Тажибаева, ¹⁾ Ю.В. Понкратов, ^{1, 2)} Т.В. Кульсартов

¹⁾ ҚР ҰАО «Атом энергиясы институты» филиалы, Курчатов., Қазақстан

²⁾ Әл-Фараби атындағы ҚазҰУ Эксперименттік және теориялық физика
ғылыми-зерттеу институты, Алматы, Қазақстан

Мақалада литий ККЖ үлгілерін сәулелендіру үшін ампульдік құрылғының негізгі параметрларын таңдау бойынша есептік зерттеулердің нәтижелері; литий ККЖ ИВГ.1М реакторында сәулелендіру кезінде тритий және гелий иондарының атқарымдар жылдамдықтарын және энергияны бөлуді бағалау келтірілді. Жұмыстың маңыздылығы плазмаға айналдырылған материал ретінде келешек ТЯР литийді пайдалану келешектерімен келісілген. Осы жұмыс қазіргі токамактарда ККЖ пайдаланумен литий технологияларын ілгері бастыруға мүмкіндік береді және келешек термоядролық энергияның демонстрациялық және коммерциялық көздерін жобалау негіздерін дамытуға бағытталған.

Жұмыс Халықаралық ғылыми-техникалық орталықтың қолдауында орындалды (Грант № К-2204). «Литий ККЖ реакторлық сынақтары» жобасы.

**CALCULATED ESTIMATES OF ENERGY RELEASE AND RATES OF ^3H , ^4He
PRODUCTION IN LITHIUM KPS WITH IRRADIATION AT THE REACTOR IVG.1M**

¹⁾ I.V. Prozorova, ¹⁾ M.K. Skakov, ¹⁾ I.L. Tazhibayeva, ¹⁾ Yu.V. Ponkratov, ^{1, 2)} T.V. Kulsartov

¹⁾ Branch “Institute of Atomic Energy” NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

²⁾ Scientific Research Institute of Experimental and Theoretical Physics
of Al-Farabi KazNU, Almaty, Kazakhstan

The article presents the results of computational studies on the selection of the main parameters of an ampoule device for irradiating samples of lithium CPS; estimates of energy release and rates of the production of tritium and helium ions in lithium KPS when it is irradiated at the reactor IVG.1M. The urgency of the work is due to the prospects for using lithium in future TIR as a plasma-converting material. This work will promote the promotion of lithium technologies using KPS in modern tokamaks and directed at developing the basics of designing demonstration and commercial sources of future fusion energy.

The International Science and Technology Center (Grant No. supported the work K-2204). Project “Reactor tests of lithium-ion-cooled batteries”.

УДК 533.9.082

ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЫ НА ЭРОЗИЮ ПОВЕРХНОСТИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Молдабеков Ж.М., Жукешов А.М., Габдуллина А.Т., Амренова А.У., Серик К.

Казахский национальный университет им. аль-Фараби, Алматы, Казахстан

Установка термоядерного реактора типа «Плазменный фокус» (ПФ-30) используется в качестве испытательного стенда для моделирования разрушения материалов за счет эрозии, потому что плотность энергии потока плазмы и продолжительность разряда того же порядка, что и в ИТЭР. Установка ПФ-30 использовалась для испытания материалов при плотностях энергии до 230 Дж/см^2 . В данной работе представлены результаты исследований материалов элементного состава: Fe-79 %, C-19 %, Si-1 %, Fe-68 %, Cr-14 %, Mn-8 %, C-7 %, Si-1 % и Ti-90 %, Al-6 %, O-2 %, S-1 %. Была экспериментально определена зависимость эрозии данных материалов от плотности энергии плазменного потока. По результатам максимальное значение эрозии материалов составляет $0,2 \text{ мкм}$ на Дж/см^2 .

Ключевые слова: плазменный фокус, эрозия, кратер, толщина, потеря массы.

ВВЕДЕНИЕ

Одной из актуальных задач физики плазмы является исследование стойкости материалов первой стенки, дивертора и других узлов термоядерного реактора к воздействию горячей плазмы. На сегодняшний день перспективными материалами для строящегося реактора ITER считаются вольфрам, графит и сплавы на основе ванадия. Для имитации срывов плазмы на стенку необходимо иметь источники плазмы, обеспечивающие потоки с высокой плотностью мощности. Для этой цели наиболее подходят установки типа «Плазменный фокус», генерирующие плазму с энергией ионов до нескольких кэВ [1]. В этом направлении проводится широкий круг исследований, в том числе изучение эрозии поверхности материалов при воздействии импульсных плазменных потоков различной плотности энергии и состава [2].

Среди материалов, рассматриваемых как перспективные для использования в энергонагруженных частях термоядерных установок (как в конструктивных узлах, так и в качестве обращенных к плазме элементов), важное место занимают нержавеющие стали [2–5]. Различные марки нержавеющей стали уже испытаны как альтернативные материалы деталей конструкции реактора, испытывающие прямое воздействие мощных импульсных потоков плазмы [6, 7] и быстрых ионных пучков [1]. Как конструкционные материалы эти стали исследованы для использования в различных радиационных установках, включая сильноточные пинчевые установки, а также камеры термоядерных реакторов (ТЯР) с инерциальным и магнитным (ТОКАМАК и стелларатор) удержанием.

При импульсном облучении этих материалов важное место уделяется изучению эрозии первой стенки ТЯР, а также исследованию процесса диффузии газа, имплантированного в материал [6].

ТЕХНИКА ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТА

Установка «Плазменный фокус» (ПФ-30) является экспериментальным термоядерным реактором «ПФ-30», который состоит из камеры ПФ мейзеровского типа ($a_2/a_1 > 1$), емкостного накопителя энергии, высоковольтного разрядника и коаксиальных проводов. Термоядерный реактор состоит из разрядной камеры плазменный фокуса, емкостного накопителя энергии, высоковольтного разрядника и токоподводов. В качестве емкостного накопителя энергии используется конденсаторная батарея из 24 конденсаторов ИК-50 с напряжением 30 кВ и суммарной емкостью 72 мкФ. Рабочее напряжение в эксперименте меняется в диапазоне 7–30 кВ, что соответствует изменению энергии от 10 до 240 кДж. В описываемых экспериментах в качестве плазмообразующего газа использовали водород [2–3].

Для реактора ПФ-30 была разработана новая электродная система. Внешний электрод представляет собой «беличье колесо» с диаметром 12 см, а внутренний электрод – цилиндр диаметром 2,5 см. Наружный электрод состоит из 6 цилиндрической формы стержней, расположенных по кругу, на расстоянии 2–3 см от центра (рисунок 1, а). Поджиг осуществляется через управляемый вакуумный разрядник, показанный на рисунке 1, б. Разряды проводили в среде остаточного вакуума при давлении $0,05 \div 0,1 \text{ Торр}$.

Результаты экспериментов и расчеты показали, что разрядный ток установки ПФ-30 при использовании 18 конденсаторов ИК-50 составляет максимум 1,24 МА при напряжении 24 кВ.

В каждом эксперименте по облучению мишеней потоками плазмы осуществляли контроль плотности энергии Q , поглощенной образцом. Для этих целей использовали калориметры. Зная площадь поверхности S , подвергавшейся воздействию плазмы, массу m , удельную теплоемкость материала калориметра c и изменение его температуры ΔT , можно определить $Q = cm\Delta T/S$ [1]. Данные экспериментов с раз-

ной плотностью энергии представлены на рисунке 2. Из рисунка видно смещение области сжатия пучка плазмы вдоль оси системы. Так, при напряжении 7÷14 кВ область сжатия формируется на расстоянии 7–8 см от торца внешнего электрода, тогда как при 18÷24 кВ фокусировка наблюдается на 5 см. Обращает на себя внимание тот факт, что при 5 и 17 кВ сжатия плазмы практически не происходит.



а)



б)

Рисунок 1. Электродная система (а) ПФ-30 и вакуумный разрядник (б)

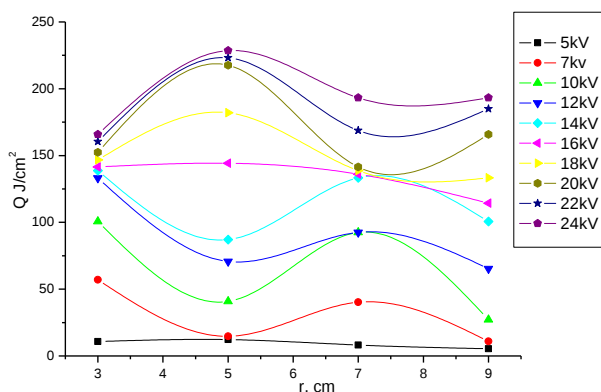


Рисунок 2. График изменения плотности энергии от расстояния при различных значениях напряжения

После взаимодействия плазмы с материалом поверхность стальных образцов была исследована на оптическом и электронном сканирующем микроскопах. Потери массы за счёт эрозии и выброса частиц с поверхности определяли путём взвешивания мишеней на микроаналитических двухдиапазонных весах типа CPA225D до и после облучения. Точность взвешивания составляла 0,009 г при массе образца до 0,466 г.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве мишеней использовали плоские квадратные пластины размерами 1×1 см из титана, углеродистой и нержавеющей сталей. Для устранения краевых эффектов размеры образцов выбирались таким образом, чтобы они полностью перекрывали плазменный поток. Образцы подвергали серии плазменных воздействий на установке ПФ-30. Тепловую нагрузку Q в каждом образце постепенно увеличивали от 10 до 230 Дж/см². Облучение мишеней осуществляли при нормальном падении плазменного потока на поверхность. Для корректировки эксперимента после каждого воздействия образец мишени извлекался из рабочей камеры установки для измерения потерь массы и проведения анализа методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеноспектрального анализа (РСА).

Гистограммы удельных потерь массы мишеней от тепловой нагрузки показаны на рисунке 3, а. Наиболее быстро убывает масса образцов углеродистой стали – для них потери массы монотонно возрастают до 0,48 г/см² за одно плазменное воздействие в интервале тепловых нагрузок $Q = 10 \div 230$ Дж/см². В этом же интервале потери массы образца нержавеющей стали оказываются минимальными и на 1,5–2 порядка меньше, чем для углеродистой стали. При $Q = 217$ Дж/см² они составляют всего 0,34 г/см² за воздействие.

Зная плотность материала мишени ρ , потери массы Δm и диаметр плазменного потока d , можно определить среднюю скорость эрозии [5] за импульс

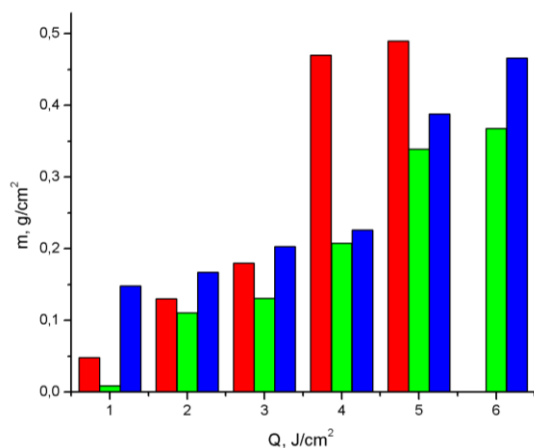
$$\Delta h = \frac{4\Delta m}{\pi \rho d^2}.$$

Как видно на графике, наиболее быстро эродирует углеродистая сталь. При тепловой нагрузке $Q = 230$ Дж/см² с ее поверхности удаляется слой вещества толщиной 0,46 мкм за воздействие. Меньше всего подвержен эрозии титан – при той же плазменной нагрузке скорость эрозии этого материала составляет 0,37 мкм/импульс. Наиболее близким по скорости эрозии к титану оказывается нержавеющая сталь, толщина которой уменьшается за одно облучение на величину порядка 0,4 мкм при тепловой нагрузке $Q = 230$ Дж/см².

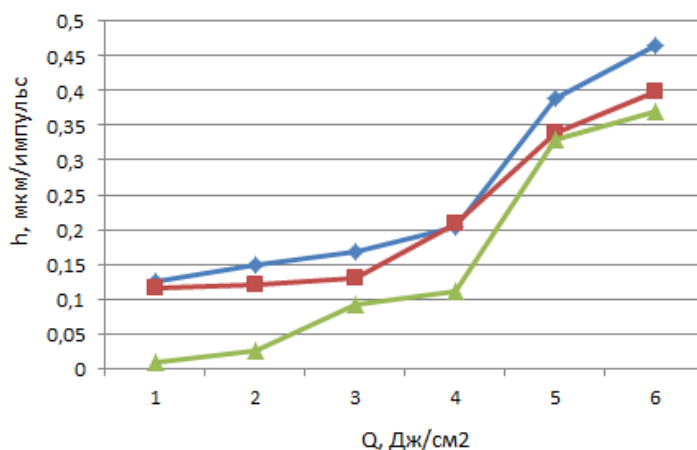
Исследование образцов после проведения эксперимента показало, что в процессе облучения происходило распыление, плавление и испарение их поверхностных слоев. Оплавленная поверхность, как

правило, имела волнообразный рельеф и содержала различные структурные дефекты: типа кратеров, наплывов, капель, пор, микротрещин и др. Ниже рассмотрены особенности повреждаемости и изменения топографической структуры поверхности облученных сталей в зависимости от их типа и от условий облучения. На рисунке 4 (а, б, в) показаны фотографии сканирования электронным пучком облученных участков поверхности образцов сталей состава Fe-79 %, C-19 %, Si-1 %, Fe-68 %, Cr-14 %, Mn-8 %, C-7 %, Si-1 % и титанового сплава Ti-90 %, Al-6 %, O-2 %, C-1 %, полученные с помощью растрового электронного микроскопа Quanta 200i 3D.

На рисунке 4 (г, д, е) показаны результаты исследования поверхности образцов на АСМ после многократного плазменного воздействия. Для более глубокого изучения изменения рельефа поверхности образцов углеродистой стали в зависимости от кратности плазменного воздействия ($Q = 217 \text{ Дж/см}^2$ после 1, 3, 5 и 10 кратного облучения) были получены графики, представленные на рисунке 5.



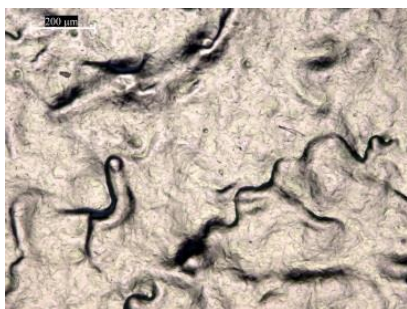
а)



б)

Рисунок 3. Удельные потери массы (а) и скорость эрозии (б) в зависимости от плотности энергии:

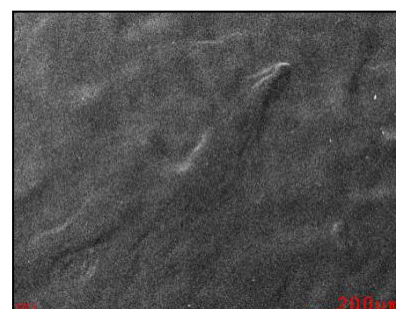
♦ – образцов углеродистой стали; ▲ – титана; ■ – нержавеющей стали



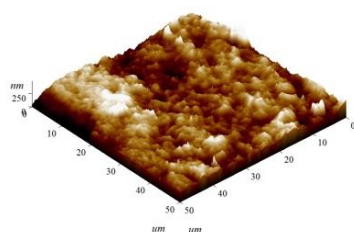
а)



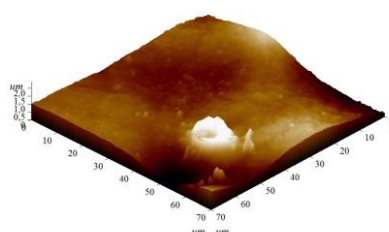
б)



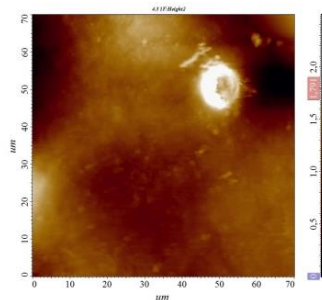
в)



г)



д)



е)

Рисунок 4. Микроструктура поверхности образцов (а, б, в) и результаты АСМ-анализа образцов после воздействия плазмы (г, д, е)

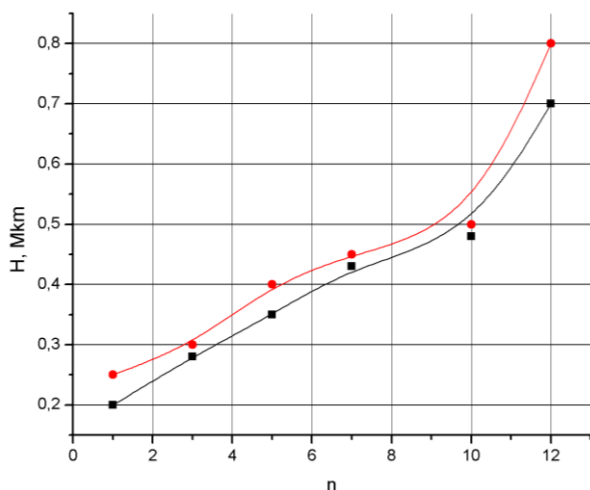


Рисунок 5. Максимальная и средняя глубина кратера на поверхности образцов в зависимости от кратности плазменного воздействия: ● – максимальная глубина; ■ – средняя глубина

Исследования АСМ показали, что под действием плазменного потока материал начинается плавиться и на поверхности образца образуются кратеры, по которым можно судить о интенсивности процесса эрозии. Например, при увеличении кратности воздействия ($Q = 217 \text{ Дж/см}^2$) параметр H , показывающий глубину образующегося кратера, растёт, как и его площадь.

На основании проведенных исследований АСМ-методом была найдена зависимость глубины кратера [5, 7] на поверхности образца углеродистого сталя от кратности плазменного воздействия при фиксированной тепловой нагрузке ($Q = 217 \text{ Дж/см}^2$).

Как видно из графика, глубина кратера почти линейно зависит от кратности облучения, и при $Q = 217 \text{ Дж/см}^2$ средняя скорость эрозии равна $0,2 \text{ мкм}$ за воздействие.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе исследовалась эрозия образцов титанового сплава, углеродистой и нержавеющей сталей под действием потоков плазмы с плотностью энергии $10 \div 230 \text{ Дж/см}^2$. Показано, что основным параметром, определяющим скорость эрозии металлов, являются удельные потери массы на поверхности материалов. Путем взвешивания на весах образцов до и после обработки плазмой, определена зависимость плотности энергии импульсной плазмы от эрозии. В результате проведенных исследований было обнаружено, что в момент уменьшения радиуса плазменного пучка плотность энергии плазмы увеличивается, и на поверхности материала появляется расплавленный слой, который вызывает утончение толщины образцов. В исследованном диапазоне плотностей энергии плазмы значения удельных потерь массы материала мишени на порядок превосходят эрозию, связанную с выбросом капель. При этом скорость эрозии сначала остаётся постоянной (близкой для всех металлов), а с увеличением плотности энергии резко возрастает. Анализ топографии поверхности исследуемого материала показал, что в согласии с таким результатом глубина кратеров, образуемых в процессе эрозии, растёт пропорционально кратности воздействия плазмы.

ЛИТЕРАТУРА

1. А.М. Жукешов Исследование импульсного разряда высокой мощности. Алматы: Казак университеті, 2014. – 157 с.
2. Жукешов А.М., Ибраев Б.М., Гиниятова Ш.Г., Амренова А.У. Разработка разрядной камеры экспериментальной установки «Плазменный фокус». Вестник ЕНУ. – 2016. – №2. – С. 386-389.
3. Жукешов А.М., Ибраев Б.М., Усеинов Б.М., Молдабеков Ж.М., Серик К., Ерлан С. Разработка узлов экспериментального реактора «Плазменный Фокус» // Сб. тез. 9-ой Межд. научн. конф. «Современные достижения физики и фундаментальное физическое бразование» – Алматы. – 2016. – С. 103.
4. А.М. Жукешов, Габдуллина А.Т., Амренова А.У., Молдабеков Ж.М., Фермахан К. Структура нержавеющей стали после воздействия импульсных плазменных потоков // Взаимодействие излучений с твердым телом: материалы 12-й Междунар. конф., Минск, Беларусь, 19–22 сент. 2017 г. / – Минск: Изд. Центр БГУ, 2017. – С. 239–241.
5. И.М. Позняк, Н.С. Климов, В.Л. Подковыров, В.М. Сафронов, А.М. Житлухин, Д.В. Коваленко. Эрозия металлов при воздействии интенсивных потоков плазмы // ВАНТ. сер. Термоядерный синтез, 2012, вып.4. стр. 23–33.
6. В.Н. Пименов, В.А. Грибков, Л.И. Иванов, Е.В. Демина, С.А. Масляев, А.В. Дубровский, М. Шольц, Р. Миклашевски, Ю.Э. Угаст, Б. Колман. Экстремальные импульсные воздействия энергии на малоактивируемые аустенитные стали // ВАНТ. 2005. № 3. Серия: Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение (86), с.144–150.
7. H. Bolt, V. Barabash, A. Gervash, J. Linke, L.P. Lu, I. Ovchinnikov, M. Rodrig. Disruption simulation experiments in a pulsed plasma accelerator-energy absorption and damage evolution on plasma facing materials // Fusion technology 1994. Volume(1), p.387–390.

ИМПУЛЬСТЫ ПЛАЗМАНЫҢ МЕТАЛДЫ МАТЕРИАЛДАРДЫҢ БЕТТІК ЭРОЗИЯСЫНА ӘСЕРІ

Ж.М. Молдабеков, А.М. Жүкешов, А.Т. Габдуллина, А.У. Амренова, К. Серик

Әл-Фараби атындағы Қазақ ұлттық университеті, Алматы, Қазақстан

Плазмалық фокус типті термоядролық реактор қондырғысы материалдардың күйреуін моделдеуде қолданатын сынамалы стенд болып табылады. Себебі мұндай қондырғылар плазмадағы энергия ағынының түсуі мен разрядтың ұзақтылығы бойынша ХТЭР (ИТЭР) аналогты түрі болып табылады. ПФ-30 қондырғысы, плазма ағынының энергиясы 230 Дж/см^2 дейін материалдарды сынақтан өткізе алады. Аталған жұмыста Fe-79 %, C-19 %, Si-1 %, Fe-68 %, Cr-14 %, Mn-8 %, C-7 %, Si-1 % және Ti-90 %, Al-6 %, O-2 %, C-1 % материалдарды зерттеу нәтижелері ұсынылған. Материалдардың эрозиясы плазманың энергия тығыздығына тәуелділігі тәжірибе жүзінде зерттелді. Нәтижеде материалдардың максималды эрозиясы Дж/см^2 0,2 мкм тең болды.

Кілттік сөздер: *плазмалық фокус, эрозия, кратер, қалыңдық, массалардың азаюы.*

THE INFLUENCE OF PULSED PLASMAS ON EROSION OF THE SURFACE OF METAL MATERIALS

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

Al-Farabi Kazakh National University, Almaty, Kazakhstan

Plasma focus are used as test beds for disruption simulation experiments on plasma facing materials, because the incident energy fluxes and the discharge duration are similar order as those expected during disruptions in ITER. The PF-30 facility was used for the testing of materials under incident energies up to 230 J/cm^2 .

In this work have been tested Fe-79 %, C-19 %, Si-1 %, Fe-68 %, Cr-14 %, Mn-8 %, C-7 %, Si-1 % and Ti-90 %, Al-6 %, O-2 %, C-1 % materials. From the experimental results a scaling of the ablation with incident energy density was derived. The maximal resulting ablation depth on materials is $0.2 \text{ }\mu\text{m}$ per J/cm^2 of incident energy density.

Key words: *plasma focus, erosion, crater, thickness, weight loss.*

УДК 621.039

ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДА ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАДА ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЗАРЯДТАЛУ ПРОЦЕСІ

Р.Ж. Амангалиева, А.Е. Әбимолдаева

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

Мақала термоядролық синтез қондырғыларындағы пайда болатын тозаңның мәселесіне арналады. Плазмадағы тозаңды бөлшектердің электрлік зарядталуына әкелетін әртүрлі процесстер қарастырылды. Тозаңды бөлшектің салыстырмалы төмен температурасында бөлшектің тепе-тең потенциалы теріс мәнді, бөлшектің температурасы жоғарылаған сайын термоэмиссия салдарынан потенциалдың өсетіндігі көрсетілді.

Кілт сөздер: тозаңды бөлшек, қабырғалық плазма, тозаңды бөлшек заряды

КІРІСПЕ

Қазіргі таңда заманауи физиканың басты мәселесі – басқарылатын термоядролық синтезді (БТС) жүзеге асыру. БТС болашағы зор энергия көзінің түрі болып табылады. Бүгінгі таңда ядролық реакторлар ауыр ядроларды (уран, торий) бөлу және жеңіл ядроларды синтездеу (дейтерий және тритий) негізінде салынып жатыр. Термоядролық синтезді жүзеге асыру үшін газ өте жоғары температураға дейін қыздырылу керек, яғни температура оң зарядталған ядролардың кинетикалық энергиясы олардың электростатикалық тебілуінен әлдеқайда артық болатындай болу керек. Мұндай температурада барлық атомдар толығымен иондалады және газ плазма күйінде болады. Энергиясы өте үлкен ағынмен реактор қабырға материалының өзара әсерлесу, яғни реактор камерасының элементтерінің эрозиясының нәтижесінде плазмаға макроскопиялық (микронды) өлшемді бөлшектер түседі. Мұндай тозаңды бөлшектер үлкен теріс зарядқа ие болады және реактор жұмысына кері әсерін тигізеді [1–2].

ЗЕРТТЕУ МӘСЕЛЕСІ МЕН ӘДІСТЕРІ

Плазмадағы тозаңды бөлшектің зарядталуы мұқият зерттеуді қажет ететін негізгі мәселелердің бірі болып табылады. Себебі тозаңды бөлшектің заряды – тозаңды плазманың маңызды параметрі. Тозаңды бөлшектің заряды макробөлшектің өлшемі мен қоршаған плазманың локальдік параметріне тәуелді.

$$\sigma_{cap, e}(V) = \begin{cases} \pi a^2 \left(1 + \frac{2e_0 \phi_s}{m_e V^2} \right) = \pi a^2 \left(1 + \frac{e_0 \phi_s}{U} \right), & \frac{2e_0 \phi_s}{m_e V^2} > -1, \quad (U > -e_0 \phi_s), \\ 0, & \frac{2e_0 \phi_s}{m_e V^2} < -1, \quad (U < -e_0 \phi_s), \end{cases}$$

$$\sigma_{cap, i}(V_i) = \pi a^2 \left(1 - \frac{2e_0 \phi_s}{m_i V_i^2} \right),$$

мұндағы $m_{e(i)}$ – электрондар мен иондар массасы, V и V_i – электрондар мен иондар жылдамдығы.

Бөлшектің стационар потенциалы мен заряды бөлшек бетіне электрондар мен иондар ағыны теңесу шартымен анықталады:

Бөлшек бетіне түскен электрондар мен иондар жұптасады. Рекомбинация нәтижесінде пайда болған бейтарап бөлшектер плазмаға оралады. Иондарға қарағанда электрондардың қозғалғыштығы жылдамырақ. Сондықтан тозаң бөлшекке қарай электрондардың ағыны иондардың ағынына қарағанда басымырақ болады. Нейтрал тозаң бөлшек теріс зарядтала бастайды, бөлшек маңында теріс потенциалдың пайда болуына әкеледі. Ал бұл бөлшектен басқа электрондар тебіледі де, иондар тартыла бастайды. Бөлшектегі электрондардың және иондардың ағындары теңескенше тозаң бөлшектің заряды өсе береді.

Плазмадағы тозаңды бөлшектердің зарядын анықтау үшін шектелген орбиталды қозғалыстың моделін (orbit motion limited (OML) theory) пайдаланамыз [3]. Бұл модель импульс моменті мен энергияның сақталу заңынан шығатын тозаңды бөлшектердің электрондары мен иондарының жұтылу қимасын анықтауға мүмкіндік береді. Берілген жуықтаудың қолдану шарты мынадай:

$$a \ll \lambda_d \ll l_{i(e)},$$

мұндағы a – тозаң бөлшектің радиусы, λ_d – плазманың экрандалу ұзындығы, $l_{i(e)}$ – иондардың (электрондардың) орташа еркін жол жүру ұзындығы.

Тозаңды бөлшектің электрондарды және иондарды жұту қимасы жылдамдыққа (немесе кинетикалық энергияға) тәуелді:

$$I_e = I_i.$$

Тозаңды бөлшектің зарядталуының плазманың бөлшектерінің (электрондар мен иондар) жұтылуынан да басқа механизмдер бар. Тозаң бөлшек бетіндегі электрон термоэлектронды және екінші

электронды эмиссия процесстерінің нәтижесінде ыршып шығуы мүмкін. Электрондар эмиссиясы бөлшек зарядын өсіреді және белгілі бір шарттарда оң болуы мүмкін [4].

Тозаңды бөлшектің бетіндегі температураның ұлғаюы термоэлектронды эмиссия тогы өсуіне

$$I_{th} = \begin{cases} \frac{(4\pi a T_e)^2 m_e}{h^3} \exp\left(-\frac{W}{T_e}\right), & (\phi_s < 0), \\ \frac{(4\pi a T_e)^2 m_e}{h^3} \exp\left(-\frac{W}{T_e}\right) \left(1 + \frac{e_0 \phi_s}{T_e}\right) \exp\left(-\frac{e_0 \phi_s}{T_e}\right), & (\phi_s > 0), \end{cases}$$

мұндағы h – Планк тұрақтысы, W – тозаңша материалының шығу жұмысы.

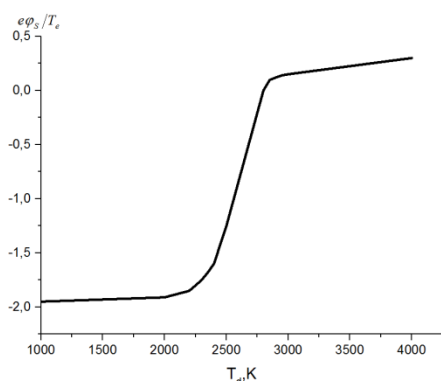
Екінші электронды эмиссия ағыны электрондардың бірінші ағыны арасындағы байланыс мынадай:

$$I_{se} = \delta I_e,$$

мұндағы δ – екінші электронды эмиссия коэффициенті.

Бұл коэффициент алғашқы электрондардың энергиясына және тозаңды бөлшектің материалына тәуелді. Егер δ параметрін δ_{max} электрондардың максимал шығуына, ал E энергияны E_{max} нормаласақ, онда $\delta(E)$ тәуелділігі барлық материалдар үшін әмбебап болады. Кейбір материалдар үшін δ_{max} , E_{max} параметрлерінің шамалары [3] жұмыста көрсетілген.

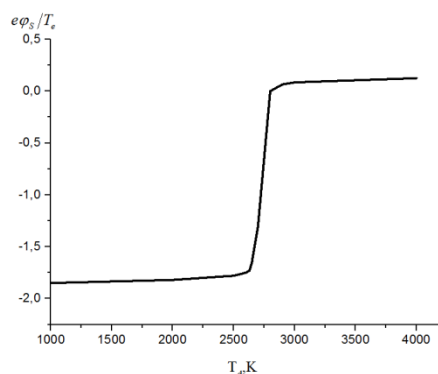
ЗЕРТТЕУ НӘТИЖЕЛЕРІ ЖӘНЕ ҚОРЫТЫНДЫСЫ



Сурет 1. $T_e = T_i = 20$ эВ, $n_e = n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ параметрлі плазмадағы тозаңды бөлшектің тепе-тең потенциалының тозаңды бөлшектің температурасына тәуелділігі

әкеледі және оның зарядының шамасына тәуелді болады. Себебі бөлшек бетіндегі электронды жұлып алғаннан кейін бөлшек бетіндегі өрістен квазинейтрал плазма аумағына тасымалдау үшін жұмыс жасау керек. Термоэлектрондардың ағыны үшін келесі теңдеуді жазуға болады:

1–2 суреттерде термоядролық реакторда қабырғалық плазма параметрлері үшін электрондар мен иондардың жұтылуын, термоэлектронды эмиссия және екінші электронды эмиссияны есептегендегі тозаңды бөлшектің тепе-тең потенциалы көрсетілген.



Сурет 2. $T_e = T_i = 35$ эВ, $n_e = n_i = 10^{13} \text{ см}^{-3}$ параметрлі плазмадағы тозаңды бөлшектің тепе-тең потенциалының тозаңды бөлшектің температурасына тәуелділігі

Термоэлектронды эмиссия салдарынан тозаңды бөлшектің бетінен электрондардың ыршып шығуына байланысты бөлшектің потенциалы өсе бастайды, содан кейін нольге тең болады да, таңбасын оңға ауыстырады.

ӘДЕБИЕТТЕР ТІЗІМІ

1. Крауз В.И., Мартыненко Ю.В., Свечников Н.Ю., Смирнов В.П., Станкевич В.Г., Химченко Л.Н. Наноструктуры в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН. – 2010. – Т.180. – №10. – С. 1055–1071.
2. Цытович В.Н., Винтер Дж. Пыль в установках управляемого термоядерного синтеза // УФН. – 1998. – Т. 168. – №8. – С. 899–907.
3. Фортов В.Е., Храпак А.Г., Храпак С.А., Молотков В.И., Петров О.Ф. Пылевая плазма // УФН. – 2004. – Т. 174. – №5. – С. 495–544.
4. Мартыненко Ю.В., Нагель М.Ю. Образование пыли в токамаке // Вопросы атомной науки и техники. Сер. Термоядерный синтез. – 2009. – вып. 3. – С.43–48.

ПРОЦЕСС ЗАРЯДКИ ПЫЛЕВЫХ ЧАСТИЦ В ПРИСТЕНОЧНОЙ ПЛАЗМЕ
ТЕРМОЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Амангалиева Р.Ж., Абимолдаева А.Е.

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

Статья посвящена проблеме пыли в пристеночной плазме в установках термоядерного синтеза. Рассматриваются различные процессы, приводящие к появлению электрического заряда у пылевых частиц в плазме. Показано, что при малых температурах пылевой частицы равновесный потенциал частицы отрицательный, при увеличении температуры частицы потенциал растет вследствие термоэмиссии.

Ключевые слова: пылевая частица, пристеночная плазма, заряд пылевой частицы

THE PROCESS OF CHARGING DUST PARTICLES IN A NEAR-WALL PLASMA
OF A THERMONUCLEAR REACTOR

R.Zh. Amangaliyeva, A.E. Abimoldayeva

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

The article is devoted to the problem of dust in near-wall plasma in thermonuclear fusion plants. Various processes are considered that they lead to the appearance of an electric charge in dust particles in a plasma. It is shown that at low temperature of the dust particle the equilibrium potential of the particle is negative, as the particle temperature increases, the potential increases due to thermionic emission.

Keywords: dust particle, wall plasma, charge of a dust particle

УДК 910.3:631.4 (574)

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

¹⁾ Салихов Т.К., ²⁾ Сапиев Е., ¹⁾ Салихова Т.С.

¹⁾ Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева, Астана, Казахстан

²⁾ Жанакушский сельский округ, Западно-Казахстанская область, 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. В результате исследований разработана практически доступная для широкой аудитории пользователей ГИС методика составления почвенной карты с помощью программного продукта ArcGIS. С применением ГИС-технологии разработана цифровая почвенная карта на основе сканированных почвенных карт Жанакушского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области.

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

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время в развитых странах мира одним из приоритетных направлений почвоведения являются географо-генетические исследования, охватывающие изучение пространственных закономерностей формирования почвенного покрова, выявление морфогенетических особенностей почв, их генетической сущности, разработка классификации и систематики почв, позволяющих оценить почвенные ресурсы и разработать схему рационального использования почв.

В связи с появлением мощных компьютерных средств, позволяющих обрабатывать и хранить огромные объемы информации, полностью изменилась технология составления почвенных и связанных с ними тематических карт. Если раньше основные работы (дешифрирование аэрокосмических снимков, рисовка контуров и содержания карт) проводились на бумаге, приведение снимков и топографической основы к единому заданному масштабу делалось с использованием пантографа и топографических проекторов, то сейчас все эти операции производятся с помощью компьютера. Использование компьютера резко сокращает время на составление карт и повышает их точность. Кроме того, отпала необходимость в трудоемком и длительном процессе, вычерчивания их квалифицированными чертежниками.

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 направлении 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 Жанакушского 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 (см. рисунок).

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 Жанакушского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области (см. таблицу).

ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДА ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАДА
ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЗАРЯДТАЛУ ПРОЦЕСІ

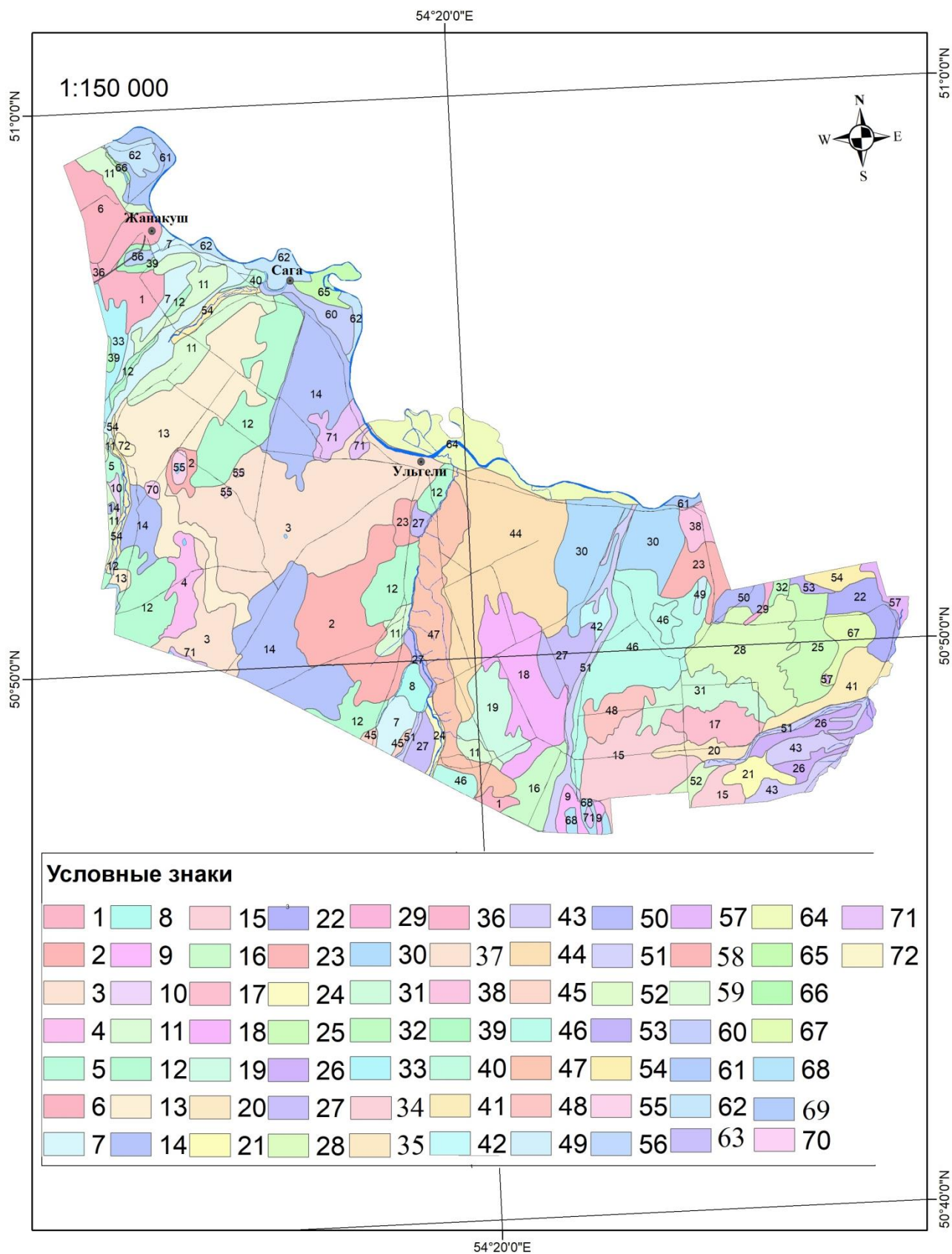


Рисунок. Почвенная карта Жанакушского сельского округа Западно-Казахстанской области

**ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДА ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАДА
ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЗАРЯДТАЛУ ПРОЦЕСІ**

Таблица. Легенда к почвенной карте Жанакушского сельского округа (шифр почв указан по республиканскому систематическому списку)

Почвы		
№	Шифр	Название
1	237лс	темно-каштановые среднесиловые легкосуглинистые
2	237лс+671***	темно-каштановые среднесиловые легкосуглинистые в комплексе с солонцами каштановыми мелкими 30–50 %
3	237п	темно-каштановые среднесиловые песчаные
4	237п+240***	темно-каштановые среднесиловые песчаные с пятнами темно-каштановыми слабодефлированными 30–50 %
5	237п+240**+448*	темно-каштановые среднесиловые с пятнами темно-каштановыми слабодефлированными 10–30 % и в сочетании с лугово-каштановыми среднесиловыми 10–20 %
6	239лс	темно-каштановые слабосиловые легкосуглинистые
7	239с	темно-каштановые слабосиловые среднесуглинистые
8	239с+247**	темно-каштановые слабосиловые среднесуглинистые с темно-каштановыми карбонатно-солончаковыми среднесиловыми 10–30 %
9	239с+672***	темно-каштановые слабосиловые среднесуглинистые с солонцами каштановыми средними 30–50 %
10	240лс	темно-каштановые слабодефлированные легкосуглинистые
11	240п	темно-каштановые слабодефлированные песчаные
12	240п+241***	темно-каштановые слабодефлированные песчаные с темно-каштановыми среднедефлированными 30–50 %
13	240сп	темно-каштановые слабодефлированные супесчаные
14	241п	темно-каштановые среднедефлированные песчаные
15	242лг	темно-каштановые карбонатные среднесиловые легкосуглинистые
16	242лг+244**	темно-каштановые карбонатные среднесиловые легкосуглинистые с темно-каштановыми карбонатными слабосиловыми 10–30 %
17	242с+244**	темно-каштановые карбонатные среднесиловые среднесуглинистые с темно-каштановыми карбонатными слабосиловыми 10–30 %
18	242тс+247**+448**	темно-каштановые карбонатные среднесиловые тяжелосуглинистые с темно-каштановыми карбонатно-солончаковыми среднесиловыми 10–30 % и лугово-каштановыми среднесиловыми 10–30 %
19	243тс+301**	темно-каштановые карбонатные малосиловые слабозащеченные тяжелосуглинистые с темно-каштановыми малоразвитыми среднезащеченными 10–30 %
20	244лс+247**	темно-каштановые карбонатные слабосиловые легкосуглинистые с темно-каштановыми карбонатно-солончаковыми среднесиловыми слабозащеченными 10–30 %
21	244с	темно-каштановые карбонатные слабосиловые среднесуглинистые
22	244с+247**	темно-каштановые карбонатные слабосиловые среднесуглинистые с темно-каштановыми карбонатно-солончаковыми среднесиловыми 10–30 %
23	244с+291***	темно-каштановые карбонатные слабосиловые легкосуглинистые с темно-каштановыми солончаковыми слабозащеченными 30–50 %
24	244с+301***	темно-каштановые карбонатные слабосиловые легкосуглинистые с темно-каштановыми малоразвитыми среднезащеченными 30–50 %
25	244тс	темно-каштановые карбонатные слабосиловые тяжелосуглинистые
26	244тс+247**	темно-каштановые карбонатные слабосиловые тяжелосуглинистые с темно-каштановыми карбонатно-солончаковыми среднесиловыми 10–30 %
27	244тс+247**+450**	темно-каштановые карбонатные слабосиловые тяжелосуглинистые с темно-каштановыми карбонатно-солончаковыми среднесиловыми 10–30 % и лугово-каштановыми карбонатными среднесиловыми 10–30 %
28	244тс+301***+450**	темно-каштановые карбонатные слабосиловые тяжелосуглинистые с темно-каштановыми малоразвитыми 30–50 % и лугово-каштановыми карбонатными среднесиловыми 10–30 %
29	244тс+450**	темно-каштановые карбонатные слабосиловые тяжелосуглинистые с лугово-каштановыми карбонатными среднесиловыми 10–30 %
30	247лг+291**+450**	темно-каштановые карбонатно-солончаковые среднесиловые легкосуглинистые с темно-каштановыми солончаковыми 10–30 % и лугово-каштановыми карбонатными среднесиловыми 10–30 %
31	247с+300**+450*	темно-каштановые карбонатно-солончаковые среднесиловые среднесуглинистые с темно-каштановыми неполноразвитыми 10–30 % и лугово-каштановыми карбонатными среднесиловыми до 10 %
32	248с	темно-каштановые карбонатно-солончаковые малосиловые среднесуглинистые
33	256с	темно-каштановые слабосолоцеватые среднесиловые среднесуглинистые
34	258лс+247**	темно-каштановые слабосолоцеватые слабосиловые легкосуглинистые с темно-каштановыми карбонатно-солончаковыми среднесиловыми 10–30 %
35	261с+671**	темно-каштановые среднесолоцеватые среднесиловые среднесуглинистые с солонцами каштановыми мелкими 10–30 %
36	261с+671***	темно-каштановые среднесолоцеватые среднесиловые среднесуглинистые с солонцами каштановыми мелкими 30–50 %
37	291г	темно-каштановые солончаковые глинистые
38	291с	темно-каштановые солончаковые среднезащеченные среднесуглинистые
39	292тс	темно-каштановые остаточнокорбонатные тяжелосуглинистые
40	300тс	темно-каштановые неполноразвитые тяжелосуглинистые
41	300с	темно-каштановые неполноразвитые среднесуглинистые

**ТЕРМОЯДРОЛЫҚ РЕАКТОРДА ҚАБЫРҒАЛЫҚ ПЛАЗМАДА
ТОЗАҢДЫ БӨЛШЕКТЕРДІҢ ЗАРЯДТАЛУ ПРОЦЕСІ**

Почвы		
№	Шифр	Название
42	300лс	темно-каштановые неполноразвитые легкосуглинистые
43	301лс	темно-каштановые малоразвитые легкосуглинистые
44	301тс	темно-каштановые малоразвитые тяжелосуглинистые
45	301тс+300**	темно-каштановые малоразвитые тяжелосуглинистые с темно-каштановыми неполноразвитыми среднезасебненными 10–30 %
46	301тс+300**+450**	темно-каштановые малоразвитые тяжелосуглинистые с темно-каштановыми неполноразвитыми среднезасебненными 30–50 % и лугово-каштановыми карбонатными среднесуглинистыми до 10 %
47	302г+671**	темно-каштановые примитивные глинистые с солонцами каштановыми мелкими 30–50 %
48	448г	лугово-каштановые среднесуглинистые
49	448тс+244**	лугово-каштановые среднесуглинистые с темно-каштановыми карбонатными слабосмытыми 10–30 %
50	450тс	лугово-каштановые карбонатные среднесуглинистые
51	569тс	лугово-каштановые солончаковые
52	596лг	лугово-болотные каштановые легкосуглинистые
53	596лс	лугово-болотные каштановые легкосуглинистые
54	597лг	лугово-болотные каштановые засоленные легкосуглинистые
55	631лс	пойменные луговые каштановые карбонатные легкосуглинистые
56	631лс+639**	пойменные лугово-болотные каштановые карбонатные легкосуглинистые с пойменными луговыми каштановыми карбонатными 10–30 %
57	631с+639**	пойменные лугово-болотные каштановые карбонатные среднесуглинистые с пойменными луговыми каштановыми карбонатными 10–30 %
58	631сп	пойменные лугово-болотные каштановые карбонатные супесчаные
59	631тс	пойменные луговые каштановые карбонатные тяжелосуглинистые
60	639сп	пойменные лугово-болотные каштановые супесчаные
61	671с+261**+448**	солонцы каштановые мелкие среднесуглинистые с темно-каштановыми среднесолоцеватыми среднесуглинистыми 10–30 % и лугово-каштановыми среднесуглинистыми 10–30 %
62	672тс+263**	солонцы каштановые средние тяжелосуглинистые с темно-каштановыми среднесолоцеватыми слабосмытыми 10–30 %
63	724лг+597***	солонцы луговые мелкие среднесуглинистые с лугово-болотными каштановыми засоленными 30–50 %
64	728п	пески равнинные закрепленные песчаные
65	729п	пески грядово-бугристые закрепленные песчаные

Подробные диагностические 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, под изеново-мятликовым, разнотравно-житняково-таволговым, чернополюнно-изеновым и мятликово-белополюнно-кокпековым растительным сообществом, на лессовидных суглинках.

Почвенная карта создается на основе фрагмента подложки почвенной карты и фотоплана и производится с помощью ArcGIS. При создании почвенной карты для отображения почвенного слоя используются атрибутивные таблицы. При создании же соседних почвенных ареалов и вообще при дальнейшем процессе создания почвенной карты нужно использовать инструмент автополигон.

На рисунке приведена почвенная карта Жанакушского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области, которая была создана нами с применением вышеописанной методики на основе сканированных почвенных карт.

На основании проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- для повышения качества генерализованных карт (районных, областных и прочих) необходимо создание объективных автоматизированных методов генерализации карт в цифровой среде;

- в результате наших исследований разработана простая и в тоже время практически доступная для широкой аудитории пользователей ГИС методика составления цифровой почвенной карты с помощью программного продукта ArcGIS. Для составления карты можно пользоваться любыми отсканированными картографическими основами, фотопланами, а при наличии и другими растровыми материалами. И в качестве доказательства работоспособности, с ее помощью в последующем будет создана крупномасштабная почвенная карта Чингирлауского района Западно-Казахстанской области.

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.
2. 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.
3. Есполов, Т.И. О проблеме устойчивого развития агресурсов 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 Казахстае Байжуманова А.Б. – Алматы: Бастау.– 2008.– С. 4–6.
4. Салихов, Т.Қ. Топырактану: оқулық /Т.Қ. Салихов – Алматы: «Эверо» баспасы, 2016.– 457 бет.
5. Алтаев, Ж. ГИС и земельный кадастр Казахстана /Ж. Алтаев //ArcReview, 2003. – № 2 (25) – http://dataplus.ru/Arcrev/Number_25/2_Kazah.htm.
6. Алтаев, Ж.С. ГИС и земельный кадастр Казахстана – 2. Навсегда? /Ж.С. Алтаев //ГИС и земельный кадастр Казахстана – 2. Навсегда? ArcReview, 2005. – № 2 (33) – http://dataplus.ru/ Arcrev/ Number_33/Index.htm.
7. Салихов, Т.К. Современное состояние плодородия почвенного покрова геозкосистем Лубенского сельского округа /Т.К. Салихов //Вестник Казахско–Британского технического университета. – 2017. – № 1. – С. 52–55.
8. Салихов, Т.К. Лубен ауылдық округінің геозкожүйелеріндегі топырақ жамылғысының қазіргі кездегі жағдайы /Т.К. Салихов //Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстана. – 2017. – № 1. – С. 113–119.

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

¹⁾Т.Қ. Салихов, ²⁾Е. Сапиев, ¹⁾Т.С. Салихова

¹⁾Л.Н. Гумилев атындағы Еуразия ұлттық университеті, Астана, Қазақстан

²⁾Батыс Қазақстан облысы Жаңақуш ауылдық округі, Қазақстан

Қазіргі 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. Зерттеу нәтижесінде қол жетімді кен аудитория пайдаланушыларға ГАЖ арқылы жасау әдістемесі жүзінде топырақ картасының ArcGIS бағдарламалық өнімі көмегімен жасалынды. ГАЖ-технологиясын қолдану арқылы Батыс Қазақстан облысы Шыңғырлау ауданы Жаңақуш ауылдық округінің сандық топырақ картасы сканерленген топырақ картасы негізінде құрастырылды.
Түйінді сөздер: геоақпараттық жүйелер, топырақ жамылғысы, күнгірт қара қоңыр топырақ, ауылдық округ.

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

¹⁾T.K. Salikhov, ²⁾E. Sapiev, ¹⁾T.S. Salikhova

¹⁾L.N. Gumilyov Eurasian National University, Astana, Kazakhstan

²⁾Zhanakush rural district West Kazakhstan region, Kazakhstan

Rational use and protection of soils in market conditions requires adequate application of new scientific and methodological approaches. One of these systems-analytical methods of soil inventory organization is combination of traditional ground methods with technologies of geographic information systems (GIS) based on wide use of aerospace images of different resolutions. As a result of the research, a method of soil mapping using ArcGIS software was developed that is practically accessible to a wide audience of GIS users. Using GIS technology, a digital soil map based on scanned soil maps of Zhanakush rural district of Chingirlau district in West Kazakhstan region was developed.

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

УДК 910.3 631.41 (574.1)

БИОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЭКОСИСТЕМ АКШАТСКОГО СЕЛЬСКОГО ОКРУГА

Салихов Т.К.

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

В результате исследований геоэкосистем определены морфологические признаки почв, биологические и химические свойства почв: объем и плотность твердой фазы, объемная масса, строения пахотного слоя, влажность почвы, содержание гумуса, доступных элементов, запасов питания, поглощение основания и содержание ионов в водной вытяжке. Таким образом, установлено, что подтип почвы лугового обыкновенного чернозема по химизму засоления соответствует сульфатному роду, по содержанию легкорастворимых солей характеризуется как незасоленный вид, а поэтому их можно использовать для освоения орошаемых севооборотов.

Ключевые слова: биологические и химические свойства почв, содержание гумуса, доступных элементов, запасов питания, поглощение основания и содержание ионов в водной вытяжке.

ВВЕДЕНИЕ

Сохранение и повышение плодородия почв является основной частью общей проблемы рационального использования земельных ресурсов, увеличение продуктивности и улучшение почвенной экологии агроландшафтов.

По данным кафедры растениеводства и земледелия [4], на фоне длительного использования соломы в качестве органического удобрения в зернопаровых севооборотах, с включением озимых и зернобобовых культур, обеспечивается простое воспроизводство почвенного плодородия, а при внесении навоза и возделывании сидеральных культур – его расширенное воспроизводство.

В настоящее время в земледелии стало проблематично внесение на поле навоза и возделывание сидеральных культур. Поэтому расширение посевов многолетних трав на выводных полях полевых севооборотов позволяет существенно снизить потери гумуса, что при достаточной площади трав стабилизирует плодородие почвы.

В сравнительном опыте, проведенном на Уральской сельскохозяйственной опытной станции [3], содержание гумуса на старопахотных землях составило в слое 0–20 см – 2,5 %, в слое 20–40 см – 2,16 %, в типичном севообороте после второй ротации содержание гумуса составило 2,82 и 2,76 %, а на выводном поле с житняком (12 лет) гумус в почве имел 3,07 и 2,78 % соответственно.

Поэтому, изучение природных факторов почвообразования и производственной деятельности хозяйства; биологических, химических и физических свойства почв, коррелирующих с урожайностью культур позволяют на количественном уровне оценивать контрастность, сложность и неоднородность почвенного покрова конкретного массива, что позволит объективно решать вопрос о пригодности использования почв в хозяйственных целях и определить кадастровую стоимость земельного участка.

ОБЪЕКТ И МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Цель наших исследований – изучение современного состояния биологических и химических свойств почвенного покрова геоэкосистем на территории Акшатского (Лубенского) сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области.

В связи с этим в исследованиях на территории Акшатского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области изучены некоторые биологические, химические и физические свойства и морфологические признаки почв: влажность почвы, объем и плотность твердой фазы, объемная масса, строение пахотного слоя, содержание гумуса, доступных элементов, запасов элементов питания, поглощенные основания и содержание ионов в водной вытяжке по общепринятым методикам [1, 2, 5, 6, 8–10].

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящем систематическом описании выделены почвенные подразделения, которые были встречены нами на территории исследуемого района.

Подробные диагностические показатели даны для наиболее распространенных почвенных разновидностей в пределах Акшатского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области изучены. Указаны характерные морфологические генетические признаки почв, основанные на имеющихся данных полевых исследований и камеральной обработки.

В полевых условиях морфологические признаки позволяют установить вид и разновидность лугово-темно-каштанового подтипа почвы, которая по мощности гумусового слоя $A+B_1$ характеризуется как мощная, а по механическому составу $A_{\text{пах}}$ – как среднесуглинистая.

Характеристика основного разреза лугово-темно-каштановой почвы:

$A_{\text{пах}} \frac{0-28}{28}$	Темно-каштановый, комковато-зернистый, рыхлый, тонкотрещиноватый, влажный, пронизан корнями, средне-суглинистый, переход ясный.
$B_1 \frac{28-51}{23}$	Серо-бурый, крупнокомковатый, плотный, тонкопористый, сырой, среднесуглинистый, переход постепенный.
$B_2 \frac{51-70}{19}$	Пестрый серовато-бурый, комковато-призматический, влажный, плотный, тяжелосуглинистый, языковатый с затеками гумуса, вскипание от HCl в нижней части.
$B_k \frac{70-100}{30}$	Пятнистый буровато-желтый, призматично-ореховатый, слабовлажный, плотный, карбонаты в форме белоглазки, тяжелосуглинистый, переход постепенный.
$C \frac{100-150}{50}$	Желтый, мелкопризматический, слабовлажный, плотный с журавчиками извести и кристалликами гипса, тяжелосуглинистый.

Основным биологическим свойством плодородия почв является процентное содержание гумуса, определение которого в слое 0–50 см является главным диагностическим признаком при бонитировке почв РК.

Для объективной оценки различных почв необходимо процентное содержание гумуса пересчитать в его запасы в т/га для каждого генетического горизонта (таблица 1).

Одним из основных неблагоприятных свойств почв, снижающих их плодородие в условиях РК, является солонцеватость и засоленность профиля.

Причинами засоления и солонцеватости почв являются почвообразующие (материнские) породы и минерализованные грунтовые воды, непригодные для полива оросительные воды и низкая естественная дренируемость территории.

Исследованиями [7] установлено, что при правильном выборе объекта орошения, соблюдения основ эксплуатации оросительных систем, орошение не вызвало существенных изменений в вещественном составе почв. Так, содержание солей, гумуса, обменных катионов после 16 лет орошения осталось на уровне их неорошаемых аналогов, но отмечено некоторое увеличение подвижности карбонатов.

Химические свойства почв, представленные доступными элементами питания растений и выраженные в мг/100 г, следует также пересчитать в запасы азота, фосфора и калия в кг/га (таблица 2 и 3).

На настоящее время в качестве объективного показателя солонцеватости следует брать содержание поглощенных натрия и магния в ППК, выраженное в процентах от суммы поглощенных оснований (таблица 2), результаты которой свидетельствуют, что лугово-темно-каштановые почвы относятся к несо-лонцеватому виду, так как содержание поглощенного натрия в них меньше 3 %.

Определение количества ионов водной вытяжки (таблица 3) позволяет по соотношению анионов и катионов в мг·экв./100 г рассчитать химизм засоления в слоях 0–50 см и 50–100 см, а затем установить степень засоления по процентному содержанию солей.

Таблица 1. Биохимические свойства лугово-темно-каштановой почвы экосистем Акшатского сельского округа

Мощность горизонта, см	Плотность почвы, г/см ³	Гумус		Доступные элементы, мг/100 г твердой фазы почвы			Запасы элементов питания, кг/га		
		%	т/га	N	P	K	N	P	K
$A_{\text{пах}} \frac{0-28}{28}$	1,15	4,6	148,1	5,8	1,4	86,0	186,8	45,1	2769,2
$B_1 \frac{28-51}{23}$	1,34	3,4	104,8	3,7	0,9	55,0	114,0	27,7	1695,1
$B_2 \frac{51-70}{19}$	1,38	1,9	49,8	2,1	0,4	31,0	55,1	10,5	812,8
$B_k \frac{70-100}{30}$	1,46	0,8	35,0	0,7	следы	13,0	30,7	–	569,4
$C \frac{100-150}{50}$	1,45	0,2	14,5	0,1	–	3,0	7,3	–	217,5
A+B+C 0–150	1,37	2,3	352,2	2,6	0,6	38,4	393,8	83,3	6064,0

**БИОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПОЧВЕННОГО ПОКРОВА ЭКОСИСТЕМ
АКШАТСКОГО СЕЛЬСКОГО ОКРУГА**

Таблица 2. Поглощенные основания в мг-экв./100 г (числитель) и процентах от емкости поглощения (знаменатель) лугово-темно-каштановой почвы экосистем Акшатского сельского округа

Мощность горизонта, см	Ca	Mg	Na	K	Сумма
$A_{\text{пах}} \frac{0-28}{28}$	$\frac{22,2}{65,3}$	$\frac{10,1}{29,7}$	$\frac{0,7}{2,1}$	$\frac{1,0}{2,9}$	$\frac{34,0}{100}$
$B_1 \frac{28-51}{23}$	$\frac{20,0}{63,9}$	$\frac{9,4}{30,0}$	$\frac{0,9}{2,9}$	$\frac{1,0}{3,2}$	$\frac{31,3}{100}$
$B_2 \frac{51-70}{19}$	$\frac{20,1}{68,4}$	$\frac{7,8}{26,5}$	$\frac{0,6}{2,0}$	$\frac{0,9}{3,1}$	$\frac{29,4}{100}$
$B_k \frac{70-100}{30}$	$\frac{20,1}{73,1}$	$\frac{5,5}{20,0}$	$\frac{0,8}{2,9}$	$\frac{1,1}{4,0}$	$\frac{27,5}{100}$
$C \frac{100-150}{50}$	$\frac{16,8}{73,0}$	$\frac{5,4}{23,5}$	$\frac{0,4}{1,7}$	$\frac{0,4}{1,7}$	$\frac{23,0}{100}$

Таблица 3. Содержание ионов в водной вытяжке в мг-экв./100 г (числитель) и процентах от массы лугово-темно-каштановой почвы (знаменатель) экосистем Акшатского сельского округа

Мощность горизонта, см	Сухой остаток	Анионы			Катионы			$\frac{HCO_3}{Cl + SO_4}$	$\frac{SO_4}{Cl}$
		HCO ₃	Cl	SO ₄	Ca	Mg	Na		
$A_{\text{пах}} \frac{0-28}{28}$	$\frac{1,74}{0,060}$	$\frac{0,25}{0,015}$	$\frac{0,03}{0,001}$	$\frac{0,59}{0,028}$	$\frac{0,52}{0,011}$	$\frac{0,26}{0,003}$	$\frac{0,09}{0,002}$	0,4	20,0 сульф.
$B_1 \frac{28-51}{23}$	$\frac{1,96}{0,068}$	$\frac{0,28}{0,017}$	$\frac{0,06}{0,002}$	$\frac{0,64}{0,031}$	$\frac{0,55}{0,011}$	$\frac{0,24}{0,003}$	$\frac{0,19}{0,004}$	0,4	10,6
$B_2 \frac{51-70}{19}$	$\frac{2,30}{0,084}$	$\frac{0,49}{0,030}$	$\frac{0,06}{0,002}$	$\frac{0,60}{0,029}$	$\frac{0,67}{0,014}$	$\frac{0,22}{0,003}$	$\frac{0,26}{0,006}$	0,7	10,0
$B_k \frac{70-100}{30}$	$\frac{2,16}{0,079}$	$\frac{0,54}{0,033}$	$\frac{0,04}{0,001}$	$\frac{0,50}{0,024}$	$\frac{0,76}{0,016}$	$\frac{0,19}{0,002}$	$\frac{0,13}{0,003}$	1,0	12,5
$C \frac{100-150}{50}$	$\frac{2,00}{0,073}$	$\frac{0,51}{0,031}$	$\frac{0,03}{0,001}$	$\frac{0,46}{0,022}$	$\frac{0,64}{0,013}$	$\frac{0,22}{0,003}$	$\frac{0,14}{0,003}$	1,0	15,3

Выводы

Следовательно, физико-биохимические свойства почвенного покрова экосистем Акшатского сельского округа Чингирлауского района Западно-Казахстанской области (с учетом агрометеорологических условий) можно рационально регулировать водно-воздушным, пищевым режимом орошаемых и неорошаемых земель в различные годы.

Оптимальное строение пахотного горизонта и максимальные запасы продуктивной влаги в полуметровом слое создаются в Акшатском сельском ок-

руге Западно-Казахстанской области, что в конечном итоге влияет на увеличение урожайности сельскохозяйственных культур при правильном соблюдении агротехники.

Приведенные данные показывают, что подтип лугово-темно-каштановой почвы по химизму засоления соответствует сульфатному роду, а по содержанию легкорастворимых солей вид характеризуется как незасоленный, а поэтому их можно использовать для освоения орошаемых и неорошаемых севооборотов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ахмеденов, К.М. Практикум по географии почв с основами почвоведения. /К.М. Ахмеденов, Т.К. Салихов – Уралыск: ЗКАТУ им. Жангир хана. – 2008. – 167 с.
2. Бекназаров, Ж.Б. Методические рекомендации для выполнения курсовой работы по почвоведению на тему: «Оценка плодородия почв земельных угодий». / Ж.Б. Бекназаров, В.Г. Архипкин, Т.К. Салихов – Уралыск: ЗКАТУ им. Жангир хана, 2007. – 35 с.
3. Браун, Э.Э. Выводное поле многолетних трав, как основной фактор повышения плодородия земель /Э.Э. Браун, С.Г. Чекалин, В.Б. Лиманская, Г.К. Жакселикова //Материалы докладов межд. науч.–практ. конф. «Экономическое, социальное и культурное развитие Западного Казахстана: история и современность», посвящ. 180–летию Оружейной палаты Букеевского ханства. – Уралыск: ЗКАТУ им. Жангир хана, 2008. – С. 287–288.
4. Вьюрков, В.В. Сохранение и повышение плодородия темно–каштановых почв Приуралья /В.В.Вьюрков //Материалы докладов межд. науч.–практ. конф. Оренбургского регионального института переподготовки и повышения квалификации руководящих кадров и специалистов АПК «Земельные отношения на современном этапе: проблемы, пути решения». – Оренбург, 2004. – С. 185–191.
5. Елешев, Р.Е. Топырактану практикумы. /Р.Е. Елешев, Ж.Е. Елемесов, Қ.М. Мухаметкәрімов – Алматы: ҚазҰАУ, 2006. – 156 бет.
6. Рахимғалиева, С.Ж. Практикум по почвоведению: учеб. пособие для с.–х. вузов. /С.Ж. Рахимғалиева – Уралыск: ЗКАТУ им. Жангир хана. – 2004. – 198 с.
7. Фартушина, М.М. К вопросу изменения физических, физико–химических и химических свойств почв при орошении. /М.М. Фартушина, Т.Е. Дарбаева //Материалы докладов межд. научн.–практ. конф. «Перспективные направления стабилизации и развития агропромышленного комплекса Казахстана в современных условиях», посвящ. 90–летию со дня образования Уральской с.–х. станции и 100–летию со дня рождения Н.И. Башмакова – Уралыск, 2004. – С. 89–92.
8. Салихов, Т.К. Топырактану: оқулық /Т.К. Салихов – Алматы: «Эверо» баспасы, 2016.– 457 бет.
9. Салихов, Т.К. Физические свойства почвенного покрова геоэкосистем пригорода Астаны /Т.К. Салихов //Доклады Национальной академии наук Республики Казахстан. – 2017. – Том 1. – №311. – С. 156–160.
10. Салихов, Т.К. Современное состояние плодородия почвенного покрова геоэкосистем пригорода Астаны /Т.К. Салихов //Вестник Национального ядерного центра Республики Казахстана. – 2017. – № 3. – С. 109–113.

АКШАТ АУЫЛДЫҚ ОКРУГІ ЭКОЖҮЙЕЛЕРІНДЕГІ ТОПЫРАҚ ЖАМЫЛҒЫСЫНЫҢ БИОХИМИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІ

Т.Қ. Салихов

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

Зерттеу нәтижесінде геоэкожүйелерінің топырақ жамылғысының морфологиялық белгілері, оның биологиялық және химиялық қасиеттері анықталды: қатты фазасының көлемі мен тығыздығы, көлемдік салмағы, өңделетін қабатының құрылысы, топырақтың ылғалдылығы, қарашірік мөлшері, топырақтағы тиімді элементтері, оның қорек қоры, жұту сыйымдылығы, су сүзіндісіндегі сіңірілген иондардың мөлшері. Зерттелген мәліметтер келесіні көрсетті, шалғынды кәдімігі қара топырақ типшесі тұздану химизмі бойынша сульфатты туысына жатады, ал суда жеңіл еритін тұздары бойынша тұздалмаған түрімен сипатталады, соған байланысты оларды тәлім және суармалы ауыспалы егістерін игеруінде қолдануға болады.

Түйін сөздер: *топырақтың биологиялық және химиялық қасиеттері, қарашірік мөлшері, топырақтағы тиімді элементтері, оның қорек қоры, жұту сыйымдылығы, су сүзіндісіндегі сіңірілген иондардың мөлшері.*

BIOLOGICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF A SOIL COVER OF GEOECOSYSTEMS OF AKSHAT RURAL DISTRICTS

T.K. Salikhov

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

As a result of researches morphological signs of soils, biological and chemical properties of a soil cover of geoecosystems are defined: volume and density of a firm phase, volume weight, a structure of an arable layer, the humus maintenance, accessible elements of soil, stocks of elements of the food, the absorbed bases, the maintenance of ions in a water extract. The studied data shows that the subtype of meadow ordinary black earth soil on a chemical-ism salted corresponds to a sulphatic sort, and under the maintenance of readily soluble salts a kind, is characterized as not salted, and therefore they can be used for development of irrigated crop rotations.

Key words: biological and chemical properties of a soil cover, the humus maintenance, accessible elements of soil, stocks of elements of the food, the absorbed bases, the maintenance of ions in a water extract.

УДК 621.039.53

ДИНАМИКА ИЗМЕНЕНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АКТИВНОЙ ЗОНЫ ИР ВВР-К С НИЗКООБОГАЩЕННЫМ ТОПЛИВОМ ПРИ ПОСТЕПЕННОЙ ЗАМЕНЕ ВОДЯНОГО ОТРАЖАТЕЛЯ НА БЕРИЛЛИЕВЫЙ

Сайранбаев Д.С., Колточник С.Н., Шаймерденов А.А., Накипов Д.А., Кенжин Е.А.

Институт ядерной физики МЭ РК, Алматы, Казахстан

В 2015 году в рамках перевода реактора ВВР-К на топливо пониженного обогащения проведена модернизация основных систем реактора, включая полную замену СУЗ. Новая конфигурация активной зоны реактора стала компактной и более энергонапряженной; изменился характер выгорания топлива. Увеличилось количество рабочих органов СУЗ, изменились и их геометрические параметры.

Согласно концепции конверсии реактора ВВР-К, в течение первого года эксплуатации будет производиться постепенная замена водяного отражателя на бериллиевый, что сопряжено с изменением нейтронно-физических характеристик реактора. Настоящая работа посвящена определению кинетических параметров реактора ВВР-К, связанных с формированием бериллиевого отражателя. Для корректного вычисления реактивности новой аппаратурой СУЗ необходимо вводить в систему значения кинетических параметров активной зоны, такие как доли запаздывающих нейтронов и постоянные распада для шести групп. Определению значений этих параметров и динамике их изменения в ходе эксплуатации реактора посвящена настоящая работа.

ВВЕДЕНИЕ

Исследовательский реактор ВВР-К, введенный в эксплуатацию в 1967 году [1], переведен на топливо пониженного обогащения по изотопу урана-235 [2, 3]. Номинальная тепловая мощность реактора 6 МВт. В 2016 году после проведенных физического и энергетического пусков началась его эксплуатация с низкообогащенным топливом [4].

Для сохранения высокой плотности потоков нейтронов в облучательных каналах активной зоны количество ТВС в зоне по мере выгорания топлива сохраняется неизменным, а боковой водяной отражатель, который образуют вытеснители с водой, постепенно замещают блоки бериллия. Изменение конфигурации активной зоны и выгорание топлива приводят к изменению нейтронно-физических характеристик активной зоны реактора.

В ядерном реакторе за управление цепной ядерной реакцией деления отвечают рабочие органы (РО) СУЗ. К последним предъявляются повышенные требования правил ядерной безопасности, так как их работа напрямую влияет на безопасную эксплуатацию реактора. На исследовательском реакторе ВВР-К в качестве материала поглотителя в РО СУЗ используется карбид бора с естественным изотопным составом.

Цель работы – исследовать динамические и кинетические процессы в реакторе ВВР-К при формировании бериллиевого отражателя с применением компьютерного кода MCNP [5, 6]. Знание кинетических параметров реактора поможет не только для обоснования безопасной эксплуатации реактора, но и для корректного вычисления реактивности аппаратурой СУЗ.

ОПИСАНИЕ АКТИВНОЙ ЗОНЫ С НОУ ТОПЛИВОМ

В активной зоне исследовательского реактора (ИР) ВВР-К используются тепловыделяющие сбор-

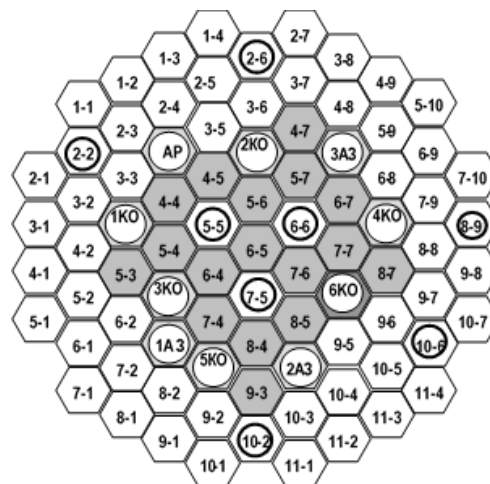
ки типа ТВС ВВР-КН [4]: восьмитрубная (ТВС-1) и пятирубная (ТВС-2). Топливом служит металлокерамическая композиция UO_2-Al с плотностью урана $2,8 \text{ г/см}^3$ и обогащением по урану-235 19,7 %. Пятирубная ТВС, имеющая внутри полость, предназначена для установки каналов РО СУЗ.

Сформированная во время физического пуска реактора исходная рабочая конфигурация активной зоны, с запасом реактивности $\sim 7\% \Delta k/k$, содержит 17 ТВС-1, 10 ТВС-2, восемь облучательных каналов и боковой водный отражатель из 50 вытеснителей с водой (см. рисунок 1, а, где она обозначена как «17+10»). Далее по мере выгорания топлива проводится постепенная загрузка в активную зону блоков бериллия, при этом количество ТВС остается неизменным, а также нет перемещений ТВС внутри активной зоны. Постепенную замену вытеснителей с водой на блоки бериллия с неизменным количеством ТВС-1 и ТВС-2 иллюстрируют рисунки 1, б–д. После конверсии, эксплуатация реактора проводится рабочими циклами по 20 суток каждый (200 эффективных суток за год). В летний период проводится двухмесячный останов реактора на плановый предупредительный ремонт (ППР).

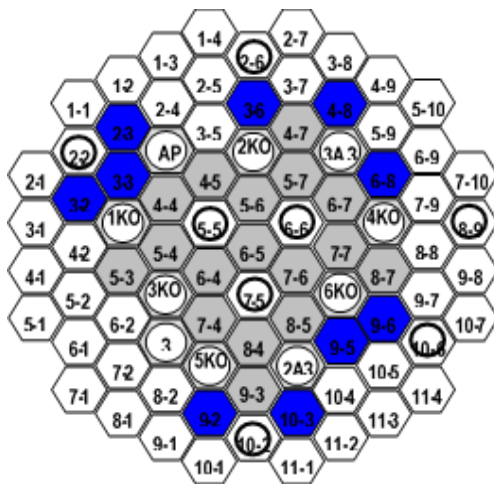
Количество элементов в последовательных конфигурациях активной зоны и аббревиатуры, используемые в тексте для обозначения конфигураций, приведены в таблице 1.

Таблица 1. Количество элементов в конфигурациях активной зоны

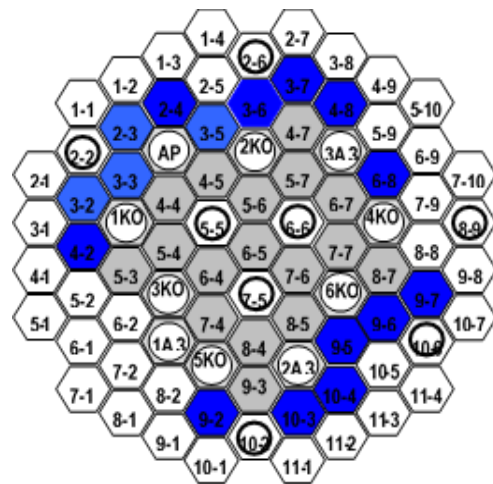
Аббревиатура		ТВС-1	ТВС-2	облуч. канал	вытес- нитель	блок Ве
«17+10»	«0»	17	10	8	50	0
«17+10+10Ве»	«1»	17	10	8	40	10
«17+10+16Ве»	«2»	17	10	8	34	16
«17+10+23Ве»	«3»	17	10	8	27	23
«17+10+49Ве»	«4»	17	10	8	1	49



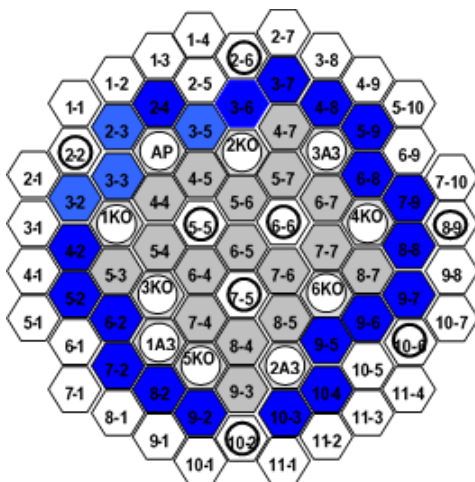
а) “17+10”: Циклы 1–3.
«Свежее» топливо. Водный отражатель.



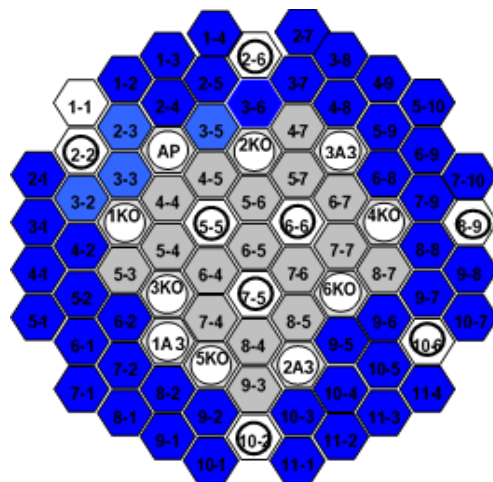
б) “17+10+10Be”: Циклы 4–9.
Среднее выгорание 21,8 %.



в) “17+10+16Be”: Циклы 10–12.
Среднее выгорание 29,0 %.



г) “17+10+23Be”: Циклы 13–15.
Среднее выгорание 36 %.



д) “17+10+49Be”: Циклы 16–19.
Среднее выгорание 43 %.

Рисунок 1. Последовательные конфигурации активной зоны с увеличивающимся количеством блоков бериллия

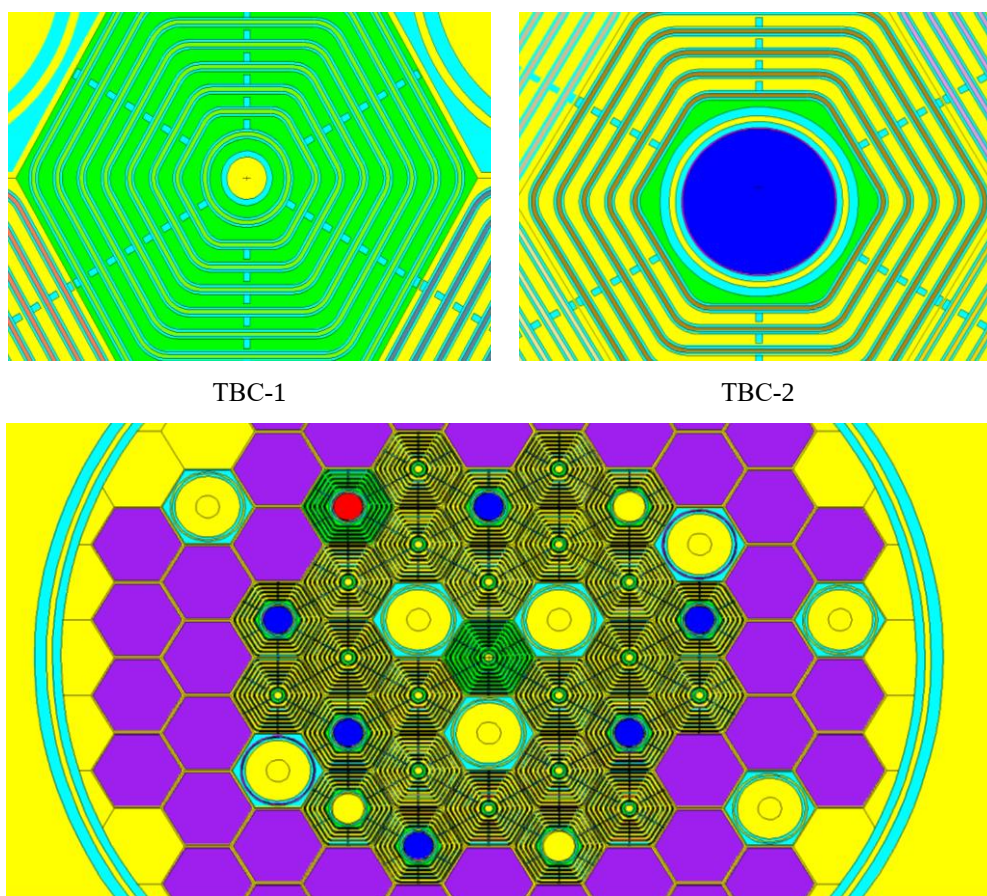


Рисунок 2. Компьютерные модели восьмитрубной и пятирубной ТВС и активной зоны с бериллиевым отражателем

Для моделирования физических процессов в активной зоне реактора ВВР-К с использованием метода Монте-Карло применяется компьютерный код MCNP. В создаваемом пользователем файле исходных данных для работы с кодом MCNP моделируется детальная геометрия всех компонентов активной зоны реактора ВВР-К, включая РО СУЗ, а также все присутствующие в ней материалы. Концентрации ядер материала топлива задаются пользователем отдельно для каждой ТВС, сначала – на основе данных паспортов ТВС, а по мере определения выгорания топлива – используя выдачу файлов MCNP6, решающих задачу выгорания. Выгорание топлива определяется с учетом фактического времени работы реактора ВВР-К на номинальной мощности 6 МВт. Здесь применяется гетерогенное описание ТВС: определен каждый твэл с его топливным сердечником и двумя оболочками из сплава САВ-1. Внутри ТВС определяется усредненное по ее объему выгорание. Описание ТВС иллюстрирует рисунок 2.

Ключевым физическим явлением, сопровождающим процесс деления тяжелых ядер, является испускание осколками деления вторичных быстрых нейтронов, иначе называемых мгновенными нейтронами, или нейтронами деления, в течение не более 10^{-13} секунд. Запоздывающие нейтроны – это ней-

троны, которые испускаются осколками деления через некоторое время (от миллисекунд до нескольких минут). Для описания временного поведения реактора важно разделение вторичных нейтронов на мгновенные и запаздывающие нейтроны. Именно благодаря наличию запаздывающих нейтронов возможен контроль процессов ядерного деления в активной зоне.

Новая аппаратура СУЗ реактора ВВР-К – это комплекс АСУЗ-18Р, который состоит из многочисленных блоков контроля и отображения [7]. Вычисление реактивности осуществляется с использованием точечной модели реактора, где зависимость среднего количества нейтронов от времени $N(t)$ описывается уравнениями:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= (\rho - \beta_{eff}) \cdot \frac{N}{\Lambda} + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i + Q \\ \frac{dC_i}{dt} &= \frac{N \beta_{eff,i}}{\Lambda} - \lambda_i C_i \end{aligned} \quad (1)$$

где N – среднее число нейтронов в реакторе; ρ – реактивность реактора; Λ – среднее время генерации нейтронов в реакторе, с; C_i – концентрация эмиттеров запаздывающих нейтронов i -й группы; λ_i – постоянная распада эмиттеров запаздывающих нейтро-

нов i -й группы; $\beta_{eff,i}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов i -й группы; β_{eff} – эффективная доля запаздывающих нейтронов.

Период разгона и реактивность ρ связаны с долей запаздывающих нейтронов β_i и постоянными распада дочерних нуклидов, образованных в результате деления урана, соотношением, которое иногда называют формулой обратных часов:

$$\rho = \frac{\Lambda}{T k_{eff}} + \sum_i \frac{\beta_{eff,i}}{\lambda_i + T}, \quad (2)$$

где Λ – время жизни мгновенных нейтронов, $\beta_{eff,i}$ – эффективная доля запаздывающих нейтронов i -й группы; λ_i – постоянная распада ядер-предшественников запаздывающих нейтронов i -й группы, s^{-1} ; T – период реактора, с.

Период разгона реактора T – это время увеличения мощности реактора в e раз. Период удвоения мощности $T(2)$ связан с периодом разгона T очевидным соотношением: $T(2) = T \ln 2$. Воспользовавшись формулой (2) и перейдя от T к $T(2)$, найдем зависимость реактивности от периода удвоения мощности реактора (рисунок 3).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЯ

Код MCNP6 использует стандартное разделение запаздывающих нейтронов на шесть групп, каждая из которых характеризуется усредненной постоянной радиоактивного распада λ_i ядер-предшественников, испускающих их. Расчетные значения долей запаздывающих нейтронов и постоянных радиоактивного распада λ_i ядер-предшественников приведены в таблице 2.

Анализ таблицы 2 показывает, что по мере возрастания количества бериллия в активной зоне эф-

фективная доля запаздывающих нейтронов уменьшается, а время жизни мгновенных нейтронов увеличивается. Это объясняется тем, что бериллиевый отражатель служит также и источником фотонейтронов, образующихся в результате реакции (γ, n) .

С использованием расчетных значений кинетических параметров для основных конфигураций активной зоны с бериллиевым отражателем построена зависимость реактивности реактора от периода удвоения мощности (см. рисунок 3). Эти данные были использованы при градуировке РО СУЗ методом асимптотического периода.

Оценено также влияние на эффективности РО СУЗ физических процессов, связанных с постепенной загрузкой блоков бериллия в активную зону. Рассчитанные с применением кода MCNP5 значения эффективности РО СУЗ для рассматриваемых конфигураций активной зоны приведены в таблице 3.

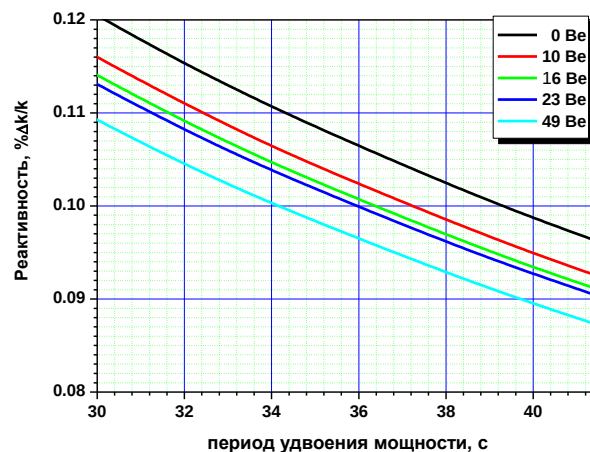


Рисунок 3. Зависимость реактивности активной зоны от периода удвоения мощности реактора ВВР-К

Таблица 2. Кинетические параметры пяти характерных загрузок активной зоны реактора ВВР-К*

загрузка	«17+10»	«17+10+10Be»	«17+10+16Be»	«17+10+23Be»	«17+10+49Be»
β_1	0,00027	0,00024	0,00026	0,00026	0,00024
β_2	0,00139	0,00136	0,00131	0,0013	0,00127
β_3	0,00135	0,00125	0,00122	0,00123	0,00117
β_4	0,00287	0,00289	0,00283	0,00274	0,0027
β_5	0,00122	0,00127	0,00111	0,00112	0,0011
β_6	0,00053	0,00048	0,00049	0,00074	0,00047
$\beta_{eff}, \%$	0,763	0,749	0,728	0,713	0,695
$\lambda_1, 1/c$	0,01334	0,01334	0,01334	0,01249	0,01334
$\lambda_2, 1/c$	0,03272	0,03271	0,03268	0,03175	0,03267
$\lambda_3, 1/c$	0,12081	0,12076	0,12069	0,10943	0,12065
$\lambda_4, 1/c$	0,30312	0,30308	0,303	0,31740	0,30297
$\lambda_5, 1/c$	0,85097	0,85104	0,85119	1,35184	0,85127
$\lambda_6, 1/c$	2,85794	2,85743	2,85681	8,66765	2,85648
$\tau, \text{мкс}$	46,1	50,6	59	60,6	70,3
$\rho, \%$	6,69	7,75	5,86	6,09	6,86

* Статистическая ошибка всех расчетов: запаздывающих нейтронов составляет менее $3,0E-5$, постоянной распада – менее $1,0E-5$, времени жизни мгновенных нейтронов – не более чем 1 мкс.

Таблица 3. Эффективности (\$) РО СУЗ последовательных конфигураций активной зоны со «свежим» и выгоревшим топливом

РО СУЗ	Конфигурация активной зоны *				
	Расчет (MCNP)	Энергопуск	Расчет (MCNP)		
	“1”		“2”	“3”	“4”
AP	0,35	0,35	0,50	0,69	0,64
1КО	1,39	1,17	1,73	2,08	2,22
2КО	2,60	2,54	3,07	3,81	3,52
3КО	2,82	2,99	2,77	2,72	3,14
4КО	1,44	1,36	1,84	1,86	2,35
5КО	1,80	1,82	2,1	2,00	2,46
6КО	2,48	2,75	3,37	3,42	3,39
1АЗ	1,18	1,22	0,84	1,09	1,52
2АЗ	1,32	1,31	1,52	1,95	1,47
3АЗ	1,23	1,23	1,75	1,90	1,42

* Обозначения конфигураций см. в таблице 1

Анализ таблицы 3 показывает, что суммарная эффективность РО СУЗ увеличивается по мере увеличения блоков бериллия в активной зоне, а значит, с точки зрения ядерной безопасности, реактор становится более безопасным.

Выводы

Получены эффективные доли запаздывающих нейтронов, постоянные распада, эффективности РО СУЗ для основных загрузок активной зоны, которые вносятся в систему АСУЗ-18Р для корректной оцен-

ки реактивности в течение, примерно, одного года работы реактора. Оценены также соответствующие эффективности РО СУЗ.

Показано, что с увеличением количества блоков бериллия в активной зоне эффективности РО СУЗ возрастают, тем самым улучшая ядерную безопасность реактора.

Работа выполнена при финансовой поддержке программы Министерства образования и науки Республики Казахстан №BR05236400.

ЛИТЕРАТУРА

1. Возобновление эксплуатации реактора ВВР-К. Сборник статей, Алматы, А.о. ИАЭ НЯЦ РК, 1998 г. – 248 с.
2. Шаймерденов А.А., Накипов Д.А., Аринкин Ф.М., Гизатулин Ш.Х., Чакров П.В., Кенжин Е.А. 50 лет исследовательскому реактору ВВР-К – материалы Международного научного форума «Ядерная наука и технологии», посвященный 60-летию Института ядерной физики, 12–15 сентября 2017 года, Алматы, Республика Казахстан, с. 405
3. Shaimerdenov A.A., Arinkin F.M., Chakrov P.V., Chekushina L.V., Gizatulin Sh.Kh., Koltsochnik S.N., Nakipov D.A. Conversion of WWR-K Research Reactor. // Proceeding of 37th International Meeting RERTR-2016. Antwerp, Belgium. – 2016. – P.6.
4. Аринкин Ф.М., Шаймерденов А.А., Гизатулин Ш.Х., Дюсамбаев Д.С., Колточник С.Н., Чакров П.В., Чекушина Л.В. Конверсия активной зоны исследовательского реактора ВВР-К. – Атомная энергия, 2017, т. 123, №1 – с. 15–20.
5. «Комплекс аппаратуры системы управления и защиты для исследовательского реактора ВВР-К АСУЗ-18р, РУНК.501319.075», СНИИП-Систематом, Москва, 2014.
6. MCNP – A General Monte Carlo N-Particle Transport Code, Version 5. - Los Alamos National Laboratory, LA-UR-03-1987, 2008.
7. MCNP6 User's Manual - Los Alamos National Laboratory, LA-CP-13-00634, 2013.

СУЛЫ ШАҒЫЛДЫРҒЫШТЫ БЕРИЛЛИЙЛІККЕ БІРТІНДЕП АУЫСТЫРУ КЕЗІНДЕ ТӨМЕН БАЙЫТЫЛҒАН ОТЫНДЫ ССР-Қ ЗР АКТИВТІ АЙМАҒЫНЫҢ КИНЕТИКАЛЫҚ ПАРАМЕТРЛЕРІНІҢ ӨЗГЕРУ ДИНАМИКАСЫ

Д.С. Сайранбаев, С.Н. Колточник, А.А. Шаймерденов, Д.А. Накипов, Е.А. Кенжин

ҚР Энергетика министрлігінің Ядролық физика институты, Алматы, Қазақстан

2015 жылы ССР-Қ реакторын төмен байытылатын отынға көшіру шеңберінде реактордың негізгі жүйелерін жаңғырту, оның ішінде БҚЖ толығынан ауыстыру жұмыстары жүргізілді. Реактордың активті аймағының жаңа конфигурациясы ықшам және барынша энергия кернеулі болды; отынның жану сипаты өзгерді. БҚЖ жұмыс органдарының саны ұлғайды, және де олардың геометриялық параметрлері өзгерді.

ССР-Қ реакторын конверсиялау тұжырымдамасына сәйкес, пайдаланудың алғашқы жылында сулы шағылдырғышты бериллийлікке біртіндеп ауыстыру жүргізіледі, ол реактордың нейтронды-физикалық

сипаттамаларының өзгеруімен тоғысатын болады. Бұл жұмыс бериллийлік шағылдырғыштың қалыптастырумен байланысты ССР-К реакторының кинетикалық параметрлерін анықтауға арналған. БҚЖ дұрыс жұмыс істеуі кешігуші нейтрондардың тиімді үлесі, лездік нейтрондардың өмір сүру уақыты сияқты активті аймақтың кинетикалық параметрлерін жүйеге енуін қарастырады. Сонымен бұл жұмыс осы параметрлердің мәндерін және реакторды пайдалану барысында олардың өзгеру динамикасын анықтауға арналған.

**DYNAMICS OF CHANGES IN THE KINETIC PARAMETERS OF THE WWR-K RESEARCH
REACTOR CORE WITH LOW-ENRICHED FUEL UNDER THE GRADUAL REPLACEMENT
OF THE WATER REFLECTOR BY BERYLLIUM REFLECTOR**

D.S. Sairanbayev, S.N. Koltchnik, A.A. Shaimerdenov, D.A. Nakipov, Y.A. Kenzhin

Institute of Nuclear Physics Ministry of Energy RK, Almaty, Kazakhstan

In 2015 the main reactor systems were modernized, including complete replacement of the control&instrumentation system within the conversion of the reactor WWR-K to low-enrichment fuel. The new reactor core configuration became compact and more energy-intensive; the character of fuel burn-up has changed. The number of C&I operating elements and their geometric parameters have been changed.

According to the concept of the reactor WWR-K conversion, the water reflector is planned to be gradually replaced by beryllium one during the first year of operation, which is associated with the change in the neutron-physical characteristics of the reactor. This paper is intended to determine the kinetic parameters of the reactor WWR-K associated with the formation of the beryllium reflector. The correct operation of C&I assumes the input of the core kinetic parameters values into the system, such as effective fraction of delayed neutrons, lifetime of instantaneous neutrons. This paper is devoted to determining the values of these parameters and the dynamics of their changes during the reactor operation.



НАУКА — ЭТО ОСОБЫЙ, СВОЕОБРАЗНЫЙ МИР ИНТЕЛЛЕКТУАЛОВ

Написав заголовок этой небольшой статьи, посвященной Альнуру Дуйсебаеву, я надолго задумался, вспоминая тех своих коллег, которых я знал, с которыми делил радости и горести, и которые всей душой, всем сердцем служили науке, тех, которых сегодня нет рядом с нами. В свое время об отдельных из них, с которыми приходилось близко общаться, я написал свои воспоминания, опубликованные в различных периодических изданиях и сборниках. Каждый из них имел свое место, свойственное только им лицо в науке, каждый из них оставил в науке непревзойденный, характерный только им неизгладимый след и можно с уверенностью утверждать и надеюсь не ошибусь, если скажу, что каждый из них представлял своеобразный мир интеллектуалов. Так, кем же был Альнур Дуйсебаев, кто он и чем же он отличен и стоял выше других простых смертных? Очевидно, с этого следует начинать наш небольшой разговор про него.

Естественно, что у каждого имеется своя высота, на которую он взбирается за время, отпущенное ему Всевышним. Перелистывая жизненный путь А.Д., в первую очередь я представляю себе непреклонное лицо того поколения, которое появилось на свет незадолго до страшного пожара, охватившего полмира, названного позже детьми войны. Тот, кто хотел, несмотря на невзгоды, достигнуть жизненных высот, в начале своей сущности обратился бы к Всевышнему с просьбой указать ему, как безошибочно найти то самое единственное заветное высшее учебное заведение, после окончания которого ему заказан долгий и тернистый путь исследователя.

Первый и единственный в то время университет на древней казахской земле с надеждой принял его, широко открыв свои двери и предоставив ему все возможности того времени для приобретения полноценного, глубокого и всестороннего знания, которое

позволило бы ему в дальнейшем оправдать эту самую надежду. На его счастье это было время, когда начал всемерное развитие недавно открытый Институт ядерной физики в составе Академии наук Казахстана. Закончив с отличием данный университет, Алеке (так казахи обращаются к старшим по возрасту) получает направление в этот новейший центр самых передовых научных изысканий. Так он стал тем самым счастливецом, который безошибочно и своевременно нашел духовного спутника на всю оставшую жизнь, позволившего ему сформироваться в дальнейшем в крупного исследователя. Но впереди его еще ждало дальнейшее совершенствование своего образования и мастерства в крупнейшем научном центре России в Москве, названного позже «Курчатовский институт», и во Всесоюзном институте электрофизической аппаратуры в г. Ленинграде.

Каким бы мудрым и гениальным не станет человек в будущем, он прежде всего обязан своему первому Учителю с большой буквы, выпестовавшего из него Человека с большой буквы. Как говорил один из древних греческих мыслителей: «Если я видел далеко, то только потому, что стоял на плечах гигантов». Именно такой гигант встретился Алеке в Физическом институте им. П.Н. Лебедева АН СССР. Это был человек, встреча с которым суждена не всякому счастливчику, вступившему в научную стезю, лауреат Нобелевской премии, академик П.А. Черенков, который без всякого сомнения принял к себе в аспирантуру молодого казахского парня. Закончив аспирантуру, блестяще защитив диссертацию на соискание степени кандидата наук, тем самым он оправдал доверие великого Учителя. Но это был не предел для Алеке, неистребимое желание и высокий дух познания требовали от него идти дальше и оставаться преданным делу служения науке.



Вернувшись из Москвы, он работает в том же Институте ядерной физики сначала в качестве младшего, затем старшего научного сотрудника, а в последующем возглавит вновь организованную лабораторию ядерных процессов. Как в относительно благополучные советские периоды жизни, так и позже, в так называемые лихие времена, ему всегда удавалось оставаться самим собой, сохраняя в себе данный природой и присущий только ему талант исследователя, никогда не имел привычки заглядывать в рот вышестоящих, не пытался угадывать их желания, не стремился занимать высокие посты, сулящие выгодное положение в обществе, но зато всегда оставался верным великой идее науки и только перед ней он склонял свою седую голову, в результате бывший сельский малый стал в дальнейшем всем известным ученым и убеленный сединой мудрым наставником большого числа молодежи. Об этом могут засвидетельствовать его многочисленные соратники, коллеги и воспитанники. Главное, менее важным свидетелем всех его достижений являются более 250 научных работ, опубликованных им в наиболее известных в мире рейтинговых журналах, а также в 1990 г. еще раз блестящая защита докторской диссертации в МГУ им. М.В. Ломоносова и присвоение ему высокого звания профессора физики.

Как известно, волк учит своего наследника по принципу «Нападай как я, кусай как я!» и этого наставления вполне достаточно для выживания волчонка. Заяц учит своего отпрыска по принципу «Учись убегать как я, учись спастись как я!» и тому больше ничего не нужно, чтобы не стать жертвой более сильного хищника. Но если ученый воспитывает своего последователя по принципу «Делай как я!», то оно было бы равносильно не восполнимой ошибке перед человечеством. Тогда научное общество не познало бы, а наука не обогатилась бы новыми достижениями о фотоядерных процессах, об упругих и квазиупругих взаимодействиях и рассеяниях, о ядерных реакциях нуклидов гелия с различными

ядрами, об «аномальных» и «цветных» рассеяниях, о механизмах предравновесного состояния ядерных реакций и многих других, не имеющих аналогов результатов исследований.

И как следствие, не были бы открыты многие новые явления и эффекты, а физическая наука не обогатилась бы новыми направлениями исследований. Не зря гласит древняя восточная мудрость о том, что «Сотен ворон не сравнить с одним соколом, а сотни жеребят не заменят одного иноходца». Наука и образование тоже своего рода оружие, значение которого зависит от того, в чьих руках оно окажется. Профессор Альнур Дуйсебаев, которого я знал, был именно из числа таких профессионалов своего дела.

Он всегда знал, о чем можно говорить и всегда следовал принципу: будь предельно разборчив как в действиях, так и в разговорах. При среднем росте, во всем его облике просматривалась значительность его как в действиях, так и в познании, возможности отслеживать состояние физической науки от древности до современности, а также умение доказать любые хитросплетения экспериментальных результатов с извлечением полезной информации. Он также всегда знал и наперед чувствовал всем своим сознанием, что нужно в данный момент для достижения поставленной цели, каким образом ее следует реализовать, за каждым его шагом, за каждым его движением чувствовались знакомые всем нам твердость духа и присутствие уверенности, которые передавались окружающим. И все это вместе взятое, позволило ему подготовить 4-х докторов и 14 кандидатов наук, быть избранным полноправным иностранным членом ОИЯИ в г. Дубне, выполнить фундаментальные разработки по курсам «Механизм ядерных реакций», «Физика тяжелых ионов», «Фундаментальные проблемы ядерной физики», «Ускорители заряженных частиц и их применение» и многие другие, предназначенные для подготовки аспирантов, магистрантов и докторантов, внося тем самым весомый вклад в развитие фундаментальной науки.



А вот человечество способно ли найти начало всего сущего, а если найдет, то хватит ли его возможности и твердости духа познать это самое? Подобно тому, как бесчисленное множество подобных вопросов бродят во вселенной, так и перед Альнур Дуйсебаевым стояло несметное количество проблем, которые требовали его непосредственного вмешательства и решения. Он знал, что отпущенное Всевышним для этой цели время ограничено, всего ему не успеть, но всегда был уверен, что настоящая наука никогда не стареет, никогда не затеряется в перипетиях судьбы человеческой и будет всегда передаваться из поколения в поколение, связь между которыми никому не разорвать. Именно эта уверенность, эта надежда ведет нас твердой поступью вперед.

Иногда, обращая внимание на его окружение, я часто задавался вопросом: почему так много молодых людей тянется к нему, что в нем такого, что привлекает даже людей бывалых? Причину этого я понял несколько позже, когда наши пути-дорожки пересеклись, как и судьбы людские. Это оказывается потому, что он был истинным профессионалом своего дела, а самое главное — мыслящим, умеющим находить настоящее золотое зерно среди плевел, человеком. В его оригинальных трудах не найти ни одного постороннего слова, не встретить ни одного неудачно написанного предложения. Не так много на свете личностей и не каждому дано такое счастье — найти свой единственно верный путь к всемогущей *истине*. Именно эти качества я замечал в отдельных его действиях, принятых им решениях неординарных, проблемных вопросов. Эти качества он всеми силами пытался передать и привить своим ученикам, всегда был честен по отношению к ним, всем своим существом хотел, чтобы у них тоже была высокая цель и чтобы они также достигли тех высот, что удалось ему, никогда не транжирил в пустую ограниченное и ни с кем не делимое время, определяющее судьбу человека. Считал, что время ни

с кем не считается, ну а если придется, то с ним должны считаться мы сами. Благодаря этому ему удалось глубоко проникнуть в самую суть науки, опередить многих и открыть другим своим последователям широкую столбовую дорогу в этом не простом для всех нас деле.

Глубокие познания, открытое, и в то же время всегда чуткое сердце, умение не только думать, но и мыслить, умение радоваться наравне со всеми малейшим достижениям своих учеников, без оглядки излагать свое понимание вещей, с уверенностью, без оглядки доказывать свою точку зрения, вот какие качества отличали его от других. Если он видел или понимал, что человек лавирует между мнениями других, он считал, что у этого товарища все свое, кроме точки зрения на происходящее. Все это определяло настоящую его сущность без приукрашивания, ибо он был и навсегда оставался верным выбранной когда-то науке под названием ядерная физика.

Единственное, что могу привести в заключение, это одну древнюю мудрость востока: бывают ученики, которые догоняют своих наставников, но есть ученики, которые опережают своих наставников. И хотя Алеке не опередил своего наставника — учителя П.А. Черенкова, тем не менее, он максимально приблизился к нему, когда наряду с многочисленными другими наградами, ему было присуждено звание лауреата Государственной премии Казахстана за выдающиеся достижения в области науки и техники за 2009 г. И я горжусь тем, что имею определенное отношение к этому успеху, когда будучи экспертом по государственным премиям, смог внести свою лепту в утверждение этого звания накануне его 80-летнего юбилея.

*Почетный работник образования и науки РК,
почетный заведующий кафедрой университета,
академик Европейской академии естественных наук,
доктор физико-математических наук,
профессор К.М. Мукашев*

ҒЫЛЫМ — ОРЫНЫ ЕРЕКШЕ ИНТЕЛЛЕКТУАЛДАР ӘЛЕМІ

Әлнұр Дуйсебайұлына арналған осы шағын мақаланың тақырыбын жазып қойып, ғылымға жан-тәнімен берілген, өзім білетін, көзім көрген әріптестерімді еске ала отырып, ұзақ ойға кеттім. Кезінде олар туралы бірнеше естеліктер де жазған едім. Олардың өзіндік бейнесі, ғылымдағы орыны, артында қалдырған өшпес ізі бар, әрқайсысы бір-бір интеллектуалдар әлемі десем қателеспеген болармын. Сонда мен білетін кешегі Әлнұр Дуйсебайұлы – кім, басқалардан оның шоқтығы немен биік? Ендеше әңгімені содан бастау керек шығар.

Өмірде әркімнің өзі шығатын биігі бар. Әлекеңнің өмір жолын зерделеу арқылы ең алдымен алапат соғыс алдында дүние есігін ашқан ұрпақтардың қасқайып тұрған бір өкілінің келбетін көрер едім. Сол өмірдің биігінен көрінемін, тіршіліктің шыңына шығамын деген адам алдымен Жаратушыдан терең білім алатын, ғылымға баулитын білім-ғылым ордасына жолықтыруды сұрар болар. Қазақтың маңдайына біткен сол кездегі тұңғыш университет оған есігін айқара ашты, терең біліммен сусындауға, ғылымға кеңінен құлаш сермеуге барлық мүмкіндікті туғызды. Оның бақытына қарай, сол жылдары Қазақстан Ғылым академиясының құрамындағы Ядролық физика Институты қарыштап даму үстінде еді. Университетті үздік тамамдап, сол ғылым ордасына жолдама алған Әлекең дер кезінде өзінің өмірлік рухани серігін қатесіз тапқан бақытты жан болып қалыптасты және казіргі кезде «Курчатов институты» деп аталатын Мәскеудегі Ресей ғылым орталығы мен Ленинград қаласындағы Бүкілодақтық Электрфизикалық аппаратура институтында білімі мен шеберлігін шыңдай түсті.

Қандай данышпан болмасын, оның алдында тәлім – тәрбие берген, ғылымға баулыған алғашқы ұстазы тұрады: «Мен алысты болжай алсам, алыптардың иығында тұрғанымның нәтижесінде» – деген еді ғой бұрынырақта гректің бір ұлы ойшылы. Сондай ойшыл жан Әлекеңе КСРО Ғылым академиясының П.Н. Лебедев атындағы Физика институтында жолықты. Ол – ғылым жолында ізденісте жүргендердің маңдайына жазыла бермейтін, қазақтың талапты да талантты жас жігітін ешбір күмәнсіз аспирантураға қабылдаған, Нобель сыйлығының иегері, академик П.А. Черенков еді. Аспирантураны тамамдап, ғылым кандидаты дәрежесін иемденген Әлекеңнің бойына біткен өршіл рух оған «біттім, болдым, жетілдім» дегізбей, ғылымға адал болуға жетеледі. Елге қайтып келіп, Әлекең сол Ядролық физика Институтында кіші ғылыми қызметкер, аға ғылыми қызметкер болып істей жүріп, жаңадан ұйымдастырылған Ядролық процестер зертханасының жетекшісі лауазымына дейін көтерілді. Ол кеңес заманында да, кейінгі

аумалы-төкпелі заманда да өзіне Жаратушы дарытқан тума талантымен алған жолынан, таңдаған бағытынан қайтпады, жоғарыға жағыну арқылы бастық болуға таласпады, өмір жолында ғылым деген ұлы ұстанымға ғана бас иген, ауылдан бала болып келіп, дана болып қалыптасты.

Бұған ғылым жолындағы серіктестері мен әріптестері куә. Ең бастысы – әлемнің түкпір-түкпірінде жарық көрген 250-ден астам ғылыми еңбектері мен тәрбиелеп өсірген шәкірттері куә. Оны аз десеңіз, 1990 ж. М.В. Ломоносов атындағы Мәскеу мемлекеттік университетінде докторлық диссертациясын қорғауы, ал 1994 ж. профессор лауазымын алуы дәлел болар еді.

Қасқыр өзінің бөлтірігін «Мен құсап тістеле!» – деп тәрбиелейді және осы өсиеті бөлтіріктің қасқыр болып жетілуіне жеткілікті. Қоян өзінің көжегін «Мен сыяқты қашып құтыл!» деп үйретеді және көжекке тірі қалып, басқаға жем болмау үшін өзге ештеңенің қажеті жоқ. Ал егер ғалым өзінің шәкіртіне «Менің істегенімді қайтала!» деп тәрбиелейтін болса, бұл жағдай адамзат алдындағы орыны толмас қателік болар еді. Тіпті фотоядролық процестер, серпімді және квазисерпімді шашыраулар, гелий нуклидтерінің түрлі ядролармен орын алатын реакциялары, «аномальды» және «көптүсті» шашыраулар, ядролық реакциялардың алдын-ала тепе-теңдік күйде болу механизмі секілді, тағысын – тағы толып жатқан теңдесі жоқ зерттеу жұмыстарының нәтижелері дүниеге келмес еді.

Нәтижесінде талай-талай жаңа құбылыстар мен заңдылықтар ашылып, ғылым саласы жаңа бағыттармен байытылды. «Көп қарға тең келмейді бір сұңқарға, көп жылқы тең келмейді бір тұлпарға» – деген ұлылардан қалған сөз бекер айтылмаса керек. Білім мен ғылым да қарудың бір түрі, бірақ олардан келер әсер мен пайда қандай адамның қолында болуына байланысты. Мен білетін Әлекең де сондай профессионалдардың қатарынан табылып келді.

Жақсының әрқашанда бір айтары болады. Әлнұр Дуйсебайұлының айтқыштығы өз алдына. Орта бойлы денесі білгіштігіне сай, физика ілімін бүгешігесіне дейін тәптіштеп дәлелдеп бере алатындығы қашанда көрініп тұратын. Ол білімде де, ғылымда да ненің қажеттігін, қалай орындау керектігін көзімен көріп, көңілімен сезіп, саналы түрде жүзеге асыра білді, жоғарыға, билікке таласпады, бірақ ғылым алдында адал болды, оның әрбір басқан қадамынан баршамызға таныс өзіне тән өршіл рух әрқашанда көрініп тұратын. Сол өршіл рух оған Дубнадағы әлемге танымал Ядролық зерттеулердің біріккен институтының шетелдік толық мүшесі болуға, 14 ғылым кандидатын, төрт ғылым докторын дайындауға, студенттер мен магистранттарға, аспи-

ранттарға, талантты жеткіншектерге тиянақты білім беруге, ғылымға баулуға арналған «Механизм ядерных реакций», «Физика тяжелых ионов», «Фундаментальные проблемы ядерной физики», «Ускорители заряженных частиц и их применение» секілді арнайы курстарды дайындауға, сол арқылы ғылымға еселеп үлес қосуға мүмкіндік туғызды. Ал адамзат уақыт бастауын таба алама, тапса оны танып-білуге қарым-қабілеті жетеме? Жауабы жоқ тиянақсыз дүние сұрақтар әлем кеңістігін аралап, ғарыш кеңістігін шарлап кезіп жүретіні секілді, Әлекеңнің алдында әлі шешілмеген, шешуді қажет ететін күрделі сан-алуан мәселелер жетерлік еді. Тек шынайы ғылым ескірмейді, өмір соқпақтарында жол-жөнекей өшіп қалмайды. Бізді алға жетелейтін де осы сенім, осы жасампаздық, себебі әділет жолы тек осында болса керек.

Кейде «Осы жұрт неге Әлекеңді жақын тартады, неге оған көбірек үйір болып келеді?» – депте ойлаушы едім. Оның себебін кейін, екеуміздің басымыз бір кемеде тоғысқанда барып түсіндім. Ол-ғылымдағы қас маман, ойшыл адам еді. Әлекеңнің ғылыми еңбектерінен бөгде тұрған бір сөйлемді, қисынсыз қосылған бір сөзді кездестірмейсің. *Ақиқат* деген ұлы құдыреттің тілін таба білген пенделер әлемде көп емес және бұл қасиет әркімнің пешенесіне жазыла салмаған. Көзімнің жеткені – сондай қасиеттерді кейде Әлекеңнің іс-қимылынан, ғылымда салған өзіндік ізінен көріп қалушы едім. Сол қасиеттерін ол өзі тәрбиелеп өсірген шәкірттеріне жеткізуге тырысты, соларға адал болды,

біреуге болса екен деп іші-бауыры елжіреп тұратын, өзі шыққан биікке басқалар да шықса екен деп армандайтын адамгершілігіне ешбір күмән келмеуші еді, ешкіммен санаспайтын, санассақ біз санасуымыз керек уақыт сынды шектеулі мерзімді босқа өткізбеуді ойлады. Нәтижесінде ғылымға терең бойлады, сол арқылы талай ұрпаққа сара жол ашты.

Терең ойлы білім, ашық сезімтал жүрек, жасампаздықпен қол жеткен ғылымдағы әрбір табысқа елмен бірге риясыз қуану, ойындағыны іркілмей еркін айту, өзінің көз-қарасын сеніммен дәлелдеу, осының бәрі Әлнұр Дүйсебайұлының бүтіндей болмысы еді, себебі ол – ядролық физика ғылымының өзі, сол білімнің көзі болды. Сондықтан да сөз соңында айтарым: бір шәкірт бар – ұстазына жете туады демекші, өзінің ғылымдағы алғашқы ұстазы П.А. Черенков секілді, Әлекең де ғылымдағы тамаша жетістіктері үшін сан-алуан марапаттаулармен қатар, 2009 ж. Қазақстан Республикасының ғылым мен техника саласындағы Мемлекеттік сыйлығы тапсырылды. Мен өзім сол жұмыстың мемлекеттік сарапшысы ретінде, Әлекеңнің 80 жылдық мерей тойы қарсаңында мүдірмей өтуіне үлес қосқанымды әрқашанда мақтан етемін.

*ҚР білім-ғылым саласының құрметті қызметкері,
құрметті кафедра меңгерушісі, Еуропа
жаратылыстану ғылымдары академиясының
академигі, физика-математика ғылымдарының
докторы, профессор Қ. Мұқашев*

СПИСОК АВТОРОВ

Абимолдаева А.Е., 102
Абышев Б.К., 44, 58
Амангалиева Р.Ж., 102
Аманкулов Ж.М., 31
Амренова А.У., 97
Барсуков Н.И., 20
Букина О.С., 84
Габдуллина А.Т., 97
Гордиенко Ю.Н., 20
Дегтярева А.С., 36
Дженбаев Б.М., 75
Джурахалов А.А., 10
Ермаков В.А., 28
Жалмукаш У.К., 31
Жукешов А.М., 97
Жумадилов К.Ш., 44, 49, 53, 58
Заурбекова Ж.А., 20
Иванников А.И., 44, 49, 53, 58
Ильиных С.А., 28
Кенжин Е.А., 114

Кожахметов Е.А., 84
Колточник С.Н., 114
Коровиков А.Г., 28
Коянбаев Е.Т., 84
Кукушкин И.М., 84
Кульсартов Т.В., 91
Курбанбеков Ш.Р., 84
Максимкин О.П., 61, 69
Миниязов А.Ж., 84
Молдабеков Ж.М., 97
Мукашев К.М., 5, 10, 120
Мурадов А.Д., 5
Накипов Д.А., 114
Нұрғали Е.Е., 61
Оразалина И.С., 58
Партыка Я., 40
Полтавцева В.П., 36, 40
Понкратов Ю.В., 20, 91
Прозорова И.В., 91
Сайранбаев Д.С., 114

Салихов Т.К., 105, 110
Салихова Т.С., 105
Сапатаев Е.Е., 84
Сапиев Е., 105
Сарсенова С.М., 49
Сатпаев Д.А., 36, 40
Серик К., 97
Серикбаев Б.С., 28
Скаков М.К., 91
Солодухин В.П., 75
Степаненко В.Ф., 44, 49, 53
Тажединов И., 31
Тажибаева И.Л., 91
Тулубаев Е.Ю., 20
Умаров Ф.Ф., 5, 10
Хан О.Г., 31
Хоши М., 44, 49, 53
Хусаин Ш.К., 31
Шаймерденов А.А., 114
Яр-Мухамедова Г.Ш., 5

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 подписуемых 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 A4. 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», 2018

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



